

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:

### «Лабораторний стенд дослідження роботи вентилячного двигуна»

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

(шифр / назва напрямку підготовки, спеціальності)

Руслан РОСТЕЦЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор кафедри КЕМСК

Володимир ГРАБКО

(прізвище та ініціали)

«30» січня 2024 р.

Опонент:

К.т.н., доц. каф. ЕСЕСМ  
Бабенко О.В.

(прізвище та ініціали)

«02» лютого 2024 р.

Допущено до захисту

кафедрою КЕМСК

Зав. кафедри Микола МОЦНОРИЗ

«30» січня 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Факультет \_\_\_\_\_ Електроенергетики та електромеханіки  
 Кафедра \_\_\_\_\_ Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів  
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
 Галузь знань \_\_\_\_\_ 14 – Електрична інженерія  
 Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
 Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

к.т.н., доц.

Микола Мошноріз

“24” жовтня 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
 НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ростецький Руслан Володимирович  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Лабораторний стенд дослідження роботи вентильного двигуна

керівник роботи Грабко Володимир Віталійович, д.т.н., проф. каф. КЕМСК  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “18” вересня 2023 року № 247

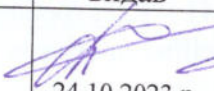
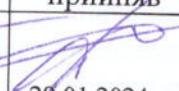
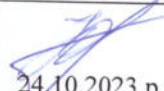



2. Строк подання студентом роботи: « 30 » січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: досліджуваний тип електричного двигуна – вентильний двигун; клас напруги 0,22 - 0,38 кВ. Необхідно розробити ескізний проект лабораторного стенду для дослідження режимів роботи вентильного двигуна. Регулятори контурів регулювання та керування функціональними блоками здійснити у мікропроцесорному виконанні.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Загальні відомості про електроприводи системи «вентильний двигун». 2. Розробка схеми силового каналу і системи управління вентильним двигуном на базі мікроконтролера. 3. Опис і засоби програмування мікроконтролера. 4. Економічна частина. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.




5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Мета, відомості, об'єкт та предмет дослідження. 2. Типова структурна схема ввімкнення вентильного двигуна. 3. Структурна схема лабораторного стенду. 4. Функціональна схема лабораторного стенду. 5. Принципова електрична схема системи керування. 6. Принципова електрична схема силового модуля. 7. Регульований блок живлення системи керування вентильним двигуном. 8. Програмно-апаратні засоби програмування мікроконтролера. 9. Алгоритм роботи системи керування. 10. Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	д.т.н., проф. каф. КЕМСК Гرابко В.В.	 24.10.2023 р.	 29.01.2024 р.
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 24.10.2023 р.	 29.01.2024 р.
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., проф. Кобилянський О. В.	 24.10.2023 р.	 29.01.2024 р.

7. Дата видачі завдання 24.10.2023 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	18.09.2023 р.	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	08.01.2024 р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	29.01.2024 р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	29.01.2024 р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	29.01.2024 р.	
6	Попередній захист МКР	30.01.2024 р.	
7	Нормоконтроль МКР	30.01.2024 р.	
8	Рецензування МКР	02.02.2024 р.	
9	Захист МКР	14.02.2024 р.	

Студент

  
(підпис)

Руслан РОСТЕЦЬКИЙ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Володимир ГРАБКО

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Ростецький Р.В. «Лабораторний стенд дослідження роботи вентильного двигуна». Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Вінниця: ВНТУ, 2024. 108 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 27 назв; рис. 25; табл. 17.

В магістерській кваліфікаційній роботі здійснено аналіз існуючих вентильних двигунів, схеми їх ввімкнення, переваги застосування, приклади застосування та основні параметри деяких типів вентильних двигунів. Розроблено ескізний проєкт лабораторного стенду дослідження роботи вентильного двигуна. Реалізована структурна та функціональна схема лабораторного стенду. Запропонована реалізація силового модуля керування, імпульсного блока живлення тощо. Обґрунтовано застосування цифрового сигнального процесора для реалізації регуляторів контурів керування та блока керування лабораторним стендом. Запропонована реалізація програматора мікроконтролера та застосування середовища для його програмування.

Розроблено алгоритм роботи системи керування.

Графічна частина складається з 10 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці розглянуті заходи та засоби з охорони праці та цивільного захисту під час використання лабораторного стенда для дослідження роботи вентильного двигуна.

Ключові слова: вентильний двигун, лабораторний стенд, ескізний проєкт, дослідження характеристик, мікроконтролер, алгоритм роботи.

## ABSTRACT

Rosteckiy R.V. «Laboratory stand for the study of valve engine operation». Master's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2024 – 108 p.

Byblos: 27, Table 17, Il.:25.

In the master's qualification work, an analysis of existing valve motors, their switching schemes, application advantages, application examples and basic parameters of some types of valve motors was carried out. A sketch project of a laboratory stand for the study of valve engine operation has been developed. The structural and functional scheme of the laboratory stand was implemented. The proposed implementation of the power control module, pulse power supply unit, etc. The use of a digital signal processor for the implementation of control circuit regulators and the control unit of the laboratory stand is substantiated. The proposed implementation of the microcontroller programmer and the application of the environment for its programming.

An algorithm of the control system has been developed.

The graphic part consists of 10 posters with the results of the work.

In the section on labor protection, the measures and means of labor protection and civil protection during the use of a laboratory stand for researching the operation of a valve engine are considered.

Keywords: valve engine, laboratory stand, sketch project, characteristics study, microcontroller, work algorithm.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СИСТЕМИ "ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН".....	12
1.1 Принципи побудови електроприводів за системою "Вентильний двигун".....	12
1.2 Огляд схемних рішень та принцип дії вентильного двигуна.....	16
1.3 Основні характеристики елементної бази та обладнання, що входить до складу вентильного двигуна.....	23
1.4 Приклади використання у промисловості.....	29
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СХЕМИ СИЛОВОГО КАНАЛУ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕСОРА DSP56F805.....	35
2.1. Структурна та функціональна схеми лабораторного комплексу.....	35
2.2 Вибір елементної бази.....	37
2.2.1 Вибір елементної бази системи керування.....	37
2.2.2 Вибір обладнання для інтерфейсного та силового модулів.....	44
2.2.3 Вибір двигуна.....	48
2.3 Розробка силового модуля та системи управління ВД.....	50
2.3.1 Розробка транзисторного комутатора.....	50
2.3.2 Розробка принципової електричної схеми системи управління.....	53
2.4 Розробка принципової електричної схеми блока живлення.....	57
2.4.1 Опис роботи блоку живлення.....	57
РОЗДІЛ 3 ОПИС І ЗАСОБИ ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРА DSP56F805.....	59
3.1 Основні характеристики та відомості про цифровий сигнальний процесор DSP56F805.....	59

3.2 Програмування системи керування ВД.....	61
3.2.1 Загальні відомості про систему команд мікропроцесора DSP56F805.....	61
3.2.2 Програмні засоби програмування.....	63
3.2.3 Розробка апаратних засобів для програмування мікропроцесора DSP56F805.....	64
3.3 Алгоритм роботи системи керування.....	65
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	68
4.1 Техніко-економічне обґрунтування створення стенду.....	68
4.2 Розрахунок планової собівартості лабораторного стенду.....	71
4.2.1 Визначення капітальних вкладень.....	71
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	73
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	73
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	73
5.1.2 Електробезпека.....	76
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	76
5.2.1 Мікроклімат.....	76
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	77
5.2.3 Виробниче освітлення.....	78
5.2.4 Виробничий шум.....	79
5.2.5 Виробнича вібрація.....	80
5.2.6 Виробничі випромінювання.....	81
5.2.7 Психофізіологічні фактори.....	81
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи системи керування лабораторним стендом в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	82

5.3.1 Дослідження безпеки роботи системи лабораторного стенда для імітації роботи його електромеханічної частини в умовах дії іонізуючого випромінювання.....	83
5.3.2 Дослідження безпеки роботи системи керування лабораторного стенда для імітації роботи електромеханічної частини в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	85
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	93
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	97



## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Відомо, що в теперішній час вентильні двигуни (ВД) в складі електропривода займають почесне перспективне місце. Двигуни цього типу прості у виготовленні, технологічні та дешеві. Вони мають регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму. Надійність звичайного вентильного двигуна вища за надійність будь-якого іншого, а за вартістю він поступається лише асинхронному з короткозамкненим ротором. Зважаючи на простоту, найбільшого поширення набули вентильні двигуни постійного і змінного струму з перетворювачами, що працюють в режимі джерела струму. Разом з тим, високі споживчі властивості приводу можуть бути забезпечені тільки при застосуванні потужної мікропроцесорної системи керування у поєднанні із сучасною силовою електронікою. Зусилля багатьох розробників у світі сконцентровані в цій галузі.

За думкою фахівців вентильні двигуни зі збудженням від високоенергетичних постійних магнітів Nd-Fe-B в даний час залишаються найбільш перспективними з усіх типів електродвигунів, що застосовуються в сучасних регульованих електроприводах малої і середньої потужності.

Сучасний розвиток в галузі силової та мікропроцесорної техніки створює сприятливі умови для розробки та виробництва електроприводів нового покоління на базі вентильних електродвигунів.

Враховуючи викладене, доцільним є створення лабораторного стенду для дослідження такого типу електродвигунів як спосіб акцентування уваги здобувачів освіти відповідного рівня на сучасних підходах до побудови високоефективних електроприводів.

У зв'язку з наведеним дана робота є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка ескізного проєкту лабораторного стенду для дослідження схеми підключення та режимів роботи вентильного двигуна.

Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести аналіз застосування вентильних двигунів в системах електроприводів, їхні переваги та недоліки;
- сформулювати структуру ескізного проєкту лабораторного стенду для дослідження роботи вентильного двигуна;
- розробити блок силового перетворювача, блок керування, блоки живлення тощо для втілення в ескізний проєкт реалізації лабораторного стенду;
- розробити алгоритм роботи цифрового блока керування на базі мікроконтролера.

**Об'єктом дослідження** в магістерській роботі є процеси дослідження роботи вентильного двигуна.

**Предметом дослідження** є засоби для формування умов режимів роботи в задачі усестороннього дослідження роботи вентильного двигуна.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач й аналізу прийнятих схемотехнічних та алгоритмічних рішень використані методи: теорії загальної електротехніки, теорії електропривода, теорії автоматичного керування, схемотехнічного конструювання, аналітичні можливості комп'ютерної алгебри для здійснення розрахунків математичних моделей.

**Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено підхід у вигляді ідеї по створенню лабораторного стенду для дослідження та вдосконалення знань щодо використання вентильного двигуна, що дозволяє при реалізації зазначеного стенда поглибити рівень знань студентів в області застосування вентильних двигунів.

2. Запропоновано ескізний проєкт лабораторного стенду для дослідження вентильних двигунів, розроблено основні функціональні блоки, реалізація і застосування яких дозволяють всебічно дослідити режими роботи вентиляного двигуна.

3. Обґрунтовано в якості керуючого пристрою лабораторного стенда використати цифровий сигнальний процесор DSP56F805, що дозволяє вдосконалити знання студентів в області мікропроцесорної техніки та програмування та одночасно мати змогу формувати різноманітні режими роботи вентиляного двигуна.

4. Розроблено алгоритм роботи керуючого пристрою лабораторного стенда по дослідженню роботи вентиляного двигуна.

5. Запропонований лабораторний стенд має відкриту структуру, що дозволяє розширювати його функціональність у розрізі 4-ї промислової революції.

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

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2024).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано одні тези доповідей в матеріалах науково-технічної конференції:

- «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 2024. [Електронний ресурс]. URL: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/viewFile/19530/16199. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 2 с.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОПРИВОДИ СИСТЕМИ "ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН"

## 1.1 Принципи побудови електроприводів за системою "Вентильний двигун"

Випуск електроприводів із використанням вентильних електродвигунів освоюють нині майже всі провідні електротехнічні компанії. Пропозиція на ринку вентильних електродвигунів характеризується широким потужним діапазоном - від одиниць ват до сотень кіловат, які можуть використовуватися в різних галузях промисловості, в тому числі і аерокосмічній.

Машини постійного струму мають вищі технічні показники (лінійність характеристики, високий ККД, малі габарити), ніж машини змінного струму.

Істотний їх недолік - наявність електромеханічного колектора, який знижує надійність, ускладнює конструкцію та удорожчання машини, створює радіоперешкоди, вибухонебезпечність тощо. Цих недоліків позбавлений безконтактний двигун постійного струму, який є вентильним двигуном.

У такому двигуні щітковий апарат замінений напівпровідниковим комутатором, якір знаходиться на статорі, а ротор являє собою двополюсний (рідше чотиріполюсний) постійний магніт. Для спрощення комутатора число секцій обмотки якоря вибирається малим – три, чотири.

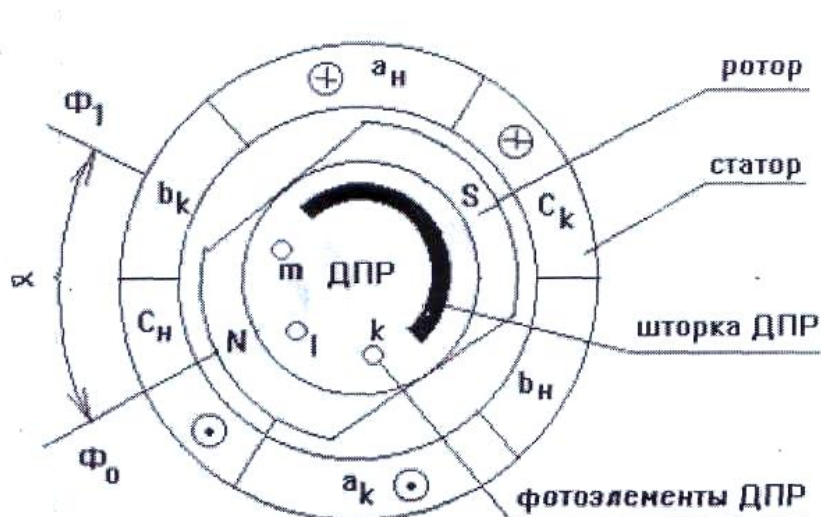


Рисунок 1.1 – Трифазний вентильний двигун

Важливим елементом двигуна є датчик положення ротора. Він може реалізовуватись на різних принципах - фотоелектричний, індуктивний, ємнісний, ефект Холла, і т. д. У двигуні застосовується фотоелектричний датчик, що містить три нерухомі фотоприймачі mlk, які по черзі закриваються шторкою, що обертається. Двійковий код, що отримується з датчика положення ротора (ДПР), фіксує шість різних положень ротора (шість фаз).

У таблиці 1.1 одиниці відповідає наявність сигналу на виході датчика, тобто коли фотоприймач відкрито, а нулю - відсутність сигналу, коли відповідний фотоелемент закритий шторкою.

Сигнали датчиків перетворюються керуючим пристроєм КП (рис. 1.2) на комбінацію керуючих напруг  $U_1 - U_6$ , які керують транзисторними ключами  $K_1 - K_6$  згідно з нижньою частиною табл. 1.1 так, що в кожен такт (фазу) роботи двигуна включені два ключі - верхній і нижній і до мережі підключені послідовно дві з трьох обмоток якоря. Обмотки якоря a, b розташовані на статорі зі зміщенням на 120-град (табл. 1.1) і їх початки і кінці з'єднані так, що при перемиканні ключів створюється обертове магнітне поле. Одному циклу

роботи комутатора відповідає один оберт ротора. Цикл ділиться на шість тактів (тимчасових фаз), яким відповідає просторовий кут  $=60^\circ$  град.

Комутація забезпечується так, що потік збудження  $\Phi_0$  відстає на певний кут від потоку якоря. На рис. 1.1 струми в обмотках і положення ротора показані для фази 1. В результаті взаємодії потоку якоря і збудження створюється крутний момент  $M$ , який прагне повернути ротор так, щоб потоки якоря і збудження збіглися, але при повороті ротора під дією ДПР відбувається перемикання обмоток і потік якоря повертається на наступний крок.

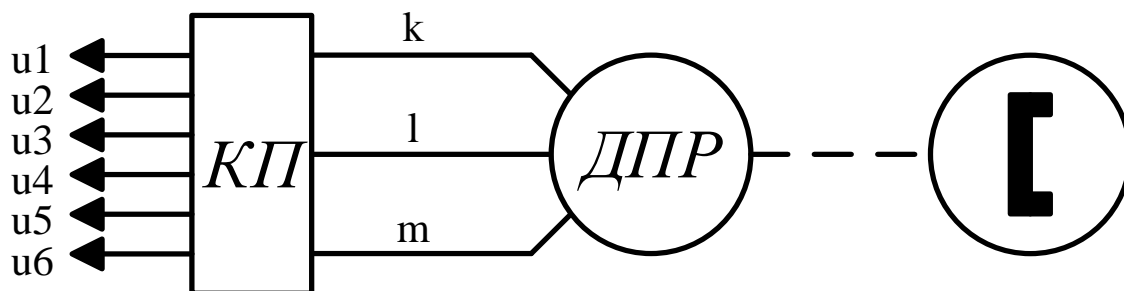


Рисунок 1.2 – Трифазний вентильний двигун

Таблиця 1.1 Сигнали, що надходять на вентильний двигун

Фаза	1	2	3	4	5	6
К	1	0	0	0	1	1
L	1	1	0	0	0	1
M	1	1	1	0	0	0
U1	1	0	0	0	0	1
U2	0	1	1	0	0	0
U3	0	0	0	1	1	0
U4	0	0	1	1	0	0
U5	0	0	0	0	1	1

U6	1	1	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---	---

Часову діаграму роботи вентиляльного двигуна наведено на рис.1.3.

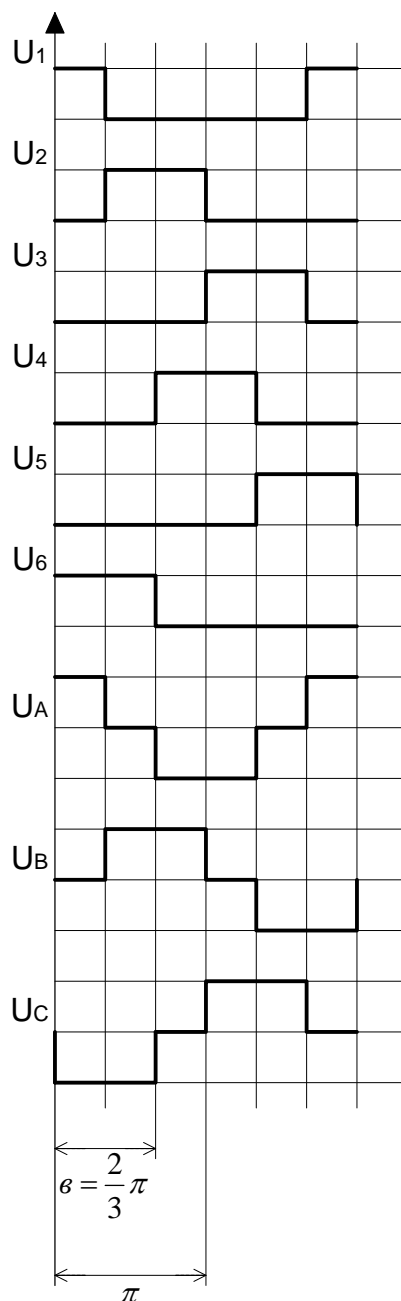


Рисунок 1.3 – Часова діаграма роботи трифазного вентиляльного двигуна

Як видно з діаграми, вентиляльний двигун працює як трифазний синхронний двигун, частота обертання його ротора пропорційна частоті обертання поля. Основною відмінністю від синхронного є його

самосинхронізація за допомогою ДПР, внаслідок чого у цього двигуна, навпаки, частота обертання поля пропорційна (у даному разі при дво полюсному якорі) або дорівнює частоті обертання ротора, а частота обертання ротора залежить від напруги живлення, тобто двигун працює як двигун постійного струму.

## **1.2 Огляд схемних рішень та принцип дії вентильного двигуна**

Під вентильними двигунами розуміють електропривод із синхронним двигуном та інвертором, в якому керування інвертором здійснюється у функції кута повороту ротора двигуна.

Відомі такі дві основні групи електроприводів з вентильним двигуном:

- а) вентильний двигун з перетворювачем частоти із ланкою постійного струму;
- б) вентильний двигун з безпосереднім перетворювачем частоти.

Частотно-керовані електроприводи з асинхронними двигунами та з застосуванням інверторів із ланкою постійного струму пов'язані зі штучною комутацією тиристорів за допомогою конденсаторів. Застосування синхронного двигуна замість асинхронного дає можливість реалізувати так званий вентильний двигун, в якому управління інвертором здійснюється від двигуна, причому ввімкнення чергового тиристора інвертора здійснюється у функції кута повороту ротора двигуна, а вимкнення попереднього тиристора здійснюється за рахунок випереджувальної е.р.с. синхронного двигуна. Інвертор може виконуватися як інвертор напруги та як інвертор струму. Вентильний двигун з інвертором струму має деякі переваги в порівнянні з інвертором напруги. Зокрема, наявність великого дроселя у ланці постійного струму дає можливість отримати напругу на затискачах двигуна незалежно від форми напруги в проміжному ланцюзі. Струм протягом процесу комутації



залишається практично постійним. Крім того, інвертор струму дає можливість легко здійснити рекуперативне гальмування при збереженні сталості напрямку струму шляхом зміни полярності напруги в проміжному ланцюгу.

Для підвищення надійності вентильного двигуна і для досягнення високих частот обертання бажано реалізовувати безщіткове збудження двигуна із застосуванням в якості збудника асинхронної машини, що обертається проти поля, і подає на обмотку збудження двигуна - випрямлений струм через діоди, які обертаються разом з ротором синхронного двигуна. Застосування безщіткового збудження двигуна дає можливість підвищити верхню межу частоти обертання (до 4500—6000 об/хв). На схемі вентильного двигуна (рис. 1.4) зображено синхронний двигун  $M1$  з безщітковим збудженням. Як збудник застосовується і асинхронна машина  $ME$  з фазним ротором, яка через випрямний міст  $U2$  подає струм в обмотку збудження двигуна  $M1$ . Оскільки машина  $ME$  знаходиться на одному валу зі статором синхронної машини  $M1$ , а випрямний міст  $U2$  обертається разом з ротором машини  $M1$ , електричний зв'язок між обмотками ротора  $ME$  та обмоткою збудження  $M1$  може здійснюватися без щіток і кілець, наприклад проводи, що йдуть від ротора до випрямного мосту, можуть розташовуватися в пустотілому валу, що механічно поєднує машину  $M1$  і  $ME$ . Нерухомий статор машини  $ME$  отримує живлення від мережі змінного струму через регулятор струму збудження  $AAE$ , що містить три пари зустрічно-паралельно включених тиристорів з фазовим управлінням. Регулятор  $AAE$  може у свою чергу бути включеним до системи автоматичного регулювання, що змінює струм збудження за різними законами, наприклад можна змінювати струм збудження пропорційно струму статора двигуна  $M1$ . Перетворювач частоти, від якого отримує живлення синхронний двигун  $M1$ , складається з мережевого перетворювача  $U1$ , згладжувального

дроселя  $L$  у проміжній ланці постійного струму, перетворювача зі сторони машини  $UZ$  та тиристора реактивного струму  $VC$ .

Мережевий перетворювач  $U1$  працює в режимі керованого випрямляча, з якого випрямлена напруга і споживана з електричної мережі активна потужність надходить до проміжного ланцюга постійного струму. Перетворювач з боку електричної машини працює як інвертор і створює протинапругу постійного струму. Постійна протинапруга, що виникає на вході інвертора, при постійному збудженні двигуна  $M1$  пропорційна частоті обертання  $M1$ . Згладжувальний дросель  $L$  у проміжному ланцюзі постійного струму сприймає різницю миттєвих значень напруг, що віддаються перетворювачами з боку мережі та з боку електричної машини.

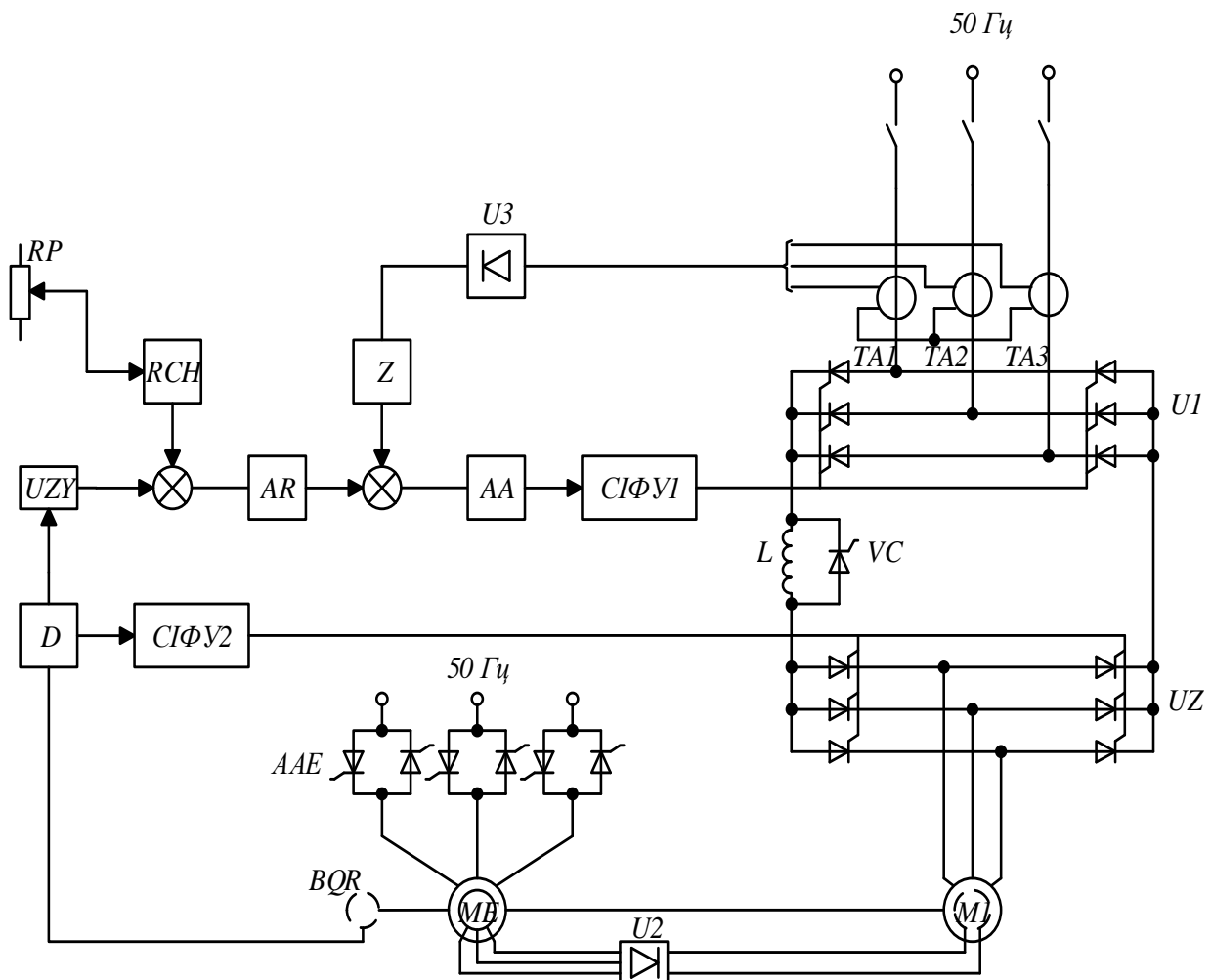


Рисунок 1.4 – Схема вентильного двигуна з інвертором струму і безщітковим збудженням синхронного двигуна

При генераторному гальмуванні приводу напрям потоку енергії змінюється шляхом впливу на вузли регулювання перетворювачів з боку мережі та з боку машини. Перетворювач з боку машини працює як випрямляч, а мережевий перетворювач працює в режимі інвертора, веденого мережею. Енергія, яка надходить від машини, подається назад в мережу живлення. Як зазначалося вище, напрям постійного струму при цьому не змінюється, а змінюється полярність напруги в проміжному ланцюзі. Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно змінити порядок формування імпульсів ввімкнення тиристорів перетворювача *UZ* таким чином, щоб змінився напрямок обертового поля.

З'єднаний з валом двигуна датчик положення полюсів *BQR* сигналізує про положення полюсів двигуна та за допомогою логічного пристрою *D* вибирає, які тиристори перетворювача *UZ* повинні бути включені системою імпульсно-фазового управління *СІФУ2*, щоб утворити обертовий момент у необхідному напрямку. Слід зазначити, що синхронний двигун, що працює з тактовими імпульсами, які залежать від положення ротора, ідентичний якору машини постійного струму з колектором, і тому вентильний двигун набуває характеристику машини постійного струму: усувається властива синхронній машині схильність перекидатись при перевантаженні. Це пояснюється тим, що подальше перемикання обертового поля відбувається тільки в тому випадку, якщо ротор повернувся на певний кут, в електричних градусах (при трифазній мостовій схемі на  $60^\circ$ ); асинхронний режим у такому разі неможливий. Машина тільки за своїм облаштуванням є синхронною машиною, а за принципом дії є машиною постійного струму з електронним колектором, яким є інвертор *UZ*. Сигнали, що отримуються від датчика положення полюсів ротора *BQR*, використовуються одночасно для визначення дійсного значення частоти обертання.

Для цього вони перетворюються в цифро-аналоговому перетворювачі  $UZY$  в аналоговий сигнал дійсної частоти обертання. Решта системи автоматичного регулювання відповідає такій же системі для машин постійного струму, що отримує живлення від статичного перетворювача. Регулятор частоти обертання  $AR$  отримує завдання від задавального потенціометра  $RP$  через задавач інтенсивності  $RCH$ . Регулятору  $AR$  підпорядкований контур регулювання струму, який складається з трансформаторів струму  $TA1, TA2, TA3$  мостового випрямляча  $UZ$ , фільтра  $Z$  та регулятора струму  $AA$ . Вихідний сигнал регулятора струму впливає на систему імпульсно-фазового управління  $СІФУІ$ , яка керує мережевим перетворювачем  $U1$  у функції струму.

При частоті обертання, близькій до нуля, і низьких частотах обертання, коли синхронна машина не може генерувати досить велику напругу, застосовують переведення інвертора  $UZ$  в режим примусової конденсаторної комутації, що пов'язано з ускладненням силової частини  $UZ$ , або застосовують періодичне короткочасне переведення мережевого перетворювача  $U1$  в режим інвертора, веденого мережею. Струми у проміжному ланцюгу і у перетворювачі  $UZ$  стають рівними нулю і після паузи близько 10 мс мережевий перетворювач  $U1$  знову переводиться в режим керованого випрямляча, і вмикаються наступні тиристори перетворювача  $UZ$ .

Цей процес відбувається 6 разів протягом одного періоду частоти мережі до тих пір, поки напруга машини не стане достатньо великою, щоб здійснювати комутацію з боку машини. Для зменшення часу спадання струму до нуля дросель  $L$  у ланці постійного струму шунтують тиристором  $VC$ , який включається в момент початку спадання струму. Датчик положення полюсів машини в більшості випадків застосовується фотоелектронний. Вентильний двигун на відміну від системи з машинами постійного струму не має обмежень щодо частоти обертання та потужності.

### **Вентильні двигуни з безпосереднім перетворювачем частоти.**

В електроприводах, що не вимагають досягнення високих частот обертання, можливе застосування вентильних двигунів з перетворювачами частоти з безпосереднім зв'язком.

Структурна схема електроприводу з вентильним двигуном із безпосереднім перетворювачем частоти зображена на рис. 1.5. Синхронний двигун А1 отримує живлення від трифазного безпосереднього перетворювача частоти. Перетворювач отримує живлення від мережі 50 Гц і складається з шести трифазних тиристорних мостів, включених попарно за зустрічно-паралельною схемою  $U1 - U6$ . Перетворювач  $U1$  формує - додатній напівперіод вихідного струму, а перетворювач  $U2$  - від'ємний - напівперіод вихідного струму фази А. Перетворювачі працюють з роздільним управлінням, тобто при формуванні додатного напівперіоду вимкнений міст  $U2$ , а при формуванні від'ємного напівперіоду - міст  $U1$ . Мости  $U3$  і  $U1$ ,  $U5$  і  $U6$  працюють аналогічно, формуючи вихідні напруги фаз В і С. Частота вихідної напруги може змінюватися від нуля до 16 Гц. Датчик положення полюсної системи  $BQ$  виконаний у вигляді допоміжної асинхронної машини з фазним ротором з числом пар полюсів, рівним числу пар полюсів двигуна  $M$ . Статор датчика  $BQ$  отримує живлення від мережі 50 Гц, з його ротора знімається напруга, що модулюється частотою обертання двигуна  $M$ . У блоці розв'язувального пристрою (БРУ) за допомогою демодуляції отримують трифазний задавальний сигнал, що керує пофазно трифазним перетворювачем з безпосереднім зв'язком у функції струму.

За допомогою функціональних нелінійних перетворювачів  $ACV1$  і  $ACV2$  встановлюється значення кута  $\varphi$  між вектором лінійного навантаження струму статора і положенням полюсів ротора і струму збудження  $I_z$  в залежності від заданої амплітуди статорного струму  $I_m$ , щоб установка працювала з  $\cos\varphi = 1$ . Сигнал нелінійного перетворювача  $ACV1$

вводиться в БРУ, а сигнал АСV 2 підводиться до системи імпульсно-фазового управління СІФУ2 перетворювача U 7, що живить збудження двигуна. Вихідний сигнал БРУ є задавальним сигналом регулятора струму АА і подається на вузол порівняння цього регулятора. На цей же вузол порівняння подається сигнал зворотного зв'язку від датчика струму статора ВА. Вихідний сигнал з АА подається на систему імпульсно-фазового керування СІФУ1 перетворювачів U1 і U2. Подібним чином здійснюється керування перетворювачами U3, U4, U5 і U6.

Загалом структурна схема на рис. 1.5 відповідає структурі схеми на рис 1.4, тобто має місце система підпорядкованого регулювання, де контур струму статора і його кутове положення, а також струм збудження двигуна підпорядковуються вихідному сигналу  $I_m$  регулятора частоти обертання AR.

Потенціометр RP є задатчиком частоти обертання, його вихідна напруга через регулятор інтенсивності RCH підводиться до вузла порівняння регулятора частоти обертання AR. Дійсне значення частоти обертання підводиться до вузла порівняння AR від тахогенератора BR.

Привід може працювати у чотирьох квадрантах, забезпечуючи двигунний режим та режим рекуперативного гальмування в обох напрямках.

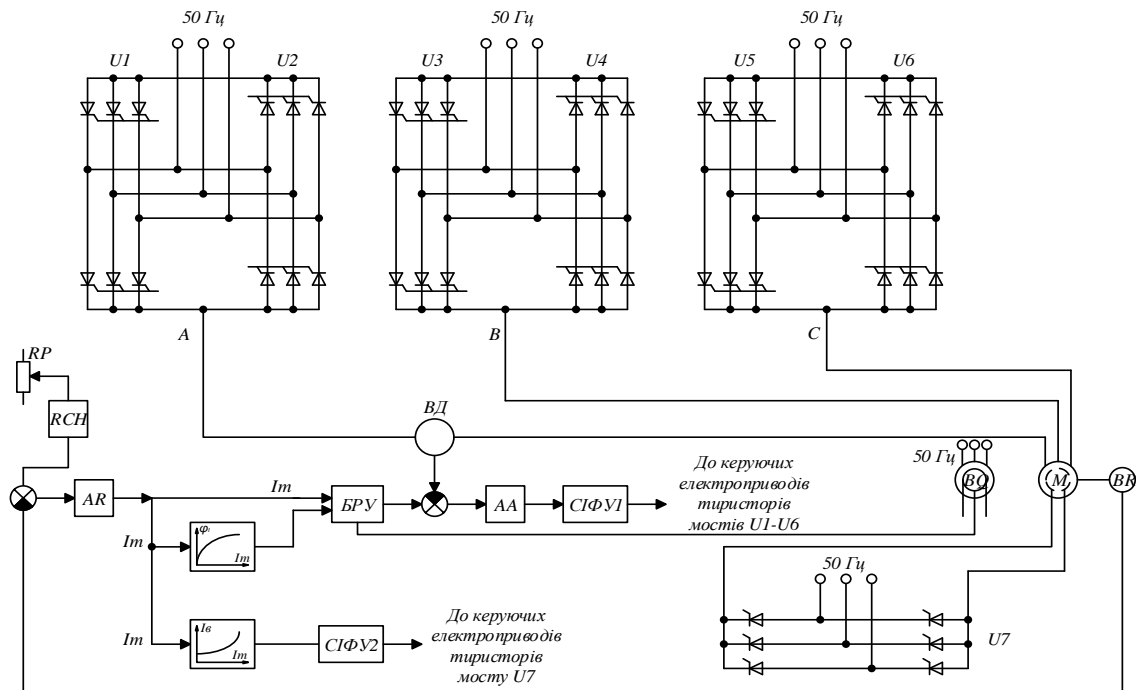


Рисунок 1.5 – Схема вентильного двигуна з безпосереднім перетворювачем частоти

Переваги зазначеної системи — природна комутація та повне усунення проблеми щодо необхідності роботи вентильного двигуна при низьких частотах обертання в режимі примусової комутації.

За достатньої потужності перетворювача можна досягти більшого моменту при нестационарних процесах, що значно перевищує момент у тиристорних електроприводах постійного струму.

Для зміни напрямку обертання достатньо змінити порядок проходження фаз у блоці розв'язувального пристрою БРУ.

### 1.3 Основні характеристики елементної бази та обладнання, що входить до складу вентильного двигуна

Бурхливий розвиток створення напівпровідникових елементів наприкінці 20 століття привів до тенденції витіснення двигунів постійного струму та асинхронних двигунів з фазним ротором із систем управління, що потребують підвищеної надійності та широких діапазонів регулювання швидкості. На їх місце часто встановлюють вентильні

двигуни. Найчастіше їх застосовують у робототехніці, у пристроях працюючих у важких умовах експлуатації та у верстатах ЧПУ. Основними перевагами цих двигунів, перед традиційними, є відсутність щітково-колекторного вузла, підвищена перевантажувальна здатність при пусках і гальмуваннях, вищий коефіцієнт корисної дії. Співвідношення потужності до масогабаритних показників значно вищі, ніж у будь-яких інших двигунів. Порівнюючи вентильні двигуни з двигунами постійного струму, можна сказати, що вентильні двигуни поступово повністю витісняють двигуни постійного струму. Якщо подивитися на виробництво двигунів постійного струму по всьому світу, то переважно до 80% їх застосування припадає на автомобільну промисловість. У кожному автомобілі може встановлюватися до кількох десятків двигунів постійного струму, що використовуються у всіх можливих механічних пристроях, починаючи від склопідйомників і дзеркал заднього виду і закінчуючи електропідсилювачами керма.

В останні роки автомобілі частково оснащуються вентильними двигунами, що призводить до їхнього поширення.

Крім того, вентильні двигуни впроваджуються і в побутову техніку, зокрема в пральні машини, кухонні комбайни тощо. Порівняно з асинхронними двигунами вентильні двигуни мають гнучкішу систему керування, що дозволяє отримувати ширші діапазони регулювання швидкості. Крім цього вентильний двигун забезпечує значно вищий коефіцієнт корисної дії на малих швидкостях, ніж асинхронні двигуни. Подібні властивості вентильного двигуна мають і індукторні двигуни, відмінність яких полягає в способі створення магнітного потоку ротора. У вентильних двигунах магнітний потік створюється постійними магнітами, в індукторних завдяки потоку, що створюється статором. Оскільки момент на валу індукторних двигунів має сильну нелінійність від струмів, що протікають у фазах, то в них спостерігаються значні пульсації моменту. В



даний час області застосування вентильних та індукторних двигунів практично не перетинаються. Незважаючи на те, що проводяться роботи з оптимізації алгоритму управління індукторним двигуном, застосування їх обмежується в системах, які не висувають високих вимог до величини пульсацій моменту, кратності пускового моменту та діапазону регулювання швидкості.

До цього часу вентильні двигуни, в основному, застосовувалися в робототехніці, системах ЧПУ та в пристроях з підвищеними вимогами до надійності та масогабаритних показників. Особливість вентильних двигунів полягає у можливості створення постійного моменту на вихідному валу практично без пульсацій. Завдяки векторному управлінню, що дозволяє створювати будь-який потік статора та підтримувати його ортогональним потоком ротору, можна задати будь-який момент двигуна на вихідному валу. Як і в двигунах постійного струму, величина моменту прямо пропорційна струму при перпендикулярності потоків. До недоліків вентильних двигунів відноситься значна вартість, обмежений діапазон робочих температур і необхідність використання датчика положення ротора. Перші два недоліки пояснюються наявністю постійних магнітів із рідкісноземельних матеріалів, які у свою чергу досить дорогі та мають невисоку температуру точки Кюрі. Наявність датчика положення ротора обумовлено принципом керування. Якщо у двигунах постійного струму обмотки перемикалися за допомогою колектора, то у вентильних перемикання обмоток здійснюється системою керування. За сигналами датчика положення ротора система управління перемикає обмотки у відповідній послідовності.

В якості датчиків положення ротора використовуються синусно-косинусні трансформатори, що обертаються, фото імпульсні датчики та датчики Холла. Недоліком таких датчиків є або їхня значна вартість, або непридатність до використання в хімічному або радіоактивному

середовищі. Крім того, всім датчикам потрібні з'єднувальні дроти, що часто не зручно або неможливо. При великих відстанях між двигуном та системою управління на інформаційні лінії з датчиків можуть наводитися перешкоди, що призводять до збою у роботі електроприводу загалом.

### Двигуни вентильні серії 5ДВМ

Двигуни вентильні серії 5ДВМ зі збудженням від рідкісноземельних магнітів на роторі призначені для роботи у складі електроприводів з високими динамічними характеристиками та широким діапазоном регулювання швидкості (до 10000), не мають контактних щіткових вузлів, які вимагають обслуговування, відрізняються мінімальними масою.



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд вентильних двигунів серії 5ДВМ

Управління двигунами здійснюється від регульованих електроприводів серій ЕПБ-2, ЕПБ-3, ЕПБ-4. Двигуни 5ДВМ містять безконтактний тахогенератор та датчик положення ротора. На замовлення двигуни оснащуються вбудованим гальмом та вмонтованим фотоелектричним датчиком кутових переміщень ВЕ178А (ЛІР-21). Вентильні електродвигуни 5ДВМ є повністю безконтактними електричними машинами фланцевого виконання зі збудженням від рідкісноземельних постійних магнітів Nd-Fe-B, розташованих на роторі. Двигуни оснащені комплексним безконтактним датчиком, що включає тахогенератор ТС-45 і фотоелектричний датчик положення ротора. Є виконання з можливістю

під'єднання до валу заднього щита датчика переміщень типу VE178. У передньому щиті передбачено розташування безінерційного магнітоелектричного гальма аварійної зупинки двигуна. У лобових частинах статора обмоток закладені датчики температурного захисту. Двигуни серії 5ДВМ випускаються у чотирьох габаритах за діаметром приєднувальних отворів переднього фланця: 55, 85, 115, 215. У кожному габариті є кілька виконань по довжині, що дозволило охопити діапазон номінальних моментів від 0,05 до 70 Нм. Конструкція двигунів забезпечує будь-яке робоче положення у просторі. Двигуни можуть працювати від електроприводів провідних компаній світу аналогічного призначення.

Основні технічні характеристики електродвигунів 5ДВМ викладені нижче.

Двигуни допускають експлуатацію при будь-якому положенні осі обертання в просторі та механічних факторах зовнішнього середовища. Номінальний режим роботи двигунів з моментом на валу  $M_{do}$  при частотах обертання від 0 до  $0,5n_{max}$  і з моментом  $0,8 M_{do}$  при частотах обертання від  $0,5n_{max}$  до  $n_{max}$ .

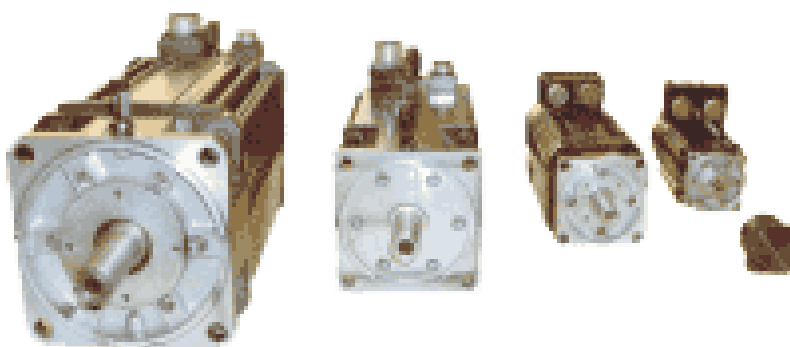


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд вентильних двигунів серії 5ДВМ85

Двигуни допускають роботу при короткочасних навантаженнях з моментом не більше  $5M_{do}$ .

Таблиця 1.2 Основні параметри вентильних двигунів серії 5ДВМ85 та 5ДВМ115

Параметр	Одиниця виміру	5ДВМ85				5ДВМ115			
		A	S	M	L	A	S	M	L
Тривалий момент $M_{до}$	Н м	0,23	0,47	0,7	1,3	2,3	3,5	4,7	7
максимальна швидкість	об/хв			2000	3000	4000	6000		
Довжина двигуна	мм	168/270	178/280	198/300	218/320	262/362	282/382	302/402	342/442
Маса двигуна	кг	2,4/2,95	2,8/3,35	3,2/3,75	4,0/4,55	7,7/8,4	8,8/9,5	10,1/10,8	12,4/13,1
Момент інерції ротора	о. кв. см	0,56/0,59	0,76/0,79	1,1/1,13	1,5/1,53	3,7/3,89	4,7/4,89	5,6/5,79	7,5/7,69

Інший тип вентильних двигунів – це двигуни вентильні (синхронні) серій ДВУ2М165, ДВУ2М215, які призначені для роботи у складі широко регульованих швидкодіючих електроприводів механізмів подачі металорізальних верстатів з числовим програмним керуванням, а також промислових роботів та інших механізмів з аналогічними вимогами. Двигуни мають датчик швидкості та положення ротора і відносяться до автоматизованих виробів із застосуванням мікропроцесорної техніки. За додатковим спеціальним замовленням двигуни можуть бути укомплектовані безлюфтовим гальмом і фотоелектричним перетворювачем кутових переміщень (датчиком шляху).

Двигун має безкорпусне виконання із природним охолодженням. Осердя статора одночасно є корпусом двигуна і зібране з листів електротехнічної сталі, зварених в один пакет. Трифазна шестипольна статорна обмотка виконана емальованим проводом. Осердя ротора

виконано з шихтованих листів електротехнічної сталі, напресованих на вал. На осердя наклеюються постійні магніти зі стронцієвого фериту. Таким чином, вентильний двигун є електричною машиною зі збудженням від постійних феритових магнітів і електронною комутацією фаз обмотки статора.

#### **1.4 Приклади використання у промисловості**

Промислове освоєння вентильних електродвигунів відкрило можливість для створення різних типів електродвигунів широкого застосування та розробки нових супутніх виробів, таких як магнітоелектричні швидкодіючі гальма з використанням високоенергетичних постійних магнітів. Ці пристрої знаходять дедалі ширше застосування не тільки у виробках електромеханіки, а й у електроніці, приладобудуванні й у багатьох інших галузях техніки. Крім того, розробляється нове технологічне обладнання для намагнічування та контролю високоенергетичних постійних магнітів.

Приступаючи до вивчення синхронних електроприводів, необхідно, перш за все, відзначити, що гілка синхронних електричних машин найбільш перспективна і найближчим часом обіцяє істотний технологічний стрибок. Такий стрибок уже стався в інформаційній частині електромеханічної системи (мікропроцесори, мікроконтролери, програмовані логічні інтегральні схеми). Також такий стрибок відбувся і в силовій напівпровідниковій частині електромеханічної системи (інтелектуальні, інтегральні модулі, силові елементи з новою технологією виготовлення).

В електромеханіці такий стрибок відбувається на шляху розвитку синхронних систем, тоді як інші системи, пов'язані з машинами постійного струму та асинхронними машинами з фазним ротором, слід визнати усталеними, що не обіцяють нових технологічних проривів.

Існує цілий ряд безконтактних синхронних машин, які мають покращені на порядок масогабаритні показники. Ці машини мають

абсолютно нову нетрадиційну конструкцію і дуже широкі можливості застосування.

У машинах магнітоелектричних поділ стосується скоріше способу управління, ніж принципу роботи. Обмотки статора машини можуть бути заживлені синусоїдальною напругою (струмом), квазісинусоїдальною напругою (струмом) (ШІМ за синусоїдальним законом) та імпульсною напругою (струмом).

Залежно від цього різняться:

1. Крокові двигуни. В них обмотки статора живляться імпульсною напругою (струмом). Від кожного імпульсу ротор двигуна здійснює крок – поворот на певний кут. Кроковий двигун – це вже синхронний двигун разом із напівпровідниковим перетворювачем. Його характеристики залежать від способу побудови та управління цього перетворювача. Крокові двигуни знайшли широке поширення в системах електроавтоматики, керованих по радіоканалу, а також у цифрових системах управління.

2. Безконтактні машини постійного струму (БМПС) і вентильні машини (ВМ) — це синхронний двигун у замкнутій системі, реалізований з використанням датчика положення ротора (ДПР), перетворювача координат (ПК) та силового напівпровідникового перетворювача (СНПП). Різниця між БМПС і ВМ полягає лише у способі формування напруги на виході силового напівпровідникового перетворювача.

У першому випадку формується імпульсна напруга (струм) на обмотках машини. У другому випадку на виході СНПП формується синусоїдальна або квазісинусоїдальна напруга (струм).

Слід зазначити, що БМПС відрізняються від крокових машин тим, що включені в замкнуту систему формування напруги. В них напруга формується залежно від положення ротора і це є їх важливою відмінністю від крокових двигунів, у яких положення ротора залежить від кількості керуючих імпульсів.

В окремому ряді синхронних машин стоять гістерезисні та реактивні двигуни. Ці машини рідко використовуються в електроприводі.

З усіх розглянутих типів синхронних машин в керованих системах найбільш перспективними вважаються вентильні машини.

Принцип керування вентильною машиною пояснює рис. 1.8. Датчик положення ротора (ДПР), перетворювач координат (ПК) і силовий напівпровідниковий перетворювач (СНПП) спільно формують на обмотках статора машини напруги  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  таким чином, щоб результуючий вектор напруги  $u_s$  завжди був зсунутий на певний кут і нерухомий відносно осі магнітного поля ротора. В цьому випадку результуючий вектор струму буде зсунутий і нерухомий відносно потоку ротора ( $\Phi_o$ ), що і створює момент на валу машини.

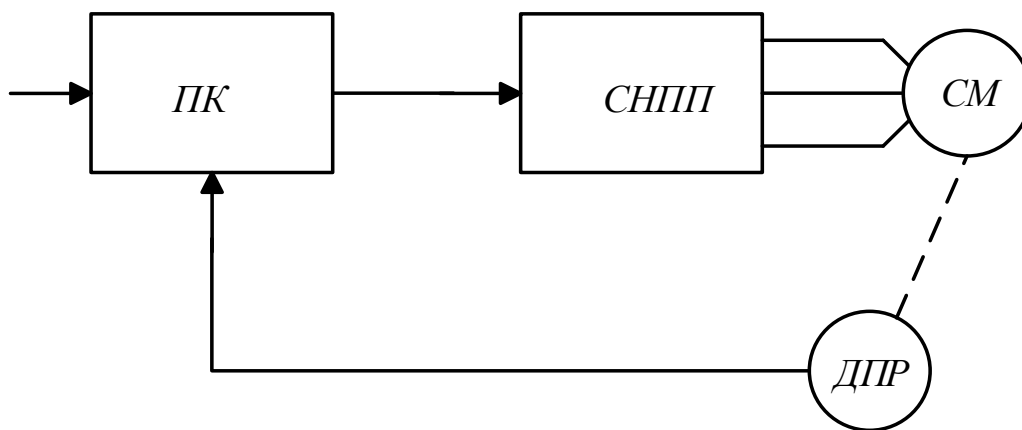


Рисунок 1.8 – Функціональна схема БМПС та ВМ

Провідними електротехнічними компаніями освоєно випуск вентильних електродвигунів для різних областей, зокрема аерокосмічної, транспортної, медичної, верстатобудівної, обчислювальної техніки тощо.

Створення та впровадження нового покоління електротехнічного обладнання на базі вентильних електродвигунів дозволить нашій продукції конкурувати на світовому ринку і насамперед у таких галузях як приводи для занурювальних насосів нафтових та водяних свердловин; гвинтових насосів для переміщення в'язких поточних середовищ з твердими речовинами та без

них; вантажопідіймального обладнання (крани, лебідки, ліфти тощо); допоміжних потреб електростанцій та комунального господарства; верстатобудування; міського транспорту та метро; літальних апаратів; індукторних електричних машин для вітро- та гідроенергетики. Однією з основних перешкод для широкого впровадження вентильних приводів в устаткуванні, де електродвигун віддалений від станції керування на значну відстань (наприклад, занурювальні електронасоси для видобутку нафти) або коли обладнання піддається значним механічним впливам вібраційного та ударного характеру, є наявність датчика положення ротора, що дає команду на підключення фаз електродвигуна, які створюють максимальний момент з полюсами ротора. Цей недолік, пов'язаний із необхідністю введення додаткових слабострумівих каналів управління, суттєво знижує інші переваги цього типу електродвигунів.

Електроприводи з вентильними двигунами (ВД) дозволяють отримати діапазон регулювання швидкості до 1:20 000 і смугу пропускання 100-150 Гц при значно більшій простоті і менших витратах порівняно з регульованими електроприводами з асинхронними двигунами.

Вентильний двигун забезпечує регулювання кутової швидкості вниз від номінальної шляхом зміни підведеної до статора напруги. Крім того, регулювати швидкість можна зміною струму в обмотці збудження і зміною кута випередження включення вентилів відносно фазних ЕРС двигуна (вгору від номінальної). Механічні характеристики ВД подібні до характеристик двигуна постійного струму.

Схема електроприводу з ВД (рис. 1.9) містить перетворювач із проміжною ланкою постійного струму UM та інвертор зі штучною комутацією UZ. Управління інвертором UZ проводиться у функції положення ротора двигуна M за допомогою датчика положення BQ, який впливає на систему управління інвертором AU1. Система управління випрямлячем AU1 впливає на керований випрямляч UM. Зміною одного з



кутів  $\alpha/3$  або струму збудження двигуна  $M$  можна регулювати кутову швидкість ВД. При побудові замкнутої системи управління ВД її виконують за принципом підпорядкованого регулювання з регуляторами струму  $AA$  та швидкості  $AR$ . Зворотні зв'язки побудовані за допомогою датчиків струму  $UA$  та швидкості  $BR$ , швидкість встановлюється задатчиком  $SR$ .

За техніко-економічними показниками електроприводи подач з ВД, що розвивають крутний момент 2-40 Н м, перевершують електроприводи з високомоментними двигунами, що отримують живлення від широтно-імпульсних перетворювачів.

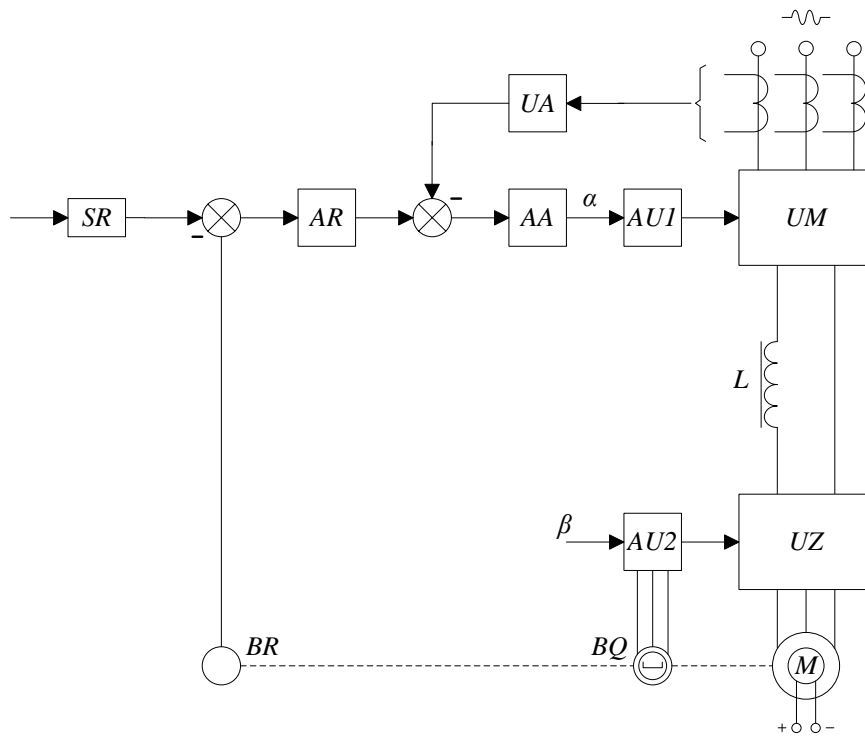


Рисунок 1.9 – Схема електроприводу з вентильним двигуном

Нові вентильні електродвигуни типу ДВФ розроблені для заміни існуючих колекторних машин постійного струму зі збереженням габаритних та приєднувальних розмірів. Вони мають значно більший ресурс та вищі енергетичні показники, менше споживання електроенергії, менший рівень шуму та електромагнітних перешкод.

Всі типи виконання двигунів 5ДВМ мають клас ізоляції Р, забезпечені датчиками температурного захисту (терморезистори в лобових частинах обмотки), мають вбудовані безконтактні тахогенератори і фотоелектричні датчики положення ротора за винятком двигуна 5ДВМ55, в якому відсутнє виконання з гальмом на магніто-чутливих мікросхемах, розташованих у задньому щиті електродвигуна. Показник надійності — середнє напрацювання на відмову — 10000 годин.

Середній рівень шуму в режимі холостого ходу не перевищує 82 дБ для двигунів 5ДВМ1 15 та 72 дБ – для менших габаритів.

У таблицях 1.3 та 1.4 представлені деякі технічні параметри вентильних двигунів пострадянського простору та найкращих зразків зарубіжних апаратів.

Таблиця 1.3 Основні характеристики вентильних двигунів 5ДВМ

Тип двигуна	Тривалий момент у стопорному режимі, Нм	Довжина,	Максимальна частота обертання,	Маса, кг
ДВМ55	0,05; 1,0	61	420; 1800	0,4
5ДВМ55	0,23; 0,47; 0,7; 1,3	218	2000; 3000; 4000; 6000	4,5
5ДВМ115	2,3; 3,5; 4,7; 7	342	2000; 3000; 4000; 6000	13,1
5ДВМ165	10; 13; 17; 23	536	1000; 2000; 3000; 4000	67
5ДВМ215	23; 35; 47; 70	637	1000; 2000; 3000; 4000	28

Таблиця 1.4 Основні характеристики вентильних двигунів 1FT 6 компанії Siemens

Тип двигуна	Тривалий момент у стопорному режимі, Нм	Довжина,	Максимальна частота обертання,	Маса, кг
1 FT6 75	1,0; 2,0	260	до 6000	4,4
1FT6 100	2,5; 5,0	280	до 6000	8,3
1FT6 130	4,0; 6,0; 9,5	305	до 6000	12,5
1FT6 165	8; 13; 20; 27	345	до 4500	25,5
1FT6 215	27; 50; 70	470	до 3000	55,5

Особливості двигунів серії 5ДВМ:

- 1) безколекторна машина, що не вимагає обслуговування, відсутність контактних кілець, що обертаються, і щіток;
- 2) збудження від постійних рідкісноземельних магнітів на роторі;
- 3) діапазон регулювання частоти обертання двигунів до (1:10000) з реверсуванням напрямку обертання;
- 4) містять вбудовані датчик швидкості (тахогенератор) та датчик положення ротора;
- 5) безлюфтове електромагнітне гальмо;
- 6) можливе постачання з вмонтованим фотоелектричним датчиком кутових переміщень;
- 7) експлуатація при будь-якому положенні осі обертання у просторі та впливі механічних факторів зовнішнього середовища;
- 8) найвищі динамічні та точнісні характеристики у складі електроприводів;
- 9) висока перевантажувальна здатність;
- 10) мінімальна маса та габарити.

## **2 РОЗРОБКА СХЕМИ СИЛОВОГО КАНАЛУ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕСОРА DSP56F805**

### **2.1 Структурна та функціональна схеми лабораторного комплексу**

Структурна схема лабораторного комплексу представлена на рис .

2.1. Лабораторний комплекс складається з наступних основних блоків:

- система керування;
- блок індикації;
- клавіатура;
- програматор;

- блок гальванічної розв'язки;
- силовий модуль;
- блок живлення.

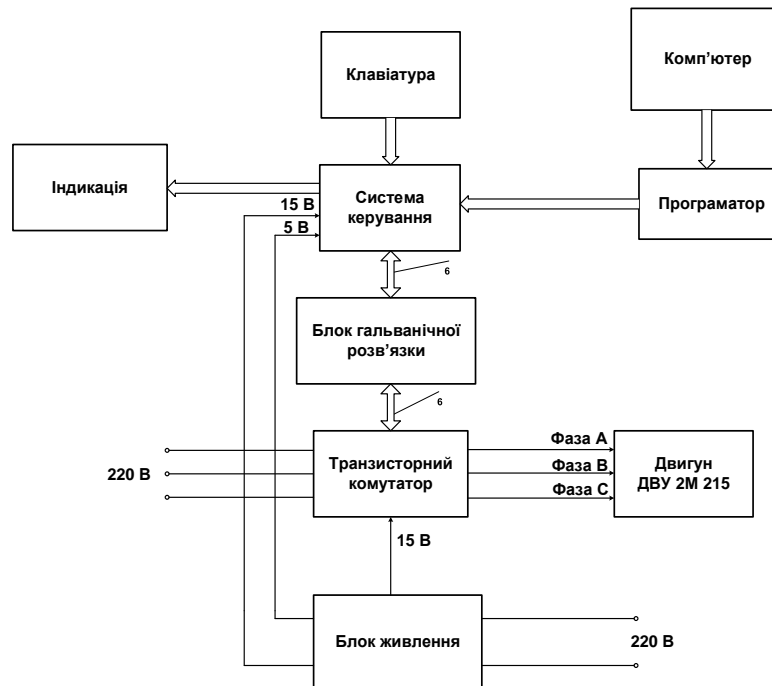


Рисунок 2.1 – Структурная схема лабораторного комплексу

На силовий модуль подається напруга живлення 220 В, далі випрямлена напруга подається на транзисторний комутатор. Силовий модуль сприймає імпульси системи керування через блок гальванічної розв'язки. Система управління програмується за допомогою комп'ютера через програматор. За допомогою блоків клавіатури та індикації здійснюється введення/виведення інформації та задання режимів роботи системи керування. Напруга (5, 15 В) подається на систему керування з блоку живлення.

Функціональна схема лабораторного комплексу представлена на рис. 2.2.

Модуль блоку живлення працює наступним чином. Напруга 220 В подається на згладжувальний фільтр, з якого згладжена напруга подається на діодний міст. З виходу діодного моста випрямлена напруга надходить на фільтр вищих гармонік. Після фільтра випрямлена напруга перетворюється в напругу імпульсної форми, яка подається на імпульсний трансформатор. На трьох вторинних обмотках трансформатора формуються напруги (5, 15, 15 В), які випрямляються і згладжується. Ці напруги подається на систему управління (5 і 15 В) і на модуль транзисторного комутатора (15 В).

Система керування складається з мікроконтролера DSP56F805 та інтерфейсу RS-232 на базі драйвера COM-порта MAX232, через який здійснюється програмування мікроконтролера DSP56F805.

## **2.2 Вибір елементної бази**

### **2.2.1 Вибір елементної бази системи керування**

На основі розробленої структурної схеми проводимо вибір елементної бази. Найбільш повно відповідає вимогам мікроконтролер компанії Motorola DSP 56F805.

Тип корпусу 144LQFP

Продуктивність - до 40 MIPS

Тактова частота - 80 МГц

Напруга живлення - 3,3 В

Струм споживання - 0,85 мА

Кількість виводів - 144

Габаритні розміри - 25\*25 мм

Маса – до 2 г

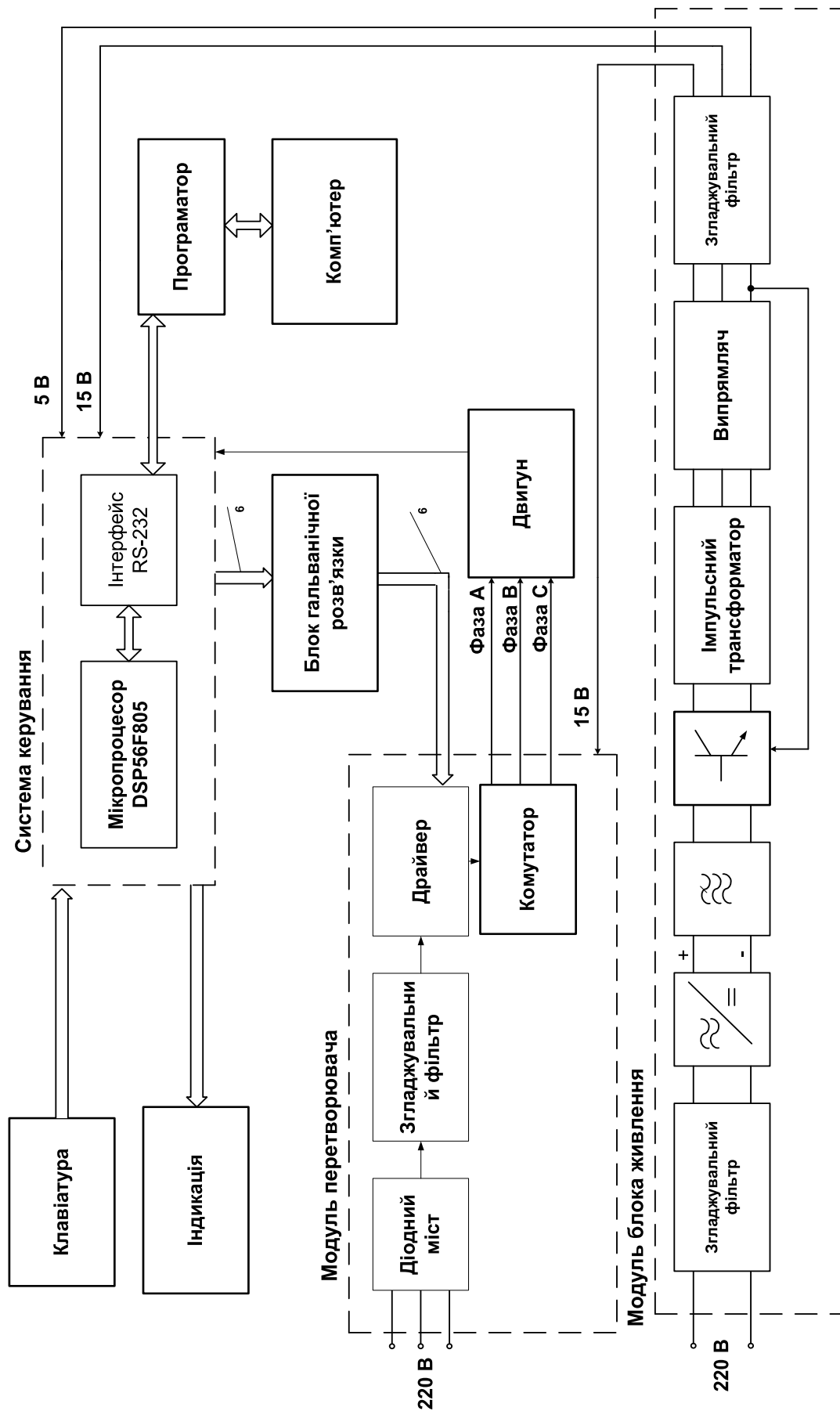


Рисунок 2.2 – Функціональна схема лабораторного комплексу

Пам'ять організована таким чином, що має два незалежні адресні простори (по 64К байт кожне) для розміщення коду програми та зберігання даних.

Пам'ять даних ОЗУ - 4 Кбайт

Пам'ять даних FLASH ПЗУ - 8 Кбайт

Пам'ять програм ОЗУ - 512 байт

Пам'ять програм FLASH ПЗУ - 32 байт

ПЗУзавантаження - 2 Кбайт

Крім вбудованої пам'яті мікроконтролер DSP56F805 дозволяє додатково підключити зовнішню пам'ять програм і даних. При цьому є можливість задавати різні режими конфігурації пам'яті (вся пам'ять зовнішня; або вся внутрішня пам'ять; або частина пам'яті зовнішня, а частина - внутрішня). Програма може виконуватися з блоків RAM пам'яті програм і з блоків FLASH.

Периферійні вузли, що входять до складу DSP56F805, дозволяють створювати різні проекти без використання додаткового мікроконтролера загального призначення.

Чотириканальний таймерний модуль (Quad Timer) являє собою сукупність чотирьох ідентичних 16-бітових таймерних груп, які можуть працювати узгоджено, наприклад, одночасно запускатися, або зчитуватися в один момент часу, або бути включеними каскадно. Кожна таймерна група містить визначник, власне лічильник/таймер, два компаратори і набір регістрів, що дозволяють використовувати лічильник у режимах порівняння та захоплення, задавати його коефіцієнт перерахунку. Крім зовнішнього рахункового входу лічильник може використовувати додатковий зовнішній сигнал для керування роздільною здатністю підрахунку імпульсів або для управління напрямом рахування. В останньому випадку лічильник може

використовуватися для дешифрації імпульсів квадратурних сигналів від датчиків положення.

Подвоєний модуль АЦП (Dual ADC module) містить два мультиплектори на 4 входи, два пристрої вибірки та зберігання та два 12-розрядні АЦП з мінімальним часом перетворення 1,2 мкс. Набір регістрів дозволяє одночасно зберігати результати перетворення восьми вимірів. Є можливість задавати послідовний або одночасний режим роботи двох АЦП. Незалежно від цього схемотехніка вхідних ланцюгів дозволяє кожен пару сусідніх аналогових входів розглядати або як два окремі сигнали, або як один диференціальний. Таким чином, можна задавати різні режими сканування аналогових входів, наприклад, здійснювати послідовну вибірку 8 аналогових сигналів або мати 4 диференціальних сигнали і за допомогою двох АЦП одночасно опитувати відразу два з них. Можливо також обробляти комбінації диференціальних і одиночних сигналів. Результат перетворення може бути представлений як число зі знаком або без знака та автоматично скоригованим шляхом віднімання заданого зміщення. Є можливість синхронізувати запуск АЦП з роботою модуля генерації керуючих ШІМ-сигналів.

Модуль ШІМ (PWM module) орієнтований на управління електродвигунами. Цей модуль здатний генерувати 6 незалежних ШІМ-сигналів або 3 пари комплементарних ШІМ-сигналів. В останньому випадку є можливість програмувати тривалість "мертвого часу" та задавати різні режими вставки інтервалів "мертвого часу" в залежності від стану вхідного сигналу, що відображає напрямок протікання струму у відповідній фазі. Все це допомагає наблизити форму напруги на навантаженні до синусоїдальної.

Дешифратор квадратурної імпульсної послідовності (Quadrature Decoder), яка може надходити з датчиків положення (наприклад, з датчиків Холла), має у своєму складі лічильник положення, лічильник



числа обертів та диференціальний лічильник. Останній містить код, пропорційний швидкості обертання. Дешифратор має у своєму складі вхідний фільтр імпульсних завад та спеціалізований сторожовий таймер, який дозволяє фіксувати факт зупинки двигуна.

Послідовний асинхронний інтерфейс (Serial Communication Interface) дозволяє виконувати обмін даними як у дуплексному, так і напівдуплексному режимі з використанням стандартного формату NRZ (старт-біт, 8 або 9 біт даних, біт паритету, стоп-біт(и)). Можливе програмування полярності приймача та передавача і черговості біт, що передаються. Визначник тактової частоти, що має 13 розрядів, забезпечує широкий діапазон швидкостей обміну. Вузол SCI може генерувати 8 різних переривань і виводити процесор з режимів пониженого енергоспоживання.

Послідовний периферійний інтерфейс (Serial Peripheral Interface) дозволяє здійснювати синхронний дуплексний послідовний обмін даними з використанням чотирьох стандартних SPI виводів. Вузол SPI може працювати в режимах Master та Slave, має роздільні буферні регістри на прийом та передачу. Кількість розрядів у посилці програмується і може становити від 2 до 16 біт. Максимальна частота обміну даними становить 20 МГц та 40 МГц у режимах Master та Slave відповідно.

Послідовний синхронний інтерфейс (Synchronous Serial Interface) є синхронним дуплексним портом, що дозволяє DSP зв'язуватися з іншими послідовними пристроями, включаючи стандартні промислові кодеки та інші процесори, оснащені вузлом SPI. SSI містить незалежні блоки передавача та приймача, які тактуються окремо, мають у своєму складі апаратні буфери FIFO (7x16 біт) на прийом та передачу та можуть програмуватися на обмін словами різної довжини (8, 10, 12, 16 біт). При роботі в мережевому режимі через порт SSI до DSP може бути

підключено до 32 послідовних пристроїв. Програмований визначник дозволяє обмінюватися даними на стандартних для промислових кодеків частотах. Зовнішній вигляд мікропроцесора DSP56F805 і розташування виводів представлений на рисунку 2.3.

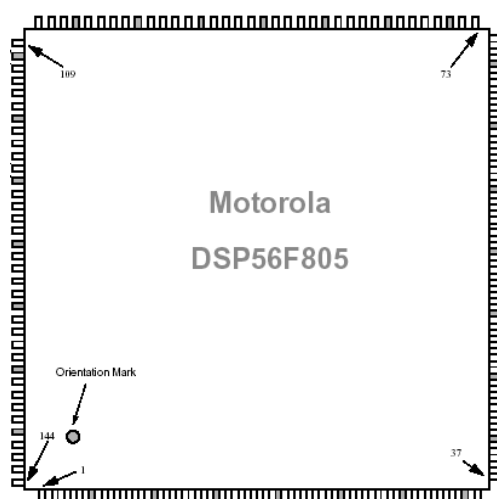


Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд мікроконтролера DSP56F805

Призначення виводів мікроконтролера подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Призначення виводів мікроконтролера DSP56F805

Номер вивода	Найменування сигналу	Номер вивода	Найменування сигналу
1	D10	73	ANA4
2	D11	74	ANA5
3	D12	75	ANA6
4	D13	76	ANA7
5	D14	77	XTAL
6	D15	78	EXTAL
7	A0	79	Vsso
8	Vdd	80	Vddo
9	PWM B0	81	Vdd
10	Vss	82	Vdd
11	PWM B1	83	Vss
12	A1	84	GPIO B0
13	PWM B2	85	PHASE A0
14	A2	86	GPIO B1
15	PWM B3	87	PHASE B0

16	A3	88	GPIO B2
17	A4	89	Vdd
18	A5	90	GPIO B3
19	PWM B4	91	Vss
20	A6	92	GPIO B4
21	PWM B5	93	INDEX0
22	A7	94	GPIO B5
23	ISB0	95	HOME0
24	A8	96	GPIO B6
25	ISB1	97	PWM A0
26	A9	98	GPIO B7
27	ISB2	99	PWM A1
28	A10	100	GPIO D0
29	FAULT B0	101	PWM A2
30	A11	102	GPIO D1
31	FAULT B1	103	PWM A3
32	A12	104	GPIO D2
33	A13	105	PWM A4
34	Vdd	106	PWM A5
35	PS	107	TXD0
36	DS	108	RXD0
37	A14	109	EXTBOOT
38	A15	110	RESET
39	Vss	111	DE
40	WR	112	CLK0
41	RD	113	TD0
42	IRQA	114	TD1
43	IRQB	115	Vdd
44	FAULT B2	116	TD2
45	TCS	117	Vss
46	FAULT B3	118	TD3
47	TCK	119	RSTO
48	TC0	120	SS
49	TMS	121	GPIO D3
50	TC1	122	MISO
51	TDI	123	GPIO D4

52	TXD1	124	MOSI
53	TDO	125	SCLK
54	TRST	126	VCAPS
55	VCAPS	127	GPIO D5
56	ISA0	128	D0
57	Vdd	129	VPP
58	ISA1	130	D1
60	ISA2	132	INDEX1
61	RXD1	133	Vdd
62	FAULT A0	134	PHASE B1
63	MSCAN_TX	135	Vss
64	FAULT A1	136	PHASE A1
65	MSCAN_RX	137	D3
66	FAULT A2	138	HOME1
67	FAULT A3	139	D4
68	VREF	140	D5
69	ANA0	141	D6
70	ANA1	142	D7
71	ANA2	143	D8
72	ANA3	144	D9

### 2.2.2 Вибір обладнання для інтерфейсного та силового модулів

Для керування IGBT-транзисторами в якості формувача імпульсів використовуємо драйвер IR2233 (рис. 2.4).

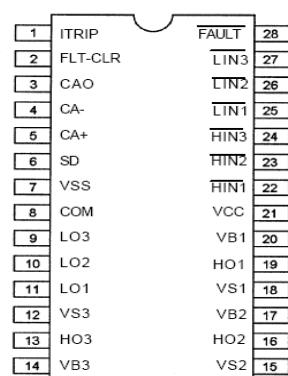


Рисунок 2.4 – Позначення виводів драйвера IR2233 в DIP корпусі  
Зазначений драйвер містить плаваючий канал, призначений для початкового завантаження; робочу напругу +600V або +1200V;

нечутливість до від'ємної перехідної напруги  $du/dt$ ; напруга на затворі від 10V/12V до 20V в усталеному режимі і до 25V при перехідних процесах; блокування для всіх каналів при пониженій напрузі; незалежні 3 напівмостові драйвери; узгоджений розподіл затримки для всіх каналів; 2.5V-сумісна логіка.

На рисунку 2.5 наведено функціональну схему драйвера IR2233.

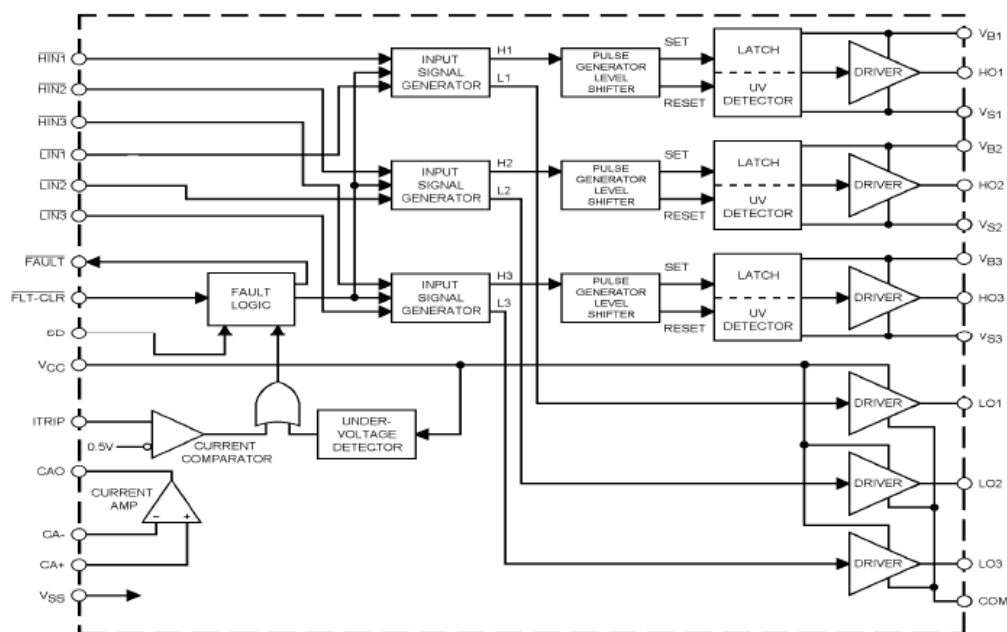


Рисунок 2.5 – Функціональна схема драйвера IR2233

Вказаний вибраний драйвер є високовольтним із формуванням імпульсів верхнього та нижнього плеча. Логічні вводи сумісні з CMOS чи LSTTL, включаючи 2.5V логіку. Незалежний операційний підсилювач забезпечує аналоговий зворотний зв'язок по струму через зовнішній шунтуючий резистор. Шунтуючий резистор знаходиться між ланцюгом гальмування та інвертором. Це дозволяє інвертору сприймати як робочий струм двигуна, так і струм гальмування. Сигнал помилки FAULT свідчить про зниження напруги, що призводить до відключення всіх шести каналів. Сигнал скидання помилки подається на вивід FLT-CLR.

У таблиці 2.2 наводиться призначення виводів мікросхеми драйвера.

Таблиця 2.2 Призначення виводів драйвера IR2233

Вивід	Опис виводів
HIN1,2,3	Логічні входи для виводів на затвори транзисторів верхнього плеча (HO1,2,3)
LIN1,2,3	Логічні входи для виводів на затвори транзисторів нижнього плеча (LO1,2,3)
FAULT	Вказує на блокування від перенапруги або пониженої напруги, від'ємна логіка.
VCC	Логічна та низькорівнева фіксована напруга.
ITRIP	Вхід для вимкнення перенапруги
FLT-CLR	Логічне введення для скидання помилки, від'ємна логіка
SD	Логічний вхід для вимкнення
CAO	Вивід підсилювача струму
CA-	Від'ємний вхід підсилювача струму
CA+	Додатний вхід підсилювача струму
VSS	Логічна земля
COM	Низькорівневий зворотній сигнал
VB1,2,3	Високорівнева напруга
HO1,2,3	Виходи на затвори транзисторів верхнього плеча
VS1,2,3	Зворотний сигнал високорівневої напруги
LO1,2,3	Виходи на затвори транзисторів нижнього плеча

На рисунку 2.6 наведено типову схему включення драйвера.

Typical Connection

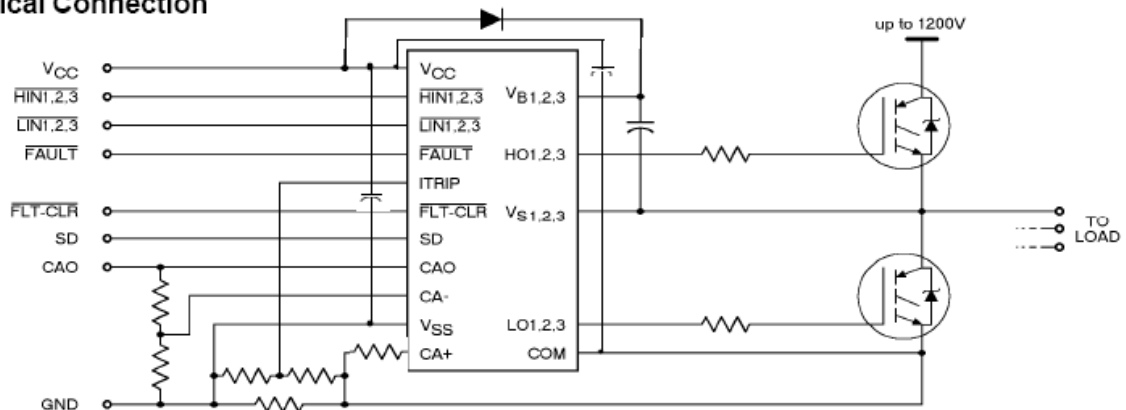


Рисунок 2.6 – Типова схема підключення драйвера

Для гальванічної розв'язки підібрані оптопари HCPL2630 (рис. 2.7). Це двоканальний оптрон, що містить світлодіод, який оптично з'єднаний з логічним вентилям фотодатчика зі стробованим виводом по схемі з відкритим колектором, який дозволяє застосувати монтажне АБО. Технічні параметри гарантуються при температурному діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Максимальний вхідний сигнал  $5\text{mA}$  забезпечує мінімальний вихідний  $13\text{mA}$ . Внутрішній шумовий екран допускає відхилення режиму на  $10\text{кВ/мкс}$ .

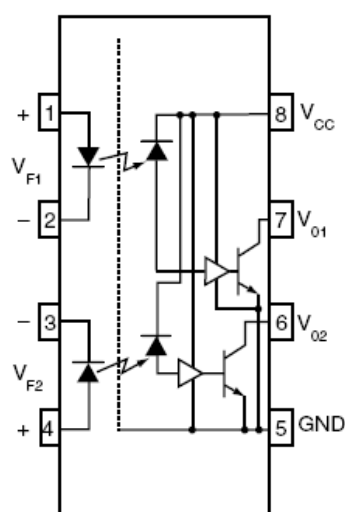


Рисунок 2.7 – Схематичне зображення оптрона HCPL2630

Для лабораторного стенда вибрано IGBT-транзистори IRG4PH40UD, максимально допустимі параметри яких наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Максимально допустимі параметри IGBT-транзистора IRG4PH40UD

Позн.	Параметр	Макс. знач	Од. вимір.
VCES	Напруга пробою колектор-емітер	1200	В
IC@TC =25°C	Тривалий струм колектора за температури корпусу 25°C	41	А

$I_{C@TC=100^{\circ}C}$	Тривалий струм колектора за температури корпусу $100^{\circ}C$	21	A
ICM	Імпульсний струм колектора	82	A
ILM	Граничний струм при індуктивному навантаженні	82	A
$I_F @ TC=100^{\circ}C$	Прямий тривалий струм діода	8,0	A
IFM	Максимальний прямий струм діода	130	A
VGE	Напруга затвор-емітер	$\pm 20$	A
$PD @ TC=25^{\circ}C$	Максимальна потужність, що розсіюється, при температурі $25^{\circ}C$	160	Вт
$PD @ TC=100^{\circ}C$	Максимальна потужність, що розсіюється, при температурі $100^{\circ}C$	65	Вт
TJ	Робоча температура кристала	від $-55$ до $+150$	$^{\circ}C$

### 2.2.3 Вибір двигуна

Для використання в лабораторному стенді розглянемо можливість застосування двигунів ДВУ165 і ДВУ215, які призначені для електроприводів подачі верстатів і роботів.

У комплект двигунів ДВУ165 і ДВУ215 входить комплект ПДФ-9 з датчиком положення та датчиком шляху типу LTSa-11c і безлюфтове гальмо типу НЗТБ. Технічні дані двигунів серії ДВУ наведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 Технічні дані двигунів серії ДВУ

Тип двигуна	$M_{d0}$ , Нм	$n_{max}$ , об/хв	$I_{d0}$ , А	Маса, кг	Момент інерції, $10^{-3}$ кг·м <sup>2</sup>
ДВУ165S	7	1500 2500	2,7 4,5	22,5	55



ДВУ165М	10	1000 2000	2,7 5,4	26,1	73
ДВУ165L	13	1000 2000	3,5 7	32,2	90
ДВУ215S	17	1000 2000	4,2 8,4	46,2	193
ДВУ215М	23	1000 2000	5,8 11,5	62,4	262
ДВУ215L	35	1000 2000	9,2 18,4	75,6	331

У перехідних режимах протягом 0,2 с двигуни забезпечують наступні перевантаження:

при  $n_{\max}$  - не менше  $2,5 M_{д0}$  ;

при  $0,5n_{\max}$  - не менше  $3,5 M_{д0}$  ;

при  $0,25 n_{\max}$  - не менше  $4 M_{д0}$  .

Двигуни допускають перевантаження струмом не менше  $5I_{д0}$  без розмагнічування. Розрахункова кратність пускового моменту - не менше 10 для двигунів ДВУ165 і не менше 15 для двигунів ДВУ215. Кратність максимального моменту – не менше 5.

Середні розрахункові прискорення з нормованим додатковим моментом інерції на валу двигунів наведено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 Середні розрахункові прискорення

Тип двигуна	Додатковий момент інерції, кг·м <sup>2</sup>	Середнє прискорення, рад/с <sup>2</sup>
ДВУ165S	0,006	3000
ДВУ165М	0,011	1800
ДВУ165L	0,015	1800
ДВУ215S	0,022	1700
ДВУ215М	0,032	1700
ДВУ215L	0,050	1400

У лобову частину обмотки статора вбудовуються терморезистори типу СТ14-2-145, що мають такі основні технічні дані;

Класифікаційна температура, °С ..... 130

Опір терморезистора при температурі на 5 °С нижче класифікаційної температури, Ом, не більше .....550

Опір терморезистора при температурі на 5 °С вище класифікаційної температури, Ом, не менше .....1330.

Двигуни виготовляють з числом полюсів, рівним 6, схема з'єднання статора обмотки - зірка з виведенням нульової точки. Кількість вивідних кінців: 4 - від обмотки статора; 2 - від терморезисторів; 2 - від гальма; 1-від заземлення.

Живлення двигунів повинно здійснюватися від напівпровідникового перетворювача з явно вираженою ланкою постійного струму напругою від 494 до 572 В.

## **2.3 Розробка силового модуля та системи управління ВД**

### **2.3.1 Розробка транзисторного комутатора**

Як зазначалося вище, у безконтактних вентильних двигунах (рис. 2.8) комутація обмоток здійснюється за сигналами датчика положення ротора, а збудження - постійними магнітами, що розташовуються на роторі.

Фази обмотки статора підключені до джерела постійного струму через силові ключі комутатора, керовані за сигналами датчика положення ротора.

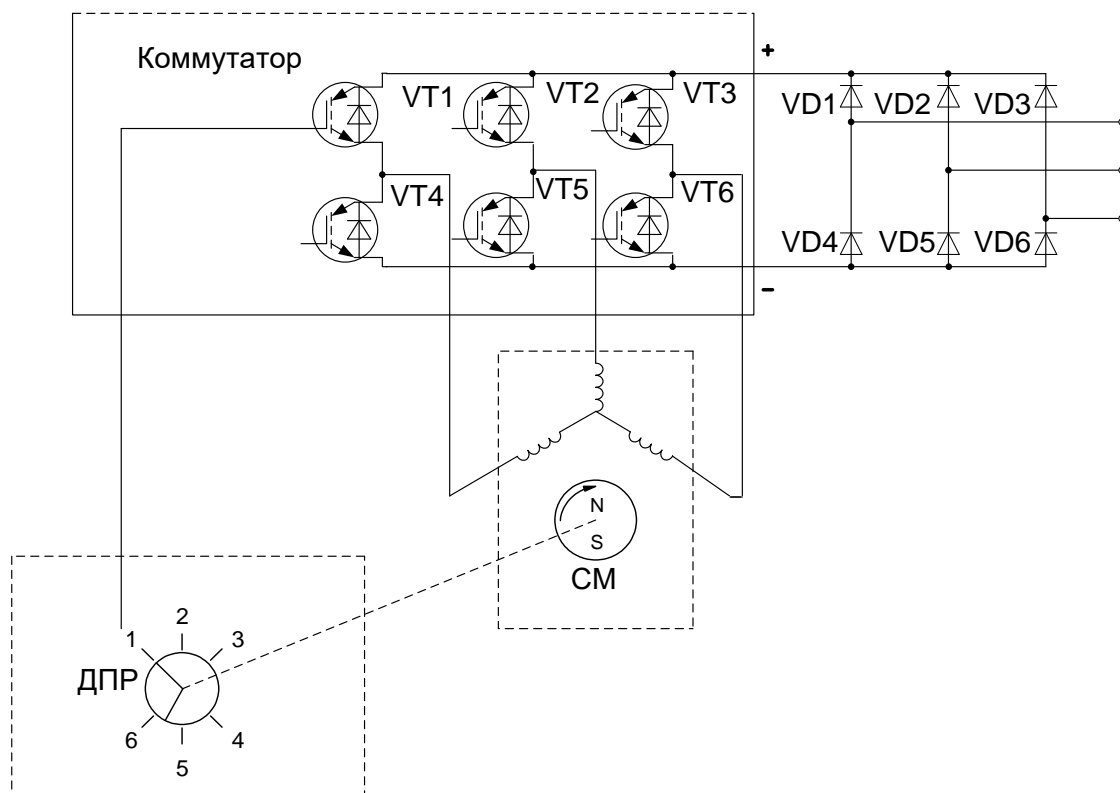


Рисунок 2.8 – Силовий канал ВД

У вентильних двигунах з постійними магнітами найбільшого поширення набула трифазна обмотка, з'єднана зіркою.

Чутливі елементи датчика 1-6 положення ротора при його обертанні здійснюють включення транзисторних ключів комутатора. Послідовно включені ключі 1 і 4, 2 і 5, 3 і 6 працюють у протифазі.

Таким чином, у будь-який момент часу працюють дві фази, а струм у фазах обмотки реверсується в моменти, коли ротор повертається на  $180^\circ$  щодо попереднього положення тієї ж фази і при заданій послідовності роботи ключів забезпечується односпрямований момент обертання двигуна.

Зміна напрямку обертання забезпечується шляхом перемикання вхідних ланцюгів силових ключів кожної стійки. Інший шлях реверсування двигуна полягає в перемиканні початку та кінця кожної фази. Як джерело живлення використовується мережа постійного струму, акумуляторна батарея, випрямляч.

Схема електрична принципова транзисторного комутатора представлена на рис. 2.9. Робота комутатора пояснюється так.

Інвертор зібраний на транзисторах із зворотними діодами VT2-VT8. Керуючі імпульси надходять на затвори транзисторів через струмообмежуючі опори R27, R30, R37 та R28, R31, R38. Високочастотні діоди VD7, VD10, VD14 і VD9, VD12, VD15, включені в зворотному напрямку, дозволяють скоротити час вимкнення транзисторів для обмеження їхнього нагріву.

Конденсатори C15-C19 разом з діодами VD3, VD8, VD11 утворюють "плаваюче" джерело живлення, суть роботи якого полягає в наступному.

Поки відкритий транзистор нижнього плеча, вихідна лінія даної фази приєднана до "0" і напруга живлення драйвера (15 В) через діод відповідної фази (VD3, VD8, VD11) заряджає паралельно включені ємності (C14-C15, C16-C17).

Коли транзистор нижнього плеча даної фази закривається накопичена на обкладках конденсатора напруга надходить на затвор верхнього плеча, що забезпечує відкриття транзистора верхнього плеча за наявності імпульсу управління.

Роботу "плаваючого" джерела забезпечує драйвер DD1 (лінії VB1, HD1, VS1, VB2, HD2, VS2, VB3, HD3, VS3). Драйвер DD1 також перетворює логічні сигнали від МСУ необхідні для управління транзистором сигнали. Він також забезпечує захист шляхом відключення транзисторів в аварійних ситуаціях. Драйвер контролює сумарне значення струму у фазах (резистори R25, R26, R29) і рівень напруги живлення.

При аварії драйвер відключає силові транзистори та посилає сигнал FAULT на процесор. Через заданий час МСУ дає команду "Скидання" по лінії FLT-CLR.

Конденсатори C11-C13 є фільтрами живлення драйвера. Транзисторна збірка R21 "підтягує" рівень напруги на лініях керування драйвера до логічної одиниці.

Реле K1 служить для управління зарядним ланцюгом електролітичних конденсаторів C1, C2, C6, C8 шляхом шунтування струмообмежувальних резисторів R3 - R6 . Реле K2 дозволяє керувати зовнішніми пускачами.

### **2.3.2 Розробка принципової електричної схеми системи управління**

При розробці принципової електричної схеми системи управління була використана технічна документація по мікроконтролеру DSP56F805 компанії Motorola з цільових плат (Evaluation Board) для кожного процесора сімейства DSP56F80x.

Проаналізувавши схемні рішення, запропоновані компанією Motorola, було розроблено принципову електричну схему, яка більш повно відповідає нашим вимогам.

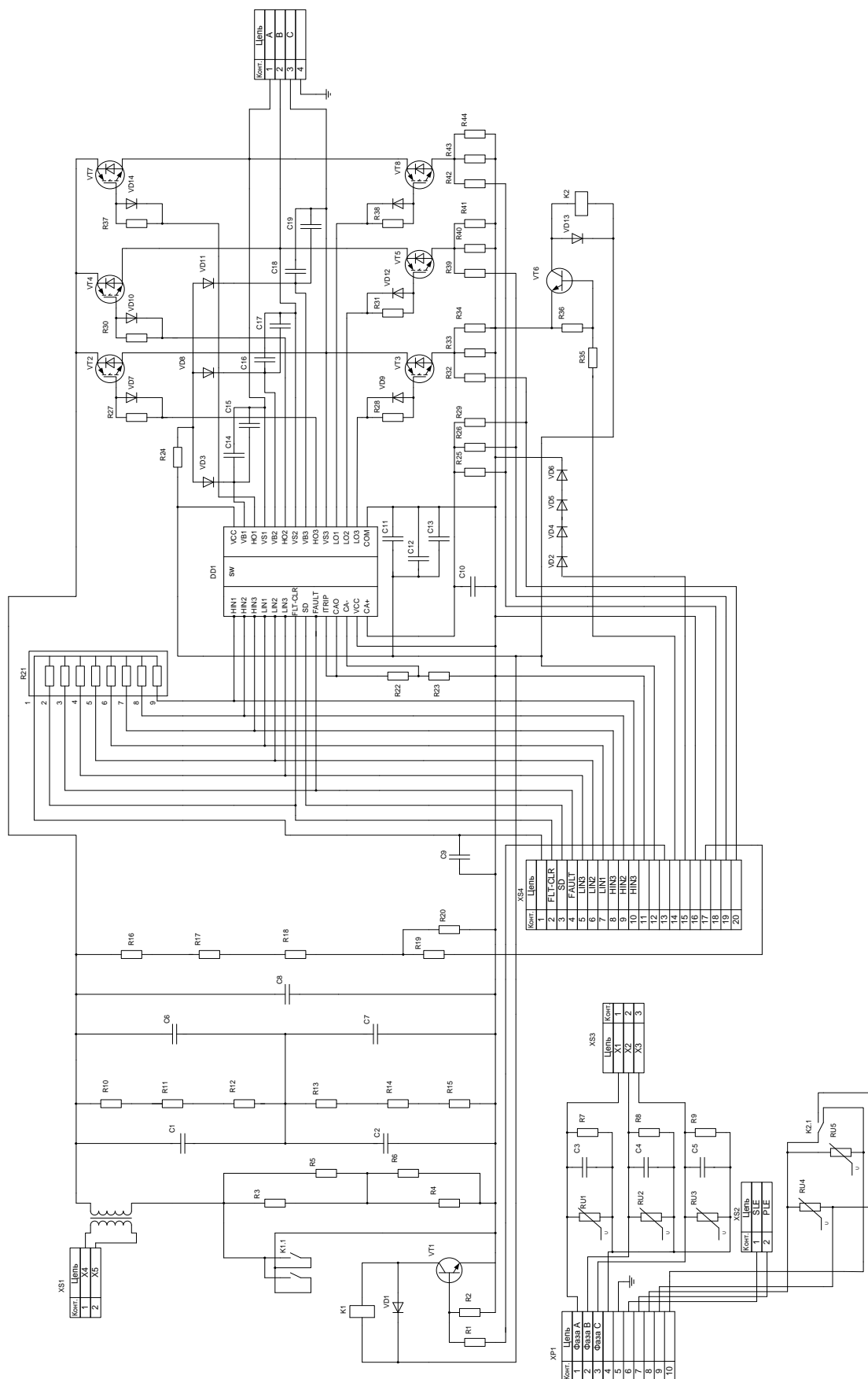


Рисунок 2.9 – Принципова електрична схема силового модуля перетворювача частоти

Основні вимоги, які висувалися розробки принципової електричної схеми:

- 1) простота при виготовленні готового виробу;
- 2) нескладне управління;
- 3) простота в обслуговуванні;
- 4) можливість подальшого вдосконалення.

Розроблена принципова електрична схема системи управління представлена рисунку 2.10. По розробленій принциповій електричній схемі видно, що для забезпечення роботи мікроконтролера потрібно мінімальна кількість додаткових елементів (кварц, резистори, конденсатори). Для забезпечення нормальної роботи та управління, а також для можливості подальшого удосконалення системи управління у схемі встановлено 16 роз'ємів. Призначення роз'ємів:

- 1) XS1, XS2 шини адреси та даних служать для підключення додаткової зовнішньої пам'яті;
- 2) XS3, XS4 входи квадратурного декодера (лічильник імпульсів) служать для підключення датчиків швидкості;
- 3) XS5, XS6 виходи сигналів ШІМ-генератора на керування інвертором;
- 4) XS8 роз'єм входу аналогових сигналів, що служить для підключення різних датчиків;
- 5) XS10, XS12 роз'єми портів введення/виводу;
- 6) XS13 синхронний послідовний порт для підключення зовнішніх пристроїв;
- 7) XS14 роз'єм JTAG призначений для програмування мікроконтролера;
- 8) XS15 на роз'єм виведені сигнали керування мікроконтролером;
- 9) XS16 роз'єм живлення.

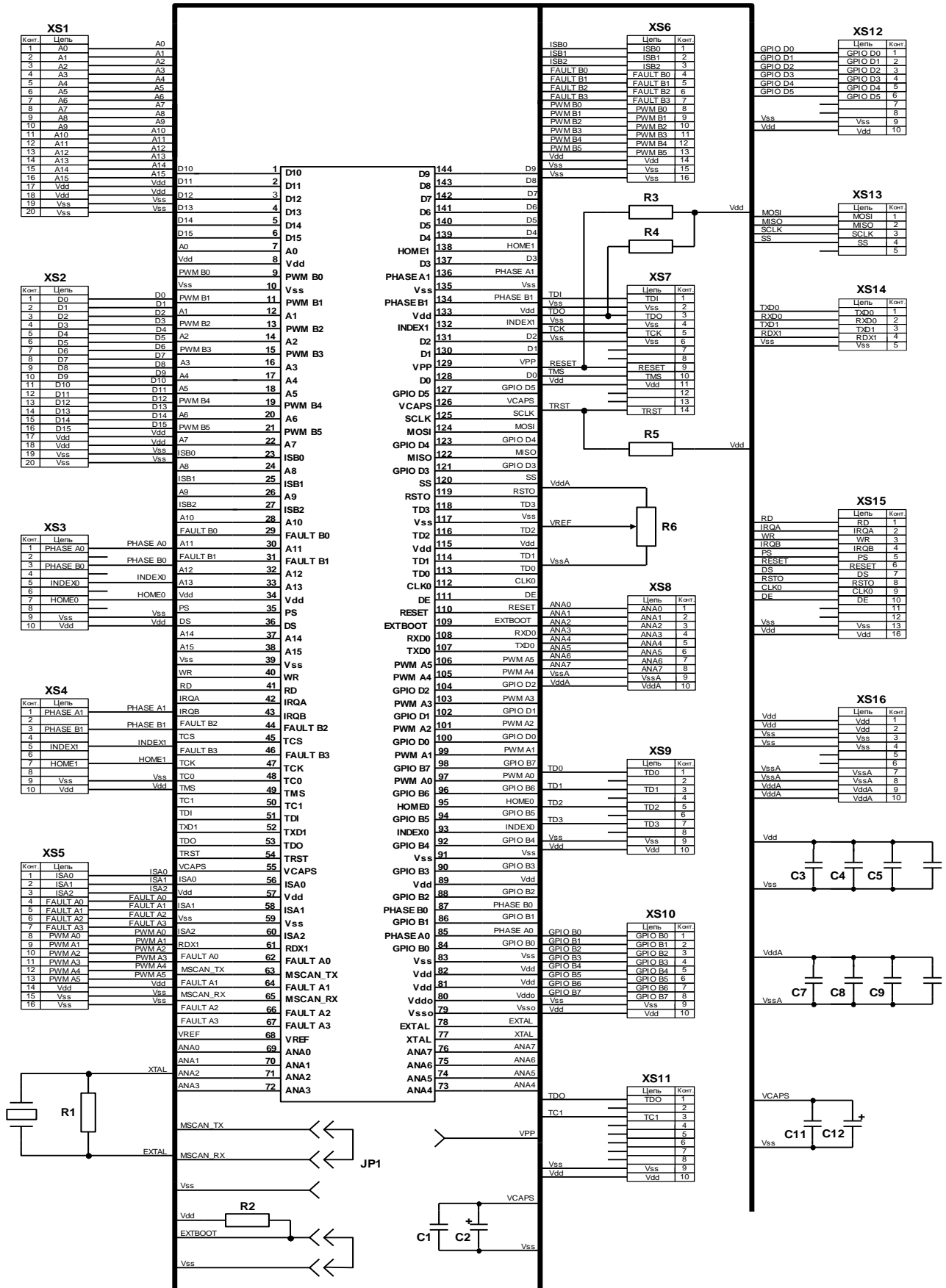


Рисунок 2.10 – Принципова електрична схема системи управління



## **2.4 Розробка принципової електричної схеми блока живлення**

### **2.4.1 Опис роботи блоку живлення**

Імпульсні мережеві блоки живлення використовуються в даному лабораторному комплексі, який живиться від мережі змінного струму, для отримання напруги змінного і постійного струму, необхідних для живлення різних вузлів. Ці блоки живлення відрізняються від традиційних меншою матеріаломісткістю (у 2-3 рази), більшою питомою потужністю, високим ККД (до 80-85%), що обумовлено відсутністю трансформатора живлення, який працює на частоті 50 Гц, та використанням імпульсних стабілізаторів вторинної напруги замість компенсаційних безперервного дії.

На модуль живлення (рис.2.11) подається напруга живлення 220 В через роз'єм XS1. Захист від короткого замикання здійснюється запобіжником FU1, згладжування напруги живлення відбувається за допомогою дроселя L1 і конденсаторів C1, C2. Після цього згладжена напруга подається на діодний міст VD1 де випрямляється з послідовним згладжуванням за допомогою конденсатора C3 та стабілізацією стабілітроном VD2. Після цього напруга надходить на імпульсний трансформатор TV1, який керується мікросхемою DA1.

З трансформатора TV1 виходять три напруги імпульсної форми, які випрямляються діодами VD5, VD6, VD7, після чого згладжуються конденсаторами C7-C9 і дроселями L2-L4. Також відбувається корекція вихідної напруги 5 В за допомогою зворотного зв'язку. Зворотний зв'язок здійснено на основі оптрона U1, за допомогою якого керується мікросхема DA1. Вихідна напруга 5 В стабілізується за допомогою керованого стабілітрона VD8 і конденсаторів C12 і C13. Стабілізована напруга 5 В подається на роз'єм XS2 (1-контакт) і на XP1 (40-контакт), які служать для живлення плати системи управління. З дроселя L2 випрямлена напруга 15 В подається на роз'єм XS2 (12-контакт), яка

подається на силовий модуль для живлення драйвера IR2233. З дроселя L3 випрямлена напруга 15 В подається на роз'єм XP1 (1, 2-контакт), яка подається на СУ.

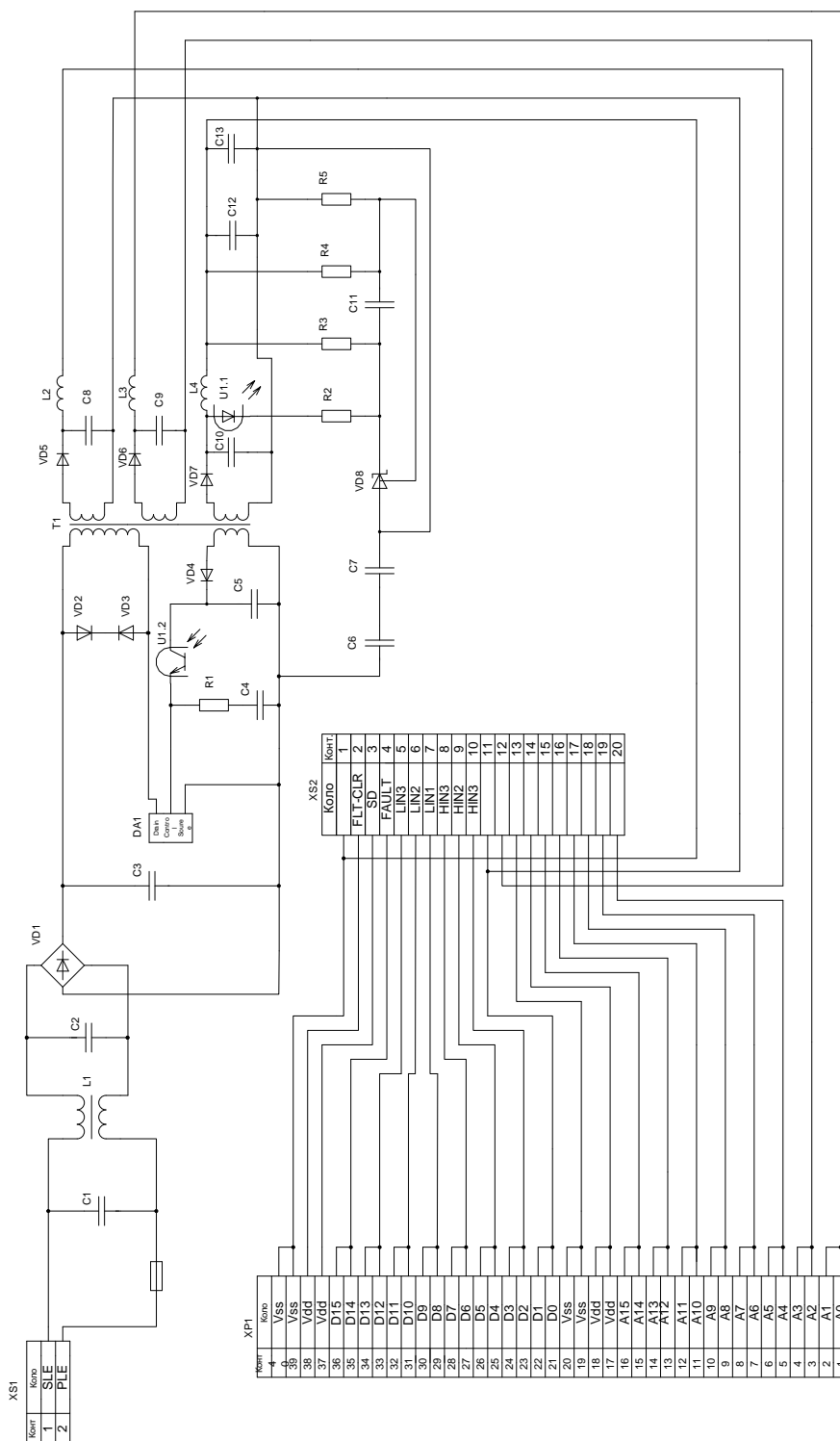


Рисунок 2.11 Принципова електрична схема модуля живлення

## 3 ОПИС І ЗАСОБИ ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРА DSP56F805

### 3.1 Основні характеристики та відомості про цифровий сигнальний процесор DSP56F805

Проведений аналіз існуючої елементної бази показує, що для реалізації лабораторного стенда підходить мікроконтролер компанії Motorola DSP 56F805.

Процесор DSP56F805 із сімейства процесорів 56800, добре підходить для багатьох додатків, включаючи керування великою кількістю периферійних пристроїв. Мікроконтролер DSP56F805 заснований на архітектурі Harvard-style, що складається з трьох модулів, які працюють паралельно. Вони дозволяють обробляти шість операцій у циклі команди.

*Основні характеристики мікроконтролера DSP56F805.* Основна частота роботи процесора 80MHz, тобто до 40 MIPS за секунду. Використовуються функціональні можливості системи керування DSP56F805 C-efficient architecture. Апаратні засоби дозволяють здійснювати DO та REP цикли. Використовується MCU-система команд. Контролер функцій може реалізовувати 14 способів адресації:

31.5K × 16-bit words для Flash Програми (64КБ)

512×16-bit words для оперативної пам'яті Програми (1КБ).

4КБ ×16-bit words для Flash Даних (8КБ).

Понад 64K × 16-bit words (128КБ) для кожної із зовнішніх програм та для пам'яті даних.

У контролері реалізовано:

- два PWM-модулі з 6 каналами;
- два 12-розрядні аналого-цифрові перетворювачі з 4 каналами;
- два декодери квадратури;
- два послідовні інтерфейси зв'язку (SCIs);

- послідовний периферійний інтерфейс (SPI);
- JTAG-порт для налагодження програми.

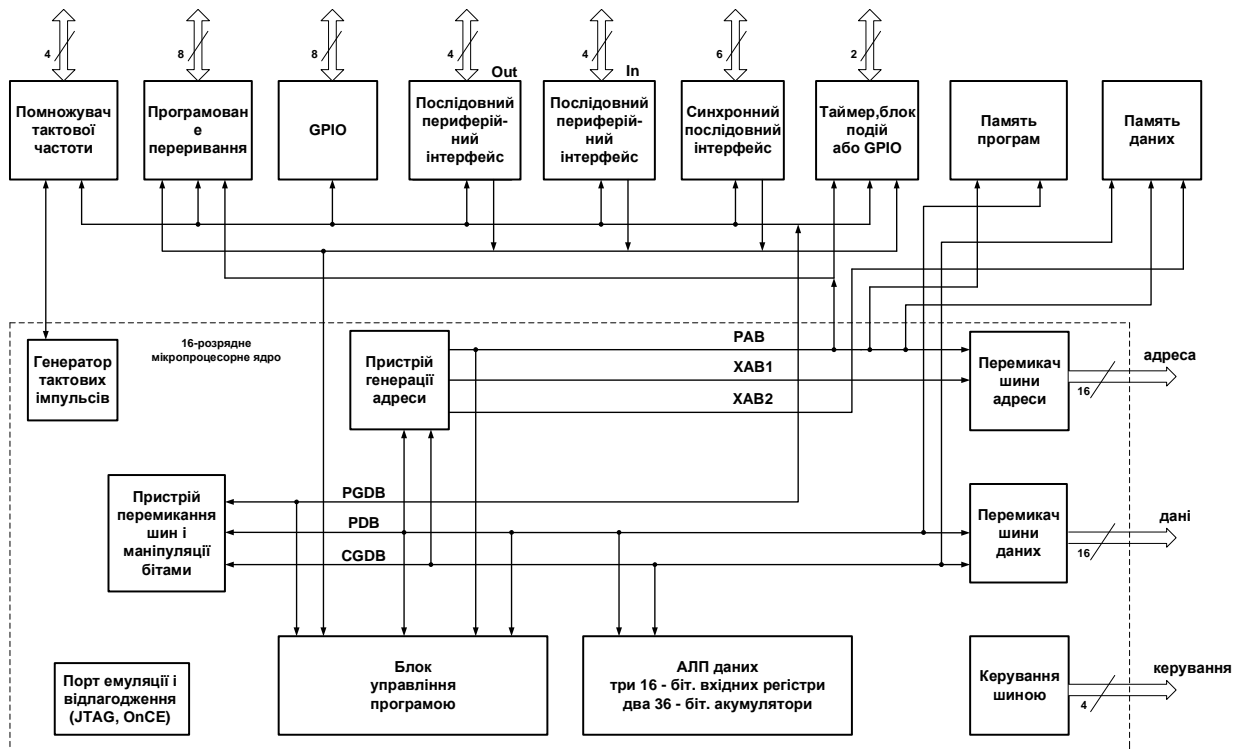


Рисунок 3.1 – Структурна схема мікроконтролера DSP56F805 (спрощена)

*Периферійні блоки процесора DSP56F805.* Два блоки модулятора ширини імпульсу, кожен із 6 PWM виводами. Два 12-розрядні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), які підтримують два одночасні перетворення. АЦП та PWM модулі можуть бути синхронізовані.

Є також два декодери квадратури, кожен з чотирма вводами, або двома додатковими Quad Timers, два універсальних Quad Timers з шістьма виводами, CAN 2.0 B, модуль з портом з двома pin для передачі та прийому, два послідовних інтерфейсу зв'язку, кожен з двома pin. Послідовний периферійний інтерфейс (SPI) з конфігурацією портів, що перелаштовуються. Програмне забезпечення блокує цикл основного генератора частоти для годинника ядра контролера.

*Характеристики виводів системи цифрового управління.* Тригер Schmitt розташований на вводах: EXTBOOT, IRQA, IRQB, Reset, ISA0-2, FAULTA0-3, ISB0-2, FAULT0B-3, TCS, TCK, TRST, TMS, TDI, та MSCAN\_RX. Аналогові вводи: ANA [0:7], XTAL та EXTAL. PWM вивід відображає вихідний потік, вимірний на 50% під час циклу роботи. Запускається та працює IDD на частоті 8MHz. Конденсатори 50pF розташовані на виводах XTAL, а на EXTAL по 20pF. Існують також переривання, які контролюють зовнішнє електроживлення (напруги VDDA). VDDA під'єднується до того ж потенціалу, що і VDD. Якщо напруга на VDDA нижче або вища від VEIO, то здійснюється переривання і генерується сигнал на корекцію.

Низька напруга контролює внутрішнє переривання, яке регулює основне електроживлення (нижня межа становить 3 В). Power-on скидається, коли внутрішньо регульована напруга 2.5 В знижується нижче 1.5 В. Поки внутрішня напруга нижче 1.5 В, і потужність знижується, цей сигнал залишається активним, незалежно від того через скільки пілкоподібний сигнал буде піднятий. Регульована напруга в основному на 100mV, менше ніж VDD, протягом пілкоподібного сигналу, поки напруга не досягне 2.5 В.

## **3.2 Програмування системи керування ВД**

### **3.2.1 Загальні відомості про систему команд мікропроцесора DSP56F805**

Оптимізована система команд дозволяє реалізувати пряме програмування стиснення кодів для обох додатків MCU і DSP. Система команд також є високоефективною для компіляторів C++. У мікропроцесорі DSP56F805 виконання службових програм здійснюється від внутрішніх чи зовнішніх блоків пам'яті. Передбачена можливість перезапису флеш-пам'яті початкового завантаження.

Ключові специфічні особливості мікропроцесора DSP56F805 включає два модулятори ширини імпульсу (PWM). Ці модулі мають три додаткових, індивідуально програмованих виведення сигналу PWM.

Кожен модуль може підтримувати шість незалежних функцій PWM, загальна кількість функцій 12 PWM виводів. Додаткова функція у цьому процесорі дозволяє програмувати dead time. Лічильник значень програмується, щоб підтримати частоту, що безперервно змінюється PWM.

Мікропроцесор DSP56F805 має два окремі декодери квадратури, здатні до фіксації всіх чотирьох переходів на двофазні вводи, пропорційні фактичній позиції. JTAG/OnCE порт використовується для програмування мікропроцесора DSP56F805.

Таблиця 3.1 Сигнали JTAG/OnCE порту

No. of Pins	Signal Name	Signal Type	State During Reset	Signal Description
1	TCK	Input (Schmitt)	Input, pulled low internally	<b>Test Clock Input</b> —This input pin provides a gated clock to synchronize the test logic and shift serial data to the JTAG/OnCE port. The pin is connected internally to a pull-down resistor.
1	TMS	Input (Schmitt)	Input, pulled high internally	<b>Test Mode Select Input</b> —This input pin is used to sequence the JTAG TAP controller's state machine. It is sampled on the rising edge of TCK and has an on-chip pull-up resistor.
1	TDI	Input (Schmitt)	Input, pulled high internally	<b>Test Data Input</b> —This input pin provides a serial input data stream to the JTAG/OnCE port. It is sampled on the rising edge of TCK and has an on-chip pull-up resistor.
1	TDO	Output	Tri-stated	<b>Test Data Output</b> —This tri-statable output pin provides a serial output data stream from the JTAG/OnCE port. It is driven in the Shift-IR and Shift-DR controller states, and changes on the falling edge of TCK.
1	$\overline{\text{TRST}}$	Input (Schmitt)	Input, pulled high internally	<b>Test Reset</b> —As an input, a low signal on this pin provides a reset signal to the JTAG TAP controller. To ensure complete hardware reset, $\overline{\text{TRST}}$ should be asserted at power-up and whenever $\overline{\text{RESET}}$ is asserted. The only exception occurs in a debugging environment when a hardware device reset is required and it is necessary not to reset the OnCE/JTAG module. In this case, assert $\overline{\text{RESET}}$ , but do not assert $\overline{\text{TRST}}$ .
1	$\overline{\text{DE}}$	Output	Output	<b>Debug Event</b> — $\overline{\text{DE}}$ provides a low pulse on recognized debug events.

Ця лінійка процесорів дозволяє безпосередньо керувати стандартними оптопарами. Блок широтно-імпульсної модуляції (PWM) дозволяє виправляти спотворення форми хвилі. Кожен PWM модуль має подвійну буферизацію і містить засіб управління перериваннями, що

дозволяє реалізовувати перезавантаження. PWM-модулі забезпечують синхронізацію аналого-цифрових перетворювачів.

DSP56F805 забезпечує можливість обчислення положення, швидкого та повільного обертання валу. Інтегрований таймер у декодері квадратури (Quadrature Decoder) може бути запрограмований із значенням блокування часу, коли вал не обертається.

Кожен вхідний сигнал фільтрується, щоб визначити лише дійсні переміщення. Цей контролер також забезпечує повний набір стандартних функцій для програмування периферійних пристроїв і містить два послідовні інтерфейсу зв'язку (SCI), один послідовний периферійний інтерфейс (SPI), та чотири таймери четвірки (Quad Timers).

Кожен із цих інтерфейсів може використовуватися для універсального введення/виведення (GPIOs).

### **3.2.2 Програмні засоби програмування**

Інтегроване середовище обробки програмного коду Code Warrior - це інструмент для програмування, до якого входять набір модулів (EVMs) та систем розробки програм. У Code Warrior відбувається компілювання та налагодження програми. Вікно середовища програмування та налагодження програми для мікропроцесорів представлено рисунку 3.2.

Code Warrior включає інтегроване середовище для створення проекту, асемблер, оптимізований компілятор C/C++, компоувальник; дозволяє налагоджувати програму як на рівні програмного коду, так і в графічному режимі, має зручний інтерфейс користувача і засоби для зв'язку з цільовою платою через LPT-порт за JTAG-інтерфейсом для завантаження і налагодження програми в робочій системі.

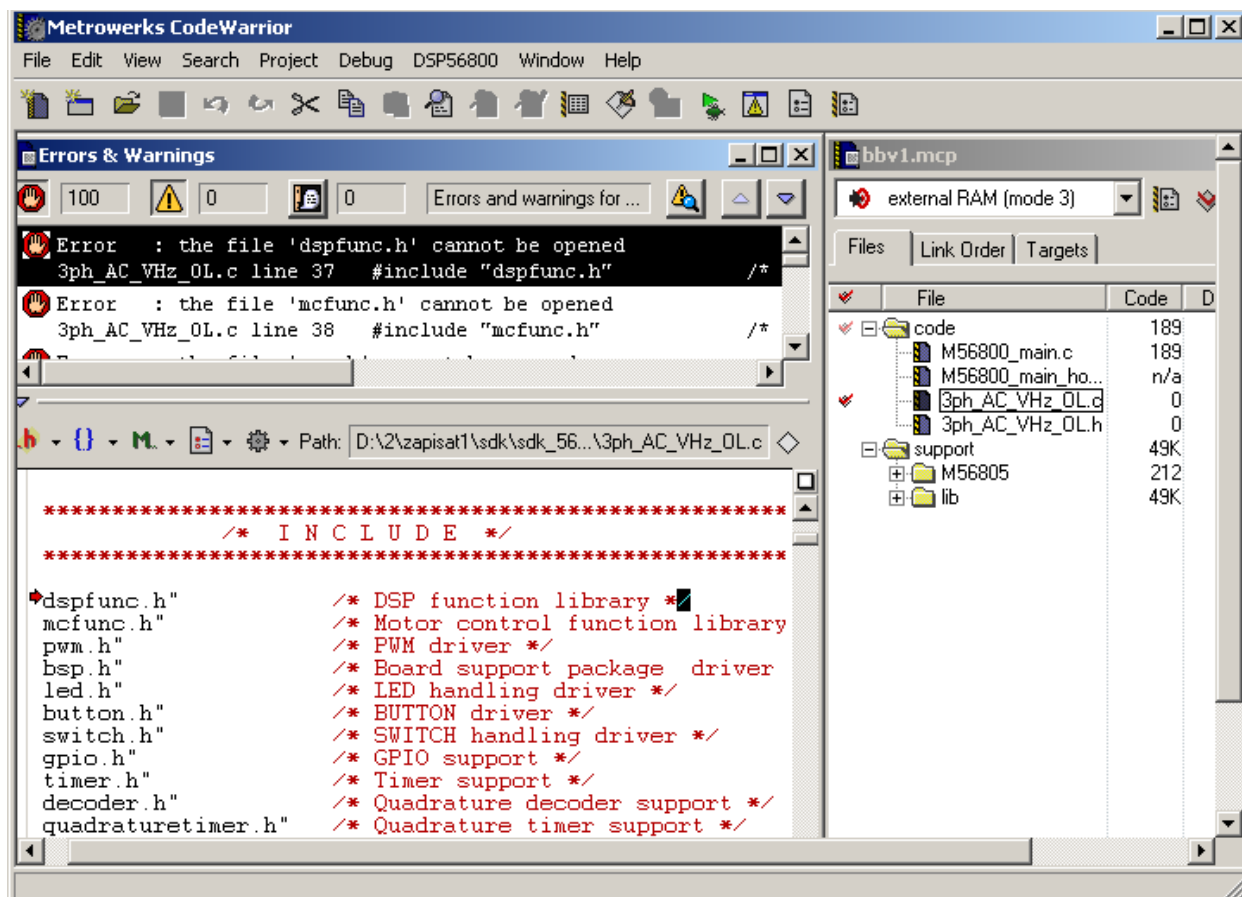


Рисунок 3.2 – Вікно середовища програмування Code Warrior

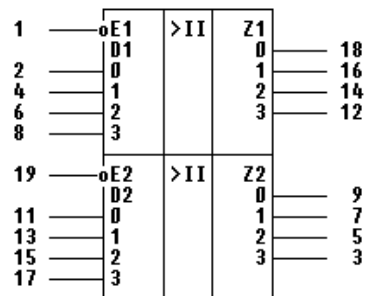
Для роботи з CodeWarrior розроблено бібліотеку Embedded Software Development Kit (SDK), яка крім драйверів периферійних пристроїв та численних математичних функцій містить бібліотеки DSP-підпрограм, модемних функцій (V8bis, V22bis, V42bis), телефонних функцій (DTMF, CPT, G.165, G711, G7.26 та ін), функцій шифрування (DES, 3DES), підпрограм управління двигунами тощо.

### 3.2.3 Розробка апаратних засобів для програмування мікропроцесора DSP56F805

Програматор підключається до порту LPT. З 2-pin LPT порту сигнал через резистор R1 подається на мікросхему DD1 (74HC244N – драйвер), розташування виводів якого представлено на рисунку 3.3, призначення виводів представлено в таблиці 3.2.



З драйвера посилений сигнал P Reset (18-pin) подається на основу транзистора VT1. З колектора транзистора знімається інвертований сигнал P Reset, який надходить на роз'єм XS1 (висновок 9). Живлення на транзистор подається з роз'ємом XS1 (pin-11). Інші сигнали з LPT порту аналогічно першому, через резистори R2-R7, що гасять, подаються на драйвер. З виходу мікросхеми посилені сигнали подаються XS1 (pin 1-14).



Малюнок 3.3 – Розміщення виводів мікросхеми 74HC244N

Таблиця 3.2 Призначення виводів мікросхеми 74HC244N

№ вив.	Назначение	№ вив.	Назначение
1	Вход разрешения передачи информации	11	Вход 0 разряда
2	Вход 0 разряда	12	Выход 3 разряда
3	Выход 3 разряда	13	Вход 1 разряда
4	Вход 1 разряда	14	Выход 2 разряда
5	Выход 2 разряда	15	Вход 2 разряда
6	Вход 2 разряда	16	Выход 1 разряда
7	Выход 1 разряда	17	Вход 3 разряда
8	Вход 3 разряда	18	Выход 0 разряда
9	Выход 0 разряда	19	Вход разрешения передачи информации
10	Общий	20	Ucc

Принципова електрична схема програматора представлена на рисунку 3.4.

### 3.3 Алгоритм роботи системи керування

Після подачі живлення на мікропроцесор відбувається ініціалізація всіх блоків процесора АЦП, ШІМ, портів вводу /виводу.

Запуск мікропроцесора в роботу здійснюється подачею команди RUN (Пуск). Якщо команда не пройшла, то система керування залишається в режимі очікування. Після запуску системи керування ми задаємо частоту, яку хочемо отримати на виході інвертора.

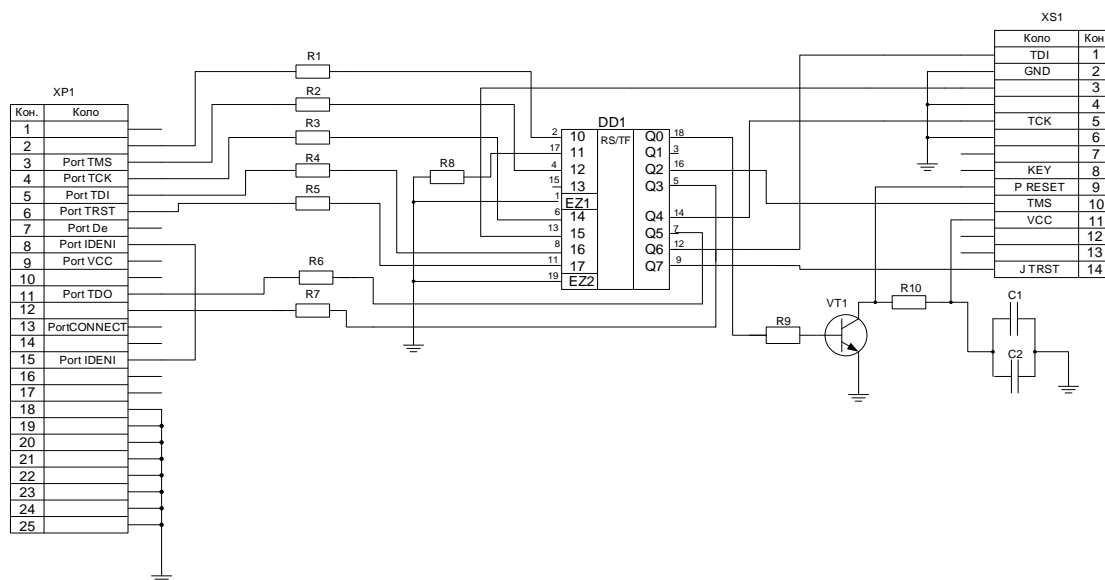


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема програматора

Задання частоти контролюється виведенням сигналів на індикатор. Наступна дія - це розрахунок напруги за характеристикою  $U/f$ . Напряга розраховується для такої величини, щоб відношення  $U/f - \text{const}$ .

Після розрахунку напруги проводиться масштабування для отримання поточної амплітуди. Масштабування проводиться із періодом 25 мс. Потім проводиться вимірювання всіх параметрів температури, напруги, струму та їх відповідності допустимим параметрам. При невідповідності хоча б одного з параметрів, відбувається видача помилки після чого відключається ШІМ-генератор.

Якщо всі параметри в нормі проводиться остаточний розрахунок напруги з урахуванням пульсацій у ланці постійного струму. Остання операція – це запис усіх даних у ШІМ, після чого процес протікає циклічно до подачі команди "Стоп".

Структура алгоритму роботи системи керування представлена на рисунку 3.5.

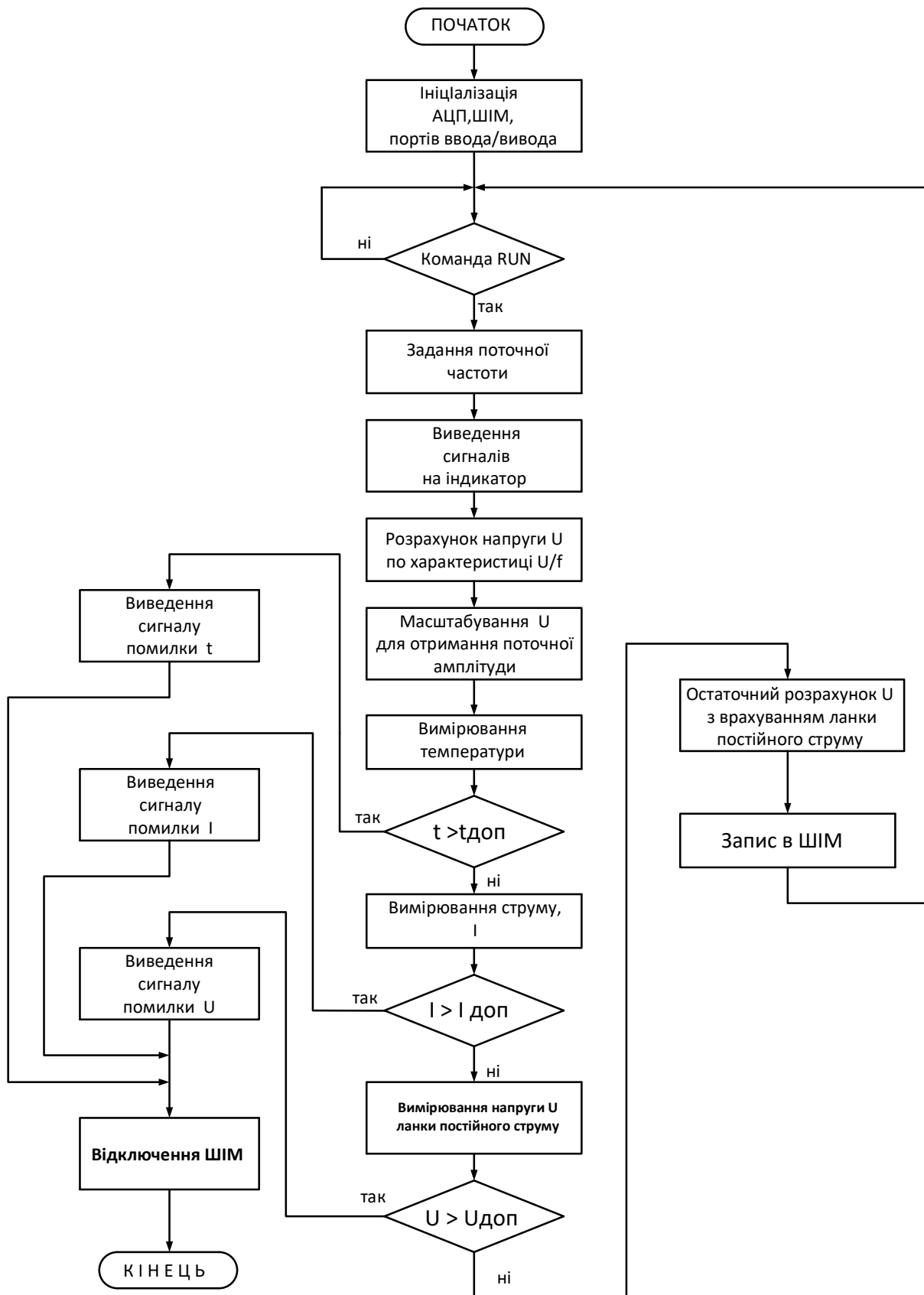


Рисунок 3.5 – Алгоритм роботи системи керування

## 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Техніко-економічне обґрунтування створення стенду

Успіхи в галузі силової та мікропроцесорної техніки створили сприятливі умови для розробки та виробництва електроприводів нового покоління на базі вентильних електродвигунів.

Вимірювально-діагностичний комплекс на базі лабораторного стенду, що розробляється, призначений для збору та обробки інформації, що надходить від вентильного електроприводу.

Розвиток напівпровідникових елементної бази призвів до тенденції витіснення двигунів постійного струму та асинхронних двигунів із систем управління, що потребують підвищеної надійності та широких діапазонів регулювання швидкості. На їх місце часто встановлюють вентильні двигуни.

Машини постійного струму мають більш високі технічні показники (лінійність характеристики, високий ККД, малі габарити), ніж машини змінного струму. Істотний недолік - наявність електромеханічного колектора, який знижує надійність, створює радіоперешкоди, вибухонебезпечність і т. п.

Цих недоліків позбавлений безконтактний двигун постійного струму, що називається вентильним двигуном. Електроприводи з вентильними двигунами дозволяють отримати діапазон регулювання швидкості до 1:20 000 і смугу пропускання 100-150 Гц при значно більшій простоті і менших витратах в порівнянні з регульованими електроприводами з асинхронними двигунами.

Зупинимося на основних властивостях електроприводу з вентильним двигуном.

До переваг аналізованої системи відносяться:

1. Безконтактність та відсутність вузлів, що вимагають обслуговування. Відсутність у вентильних електродвигунів ковзаючих

електричних контактів істотно підвищує їх ресурс і надійність порівняння з електричними двигунами постійного струму або асинхронними двигунами з явно вираженою обмоткою на роторі;

2. Велика перевантажувальна здатність по моменту (короткочасно кратність максимального моменту дорівнює 5 і більше);

3. Висока швидкодія;

4. Найвищі енергетичні показники (ККД та  $\cos$ ). Показники ККД вентильних двигунів перевищують 90% і дуже мало змінюються при зміні навантаження двигуна за потужністю і при коливаннях напруги мережі живлення, в той час як у асинхронних електродвигунів максимальний ККД становить не більше 86% і залежить від змін навантаження;

5. Мінімальне значення струмів холостого ходу та робочих струмів, що дозволяє досить точно вимірювати навантаження на привод та оптимізувати режим роботи;

6. Мають практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання (1:10000 і більше) та можливість регулювання частоти обертання за різними законами;

7. У вентильних двигунів більш проста схема перетворювача в порівнянні з асинхронним частотно регульованим електроприводом;

8. Низький перегрів вентильного електродвигуна збільшує термін служби електроприводу, оскільки збільшується ресурс ізоляційних матеріалів, які працюють при нижчих температурах. Цей же фактор дозволяє електроприводу працювати в нестандартних режимах з можливими навантаженнями;

9. Мінімальні масогабаритні показники за інших рівних умов;

10. Значний термін служби (напрацювання на відмову становить 10000 год і більше), надійність. Ресурс електродвигуна і всього агрегату збільшується так само за рахунок можливості оптимізації режимів роботи зі швидкістю та навантаженням.

Для переконливості економічності електроприводу з вентильним двигуном перед електроприводом з асинхронним двигуном розрахуємо втрати електроенергії цих електроприводів.

Втрати в електроприводі з асинхронним двигуном розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{a\partial} = K_{a\partial} \cdot \left( \frac{\sqrt{3} \cdot U^2}{3,14 \cdot M_H \cdot \omega_H \cdot \sqrt{\omega_0}} \right) \cdot P_H ;$$

де  $K_{a\partial}$  - коефіцієнт АД;

$M_H$  — номінальний момент АД;

$\omega_H$  — номінальна кутова швидкість;

$\omega_0$  — кутова швидкість холостого ходу;

$P_H$  — номінальна потужність АД, що дорівнює 1500Вт;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \approx 78,5 c^{-1}, \quad p = 4,$$

де  $p$  — число полюсів;

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) = 67,58 c^{-1};$$

де  $S_H$  — ковзання ротора;

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = 29,6 H \cdot m;$$

$$\Delta P_{a\partial} = 2,29 \cdot \left( \frac{\sqrt{3} \cdot 380}{3,14 \cdot 29,6 \cdot 67,58 \cdot \sqrt{78,5}} \right) \cdot 1500 = 15,44 kBm .$$

Втрати в електроприводі з вентильним двигуном розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_{в\partial} = K_{в\partial} P_H \sum_i^{\infty} \frac{U_H^2}{M_{d0} \cdot \omega_H \sqrt{\omega_0}} ;$$

де  $K_{в\partial}$  — коефіцієнт ВД;

$M_{d0}$  — момент вентильного двигуна;

$P_H$  — номінальна потужність вентильного двигуна;

$U_H$  — номінальна напруга;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \approx 157c^{-1}; \quad p = 2;$$

де  $p$  — число полюсів;  $f$  — частота струму;

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - S_n) = 146,58c^{-1};$$

де  $S_H$  — ковзання ротора;

$$\Delta P_{\text{вд}} = 1,12 \cdot 1500 \frac{300^2}{23 \cdot 146,58 \cdot \sqrt{157}} = 3,579 \text{ кВт}.$$

Вартість електроенергії складає 2,64 грн. за 1кВт/год. У результаті отримуємо, що за втрати, спричинені АД, потрібно заплатити 40,7 грн. на годину, а за втрати від ВД – 9,4 грн. В годину. В результаті економія електроенергії у грошовому еквіваленті становить 106,76 грн. в годину.

## 4.2 Розрахунок планової собівартості лабораторного стану

Собівартість продукції - це поточні витрати підприємства на його виробництво та реалізацію. При плануванні собівартості розраховують усі витрати виробництва лабораторного стану. Для розрахунку собівартості методом калькулювання, попередньо визначають розмір всіх витрат.

### 4.2.1 Визначення капітальних вкладень

Вартість кожного із елементів лабораторного стану представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи лабораторного стану	Ціна, грн.
Мікроконтролер DSP 56F805	1417
Драйвер IR2233	1175
Оптопари HCPL2630 – 2 шт.	174

IGBT-транзистори IRG4PH40UD – 6 шт.	1362
Двигун в комплекті ДВУ165	7425
Терморезистор типу СТ14-2-145 – 2 шт.	80
Драйвер 74НС244N	12
Роз'єми в комплекті – 16 шт.	1600
Резистори, конденсатори, діоди	680
Провідникова продукція	1600
Трансформатор ОСУ-0,4 УХЛ 4.2	1480
Амперметр М-381 – 2 шт.	920
Вольтметр М-381 – 2 шт.	980
Органічне скло 500x1000 мм	700
Силікон для монтажу органічного скла, кріплення	250
<b>Загальна вартість</b>	<b>19855</b>
Транспортні витрати (10%)	<b>1985</b>

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки.

Оскільки монтажні роботи були виконані власноруч, їх можна не враховувати. Проте на транспортні витрати було витрачено близько 10 відсотків від загальної вартості.

**Висновок:** Враховуючи те, що затрати на даний лабораторний стенд немає можливості порівняти з готовими стендами, які випускаються або не випускаються серійно, ми не можемо обрахувати термін його окупності і зупиняємось на обчисленні затрат на виготовлення лабораторного стенда. Окрім того, складно порахувати економічний ефект від використання вказаного стенда та підвищення рівня знань студентів.



## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В цьому розділі розглянуті заходи та засоби з охорони праці та цивільного захисту під час використання лабораторного стенда для дослідження роботи вентильного двигуна. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на електротехнічний персонал, що виконує дослідження визначені за Гігієнічною класифікацією [15, 16].

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). Хімічні фактори: речовини хімічного походження, в основному аерозолі фіброгенної дії (органічний 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: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

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

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

Для живлення системи електропостачання та системи освітлення лабораторії використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму, відповідно до ПБЕ [18, 19], залежить від наявності факторів підвищеної або особливої

небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пил, контакт обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами в різних приміщеннях підприємства, їх можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

Роботи в електроустановках стосовно заходів безпеки поділяються на три категорії: зі зняттям напруги; без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них; без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах та поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III.

Роботою без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою, вважається робота, під час якої є неможливим випадкове наближення працівників і ремонтного оснащення та інструменту, що застосовуються ними, до струмопровідних частин на відстань, меншу від допустимих, проведення технічних або організаційних заходів для запобігання такому наближенню не потрібно.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах чи поблизу від них необхідно: обгородити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, що перебувають під напругою, і до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричному взутті чи стоячи на ізолювальній підставці або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент із ізолювальними руків'ями (у викруток, крім того, має бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за руків'я до обмежувального кільця; розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям. В разі виявленні порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту, користування ними забороняється.

В процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих засобів. Без застосування електрозахисних засобів забороняється торкатися ізоляторів електроустановки, що перебуває під напругою.

В електроустановках забороняється працювати у зігнутому стані, якщо в разі випрямлення відстань до струмопровідних частин буде меншою від допустимих. В процесі виконання робіт біля необгороджених струмопровідних частин забороняється розташовуватися таким чином, щоб ці частини знаходилися позаду чи з двох боків.

Роботу із застосуванням драбин виконують два працівники, один з яких перебуває знизу. Стоячи на ящиках та інших сторонніх предметах виконувати роботи забороняється.

Роботи на кінцевих опорах ПЛ, що перебувають на території відкритих розподільчих пристроїв (ВРП), слід виконувати за правилами роботи на ВРП. Ремонтні працівники ліній перед тим, як зайти у ВРП, повинні бути проінструктовані і заходити до місця робіт у супроводі оперативного

працівника з групою III; виходити з ВРПУ після закінчення роботи чи під час перерви працівникам дозволяється під наглядом керівника робіт.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пил, контакт обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами, - приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

### **5.1.2 Електробезпека**

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [18, 19]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги; електрозахисні засоби захисту (до 1000В) поділяються на основні (ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

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

### **5.2.1 Мікроклімат**

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [20] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху

повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [21]: температури внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні значно відрізнятись (не більше ніж на 2°C за діапазон норм); якщо температура поверхонь вище або нижче температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1м; ля забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Якість повітря за 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 [26], у першу чергу, залежить від наявності, рівня небезпечності та кількості шкідливих речовин. Шкідливі речовини можуть потрапляти до організму людини інгаляційними та іншими шляхами надходження (пероральний, шкірно-резорбтивний).

Вміст шкідливих речовин у повітрі промислових і цивільних приміщень не повинен, згідно з [26], перебільшувати гранично допустимих

концентрацій (ГДК п.рз) – максимально разових робочої зони (ГДК мр.рз) та середньо змінних робочої зони (ГДК сз.рз).

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню від нього. Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [22] розряд зорової роботи IV, підрозряд «б». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5.3.

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 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	б	малий	світлий	500	200	4	2,4

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

#### 5.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [23]. Нормовані значення виробничого шуму наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

### 5.2.5 Виробнича вібрація

У нашій лабораторії присутня вібрація типу – За [24]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на студентів під час виконання лабораторного практикуму, або яка передається на робочі місця, не маючи потужних джерел випромінювання.

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються лабораторні стенди, транспорт, що рухається поряд з навчальним корпусом, тощо, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$m \cdot c^{-2}$	ДБ	$m \cdot c^{-2} \cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальна	Zo, Yo, Xo	0,1	100	0,2	92



Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

### **5.2.6 Виробничі випромінювання**

Відео монітор є джерелом випромінювання кількох діапазонів електромагнітного спектра. Реальна інтенсивність кожного діапазону, частота та інші параметри залежать від технічної конструкції конкретного терміналу, екранування та інших факторів.

Види випромінювань, часова залежність яких не може бути описана за допомогою простої синусоїдальної функції (однієї визначеної частоти), породжують “гармоніки” з більш високими частотами та більш низькими амплітудами. Більшість діапазонів значною мірою залежить від режимів роботи відео монітора.

### **5.2.7 Психофізіологічні фактори**

Робота електротехнічного персоналу є достатньо складною і потребує різних навичок та характеристик працюючого, тому і впливи від робіт різні і визначаються за Державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [15].

Важкість праці визначається за дод. 15 [15], звідки видно, що даний вид робіт за показниками важкості умов праці характеризується як допустимі умови праці.

- енергозатрати організму: при регіональному навантаженні (з переважною участю м'язів рук та плечового суглоба) – до 7800;

- загальні енергозатрати організму, Вт – до 290;

- робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної);

- нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: 51-100;

Напруженість праці визначається за дод. 16 [15], робота відноситься до інтелектуальної, і має наступні характеристики:

- зміст роботи: відсутня необхідність прийняття рішення;

- сенсорні навантаження : 51-75;

- розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни: 5,0-1,1 мм більше 50% часу;

- тривалість робочого дня, год. – 8 годин;

- змінність роботи - однозмінна робота (без нічної зміни).

Дані характеристики вказуються на те, що за напруженістю робота інженера-проектувальника (цивільне будівництво), який здійснює чисельне моделювання перерозподілу зусиль між елементами кушового пальового фундаменту в залежності від кількості паль відноситься до другого класу з допустимими умовами напруженості праці (напруженість праці середнього ступеня).

### **5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи системи керування лабораторним стендом в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій**

В умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій, потрібно виділити найважливіші та найбільш імовірні на сучасність загрозливі

чинники. Територія Вінницької області, є сприятливою в питанні природних загрозових чинників, як наприклад: землетруси; повені; лавини та інші.

Якщо говорити про технологічні загрозові чинники, то у Вінницькій області, не має своїх атомних станцій, або ж великих хімічних заводів, що робить цю область сприятливою і безпечною і в цьому плані також. Самими близьким небезпечним технологічним загрозовим чинником для території Вінницької області, була і є ЧАЕС.

Тому, слід вважати, також загрозові чинники в умовах військових дій. Ця надзвичайна ситуація є гострою, особливо в теперішні дні. Найбільш поширені небезпечні ситуації пов'язані з військовими діями, на території Вінницької області, можуть бути: авіаудари, ЕМІ бомби, радіаційне зараження, пов'язане з вибухом ядерної зброї, або пошкодженням деякої АЕС та інші

З всього сказано, найбільш вірогідними є застосування ЕМІ, або поширення радіаційного зараження. Адже при ракетній небезпеці, усьому персоналу потрібно покинути небезпечну територію та пройти в укриття.

### **5.3.1 Дослідження безпеки роботи системи лабораторного стенда для імітації роботи його електромеханічної частини в умовах дії іонізуючого випромінювання**

Для дослідження стійкості роботи електричного приводу змінного струму в умовах дії іонізуючих випромінювань, використовують поняття граничного рівня радіації,  $P_{гр}$  (Р/год), при яких система буде працювати стабільно.

Для цього, потрібно дослідити, які граничні рівні дози опромінення,  $P_{гр}$ , має кожен елемент системи. Дані граничних доз опромінення кожного елемента наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Граничні значення дози опромінення лабораторного стенда

Елементи системи електричного приводу	$P_{гр.i}$ , Р/Год	$P_{гр}$ , Р/Год	$P_{гр зв}$ , Р/Год
Блок Керування	Акумулятор	$10^9$	$10^4$
	Транзистори	$10^4$	
Мікроконтролер	Мікросхема	$10^4$	$10^4$
	АЦП	$10^4$	
	ЦАП	$10^4$	

Так, аналізуючи таблицю 5.1, мінімальне значення граничної дози опромінення, становитиме  $P=10^4$ .

Граничне значення потужності дози опромінення, за:

$$P_{зв} = K \cdot P_{min} \cdot K_{осл}, \quad (5.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт надійності ( $K = 0,92$ );

$K_{осл}$  - коефіцієнт послаблення радіації (приймається рівним  $K_{осл} = 2$ , оскільки система керування стендом знаходиться в закритому щитовому приміщенні).

$$P_{зв} = 0,92 \cdot 10^4 \cdot 2 = 18400 \text{ (Р/Год)}$$

Отже, система буде працювати стабільно, якщо доза опромінення не буде перевищувати граничного значення в  $P_{гр}=18400$  Р/Год.

Визначимо допустимий час перебування системи керування під дією іонізуючого випромінювання:

$$t_{дон} = \left( \frac{D_m \cdot K_{осл}}{2 \cdot P_{зв}} + \sqrt{t_n} \right)^2, [\text{ГОД}] \quad (5.2)$$

$$t_{дон} = \left( \frac{10^4 \cdot 2}{2 \cdot 18400} + \sqrt{1} \right)^2 = 2,38 \text{ (ГОД)}$$

Отже, за розрахунками, при дозі опромінення в  $10^4$ , система буде працювати безпечно тільки 2 години, що є допустимим. Але разом з тим, потрібно розуміти, що доза опромінення в  $10^4$  – це досить велике значення, для цього параметра, тому при розрахунку меншої дози опромінення, як наприклад  $10^3$ , система буде працювати стабільно й безпечно, досить довгий час.

### **5.3.2 Дослідження безпеки роботи системи керування лабораторного стенда для імітації роботи його електромеханічної частини в умовах дії електромагнітного імпульсу**

Лабораторний стенд знаходиться екранований по всьому об'єму, щоправда з однієї сторони цей екран решітчастий, але навіть решітчастий екран, захищає від електромагнітного імпульсу (ЕМІ), так само, як і повний екран.

Розрахуємо перехідне гасіння енергії електричного поля сталевим екраном, за формулою:

$$A = 5,2 \cdot d \cdot \sqrt{f}, \quad (8.3)$$

де  $d$  – товщина стінки екрана ( $d = 2$  см);

$f$  – максимальна частота ЕМІ ( $f = 15000$  Гц).

$$A = 5,2 \cdot 2 \cdot \sqrt{15000} = 1273 \text{ (дБ)}.$$

Також, за (6.3), розрахуємо перехідне гасіння енергії електричного поля в щитовій, де знаходяться усі системи керування та блоки пам'яті. Для щитової, застосовується сталевий екран, товщиною  $d = 1$  см, тому:

$$A_{\text{щ}} = 5,2 \cdot 1 \cdot \sqrt{15000} = 636,9 \text{ (дБ)}.$$

Живлення системи здійснюється мережею 380 В змінної напруги, та 24 В – постійної напруги. В незалежності від сили електромагнітного імпульсу, основні блоки системи будуть працювати, адже задля безпеки, використовуються плавкі запобіжники.

Отже, єдиною уразливою ділянкою при ЕМ, є провідні кабелі, які йдуть від щитової, до живлення та керування електроприводом пальника зерносушарки. Нажаль на даний час, забезпечити безпечність, за рахунок встановлення в заземлений короб, є неможливим.

Розрахуємо, на яку напруженість ЕМІ, витримують кабелі з щитової. Візьмемо лише провідники для живлення двигунів, тобто мережею 380 В.

Так, допустима напруга коливання для мережі 380 В, становить 5%, тому:

$$U_{\text{доп}} = 380 + \frac{380}{100} \cdot 5 = 399 \text{ (В)}$$

Тоді, за формулою можна визначити напруженість електромагнітного імпульсу, враховуючи, що коефіцієнт безпеки не має бути меншим за 40 дБ:

$$K_B = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{ЕМІ}}}\right), \quad (5.5)$$

де  $U_{\text{ЕМІ}}$  - напруга, яка викликана ЕМІ, по горизонтальній та вертикальних струмоведучих осях.

З формули (5.5), можна знайти, що напруга ЕМІ, буде становити 3,99В, при коефіцієнту безпеки 40 дБ. Розрахуємо напруженість по горизонтальній осі електромагнітного імпульсу:

$$U_{\text{ЕМІ.Г}} = E_{\Gamma} \cdot L_{\Gamma}, \quad (5.6)$$

де  $E_{\Gamma}$  - напруженість ЕМІ по горизонтальній осі;

$L_{\Gamma}$  - довжина горизонтальної струмоведучої частини ЕМІ ( $L_{\Gamma} = 1,5 \text{ м}$ ).

$$E_{\Gamma} = \frac{3,99}{1,5} = 2,66 \text{ (В/м)}$$

Відповідно, по вертикальній осі напруженість поля ЕМІ, буде в  $10^3$  більшим, та становитиме

$$E_B = 2,66 \text{ (кВ/м)}$$

Отже, якщо напруженість ЕМІ, не буде перевищувати 2,66 кВ/м, то система буде працювати безпечно, якщо ж це значення буде перевищено, провідники з щитку до двигуна стенда, можуть згоріти, або виникнути коротке замикання. Але, як вже було сказано, в системі керування лабораторного стенда, використовуються плавкі запобіжники.

Отже за результатами розрахунків, система керування лабораторного стенда, та сам стенд, в результаті дослідження виявився безпечним, тому заходи по підвищенню стійкості можна навести тільки в вигляді загальних, як наприклад:

1. забезпечити безпеку провідників від ЕМІ, за рахунок встановлення їх в короб що заземлений;
2. використовувати більше захисних пристроїв таких як термічний запобіжник або запобіжник по струму тощо.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено ескізний проєкт для створення лабораторного стенду по дослідженню вентильного двигуна з мікропроцесорною системою управління.

В основній частині проєкту було розглянуто: загальні відомості про електроприводи системи вентильний двигун, розробка структури лабораторного стенду, розробка схеми силового каналу та системи керування вентильним двигуном на базі цифрового сигнального процесора DSP56F805.

В економічній частині розраховано планову собівартість лабораторного стенду.

У розділі охорони праці розглянуто заходи та засоби з охорони праці та цивільного захисту під час використання лабораторного стенда для дослідження роботи вентильного двигуна.

Результати виконаної роботи дозволяють зробити висновок про необхідність продовження досліджень з даної проблематики, а також розвитку та модернізації пропонованого лабораторного стенду.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: монографія / В. І. Ткачук, І. Є. Біляковський, О. В. Макаруч та ін. ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2011. – 288 с. : іл.
2. Глебова М. Л. Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 3 Машини постійного струму та вентильні двигуни (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / М. Л. Глебова, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 53 с.
3. Бочков В. М. Обладнання автоматизованого виробництва. Підручник / В. М. Бочков, Р. І. Сілін. – Львів, Вид – во ЛПП, 2015. – 404 с
4. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.
5. 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. Красношарпа, М.Я. Островерхов. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.
6. Плешков С. П., Серебренніков С.В. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2016.– 161 с.
7. Савченко І. Д. Приводи систем керування [Текст]: навч. посіб./ І. Д. Савченко.–Д.: РВВ ДНУ, 2014. – 112 с.

8. Безщітковий двигун постійного струму (BLDC): [Електронний ресурс]. – <https://webstarsnet.com/uk/23-brushless-dc-blcdc-motor-construction-andworking.html>

9. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.: іл.

10. Електропривод: Навчальний посібник / О.Ю. Синявський, П.І. Савченко, В.В. Савченко, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Ю.М. Хандола, І.П. Ільчов, В.Ю. Рамш, В.Я. Бунько; За ред. О.Ю. Синявського. – 2-е вид., доп і перероб.

11. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

12. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001.

13. Вентильний двигун конструктивні особливості і принцип дії, переваги та недоліки: [Електронний ресурс]. – <https://sitemasters.com.ua/elektroobladnannja/ventilnij-dvigun-konstruktivni-osoblivosti-i/>

14. Вентильні електродвигуни. Принцип роботи: [Електронний ресурс]. – [https://government.com.ua/nashi-hroshi/ventilni-elektrodviguni-printsip-roboti-elektrodvigun-ventilnij-svojimi-rukami.html#google\\_vignette](https://government.com.ua/nashi-hroshi/ventilni-elektrodviguni-printsip-roboti-elektrodvigun-ventilnij-svojimi-rukami.html#google_vignette)

15. 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).

16. 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->.

17. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.

18. 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.

19. 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>.

20. 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>.

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

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

23. 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>.

24. 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>.

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

26. 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]. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України. 2007. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=40230](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=40230).

27. Кобилянський О. В. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу “Охорона праці” в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей / О. В. Кобилянський, О. П. Терещенко. – Вінниця: ВНТУ, 2003.– 46 с.

Додаток А (обов'язковий)  
Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

« 07 » листопада 2023 р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ**

**ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА**

08-24.МКР.015.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф.

 Володимир ГРАБКО

« 07 » листопада 2023 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-22м

 Руслан РОСТЕЦЬКИЙ

« 07 » листопада 2023 р.

08-24.МКР.015.00.000 Е2

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Максимум
Розробив:		Ростецький Р.В.		30.01			
Перевірів		Грабко В.В.		30.01			
Т. контр.							
Лабораторний стенд дослідження роботи вентильного двигуна					Аркуш 8		Аркушів 10
ОпONENT		Баденюк В.		02.02	ВНТУ, каф. КЕМСК		
Норм.кон.		Жуков О.А.		30.01			
Загверд.		Мошноріз М.М.		30.01			
Алгоритм роботи системи керування							

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Лабораторний стенд дослідження роботи вентиляного двигуна

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

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

Науковий керівник: д.т.н., проф. Грабко В.В.  
(прізвище, ініціали, посада)

### Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність	84,9%
Схожість	15,1%

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)

Ростецький Р.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Грабко В.В.

(прізвище, ініціали)