

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка стенда для дослідження вентиляного двигуна електропобутової техніки

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»


Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТм-23-1

  
Підпис

Савчук Т.А.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

проф. Білий Л.А.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

доц. Тимощук О.Г.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

Хмельницький 2024


# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н. доц. Неймак В.С.

 12 . 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Савчук Тарас Андрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка стенда для дослідження вентиляного двигуна електропобутової техніки

керівник роботи проф. Білий Л.А.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики стендів – аналогів та вентиляних двигунів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз конструкцій, принципів роботи та особливостей вентиляних електродвигунів. 2. Розробка конструкції стенда для дослідження вентиляного двигуна електропобутової техніки. 3. Конструкція, функціонал і робота стенда для дослідження вентиляних електродвигунів. Висновки.

Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Схема керування вентиляним двигуном. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Вентильний двигун. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Навчально-дослідний стенд. Схема структурна (A1). Аркуш 4. Контролер. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 5. Адаптер USB-UART. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 6. Драйвер. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 7. Плата драйвера. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 8. Друковані плати стенда. Документ ілюстраційний. Аркуш 9. Монтажні схеми стенда. Монтажне креслення

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз конструкцій, принципів роботи та особливостей вентильних електродвигунів	до 27.10.24р.	
2. Розробка конструкції стенда для дослідження вентильного двигуна електропобутової техніки	до 10.11.24р.	
3. Конструкція, функціонал і робота стенда для дослідження вентильних електродвигунів	до 21.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

  
Підпис

Т.А. Савчук  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Л.А. Білий  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Савчук Тарас Андрійович

2. Тема магістерської роботи Розробка стенда для дослідження вентиляльного двигуна електропобутової техніки

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 10 арк., сторінок записки 71

5. Вентильні електричні двигуни завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам займають провідні позиції серед електромашин у діапазоні малих і середніх потужностей. Їх конструктивна надійність, простота, жорсткі механічні характеристики та відсутність необхідності в затратах на збудження роблять ці двигуни незамінними у сучасних промислових системах автоматики, робототехніці, маніпуляторах, системах координатного керування та багатьох інших галузях. Завдяки таким технічним перевагам вентиляльні електричні двигуни займають важливе місце в каталогах провідних світових виробників електротехнічного обладнання. Це підкреслює актуальність дослідження їхніх характеристик для оптимального застосування в різних галузях. Метою даної роботи є вивчення конструкцій, характеристик та параметрів вентиляльних електричних двигунів, а також дослідження способів їх ефективного управління.

В магістерській роботі розроблено стенд для дослідження вентиляльного двигуна електропобутової техніки. В першому розділі проведено аналіз конструкцій, принципів роботи та особливостей вентиляльних електродвигунів. В другому здійснено розробку конструкції стенда для дослідження вентиляльного двигуна електропобутової техніки. В третьому розділі розроблено конструкцію, описано функціонал і роботу стенда для дослідження вентиляльних електродвигунів.

Підпис студента 

" 17 " 12 20 24 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 6 від " 31 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК добре/с

Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_





Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар 

" 31 " 12 20 24 р.

## ЗМІСТ

	стор
Вступ	6
1 Аналіз конструкцій, принципів роботи та особливостей вентильних електродвигунів	8
1.1 Особливості конструкції вентильного електродвигуна	8
1.2 Аналіз робочих характеристик і електромагнітних процесів вентильних електродвигунів	21
1.3 Висновки до першого розділу	34
2 Розробка конструкції стенда для дослідження вентильного двигуна електропобутової техніки	35
2.1 Аналіз існуючих схем для дослідження вентильних електричних двигунів	35
2.2 Створення електричної схеми стенда для дослідження вентильного електродвигуна	40
2.3 Склад і призначення вузлів стенда для дослідження вентильних електродвигунів	42
2.4 Висновки до другого розділу	49
3 Конструкція, функціонал і робота стенда для дослідження вентильних електродвигунів	50
3.1 Розробка та виготовлення друкованої плати	50
3.2 Розробка та виготовлення корпусу стенда для управління вентильним електричним двигуном	56
3.3 Опис функціоналу стенду для дослідження вентильних електродвигунів	58

МРМА 24.00.00.000 ПЗ				
№ м.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Савчук		
Перевір.		Білий		
І.контр.				
Затвер.		Неймак		
Розробка стенда для дослідження вентильного двигуна електропобутової техніки Пояснювальна записка				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		М	4	71
ХНУ гр. ЕТм-23-1				

3.4	Опис функцій клавіатури	58
3.5	Порядок роботи з пристроєм	59
3.6	Опис елементів управління стендом	60
3.7	Виготовлення та монтаж стенду	63
3.8	Опис програми для дослідження вентильного електричного двигуна	65
3.9	Висновки до третього розділу	66
	Висновки	67
	Перелік джерел посилання	68
	Додаток А	

## ВСТУП

Вентильні електричні двигуни завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам займають провідні позиції серед електромашин у діапазоні малих і середніх потужностей [1]. Їх конструктивна надійність, простота, жорсткі механічні характеристики та відсутність необхідності в затратах на збудження роблять ці двигуни незамінними у сучасних промислових системах автоматизації, робототехніці, маніпуляторах, системах координатного керування та багатьох інших галузях. Їх застосування охоплює промислові автоматичні лінії, принтери, медичні насоси, побутову техніку та електрообладнання транспортних засобів [2]. Такий широкий спектр використання визначає актуальність дослідження роботи вентильних двигунів та проектування схем їх керування.

Впровадження вентильних електродвигунів обумовлене рядом переваг [3]. Серед них безконтактність, яка забезпечує високу надійність і тривалий ресурс роботи, підвищена перевантажувальна здатність, енергетична ефективність із коефіцієнтом корисної дії понад 90%, що залишається стабільним при зміні навантаження. Також вентильні двигуни мають практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання та забезпечують мінімальні струми неробочого ходу, що сприяє оптимізації режимів роботи приводу. Їх компактність, низьке перегрівання та довгий термін служби роблять їх привабливим вибором для промисловості.

Завдяки таким технічним перевагам вентильні електричні двигуни займають важливе місце в каталогах провідних світових виробників електротехнічного обладнання. Це підкреслює актуальність дослідження їхніх характеристик для оптимального застосування в різних галузях.

Метою даної роботи є вивчення конструкцій, характеристик та параметрів вентильних електричних двигунів, а також дослідження способів їх

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективного управління. Для досягнення мети необхідно вирішити кілька завдань: аналіз існуючих систем керування електроприводами вентильних двигунів, вибір та розробка математичної моделі системи автоматичного управління, створення макета дослідної установки та проведення досліджень робочих характеристик приводу.

Рішення цих завдань базуватиметься на аналізі конкретних типів двигунів та їхніх схем управління, які вже використовуються в промисловості. Такий підхід дозволить отримати цінні практичні результати для подальшого вдосконалення та застосування вентильних електричних двигунів.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ, ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЕНТИЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

## 1.1 Особливості конструкції вентильного електродвигуна

Сучасні електричні приводи пред'являють до двигунів посилені вимоги. Вони повинні поєднувати високу надійність та простоту конструкції, характерну для асинхронних електродвигунів, із можливістю широкого діапазону регулювання частоти обертання, властивого двигунам постійного струму. Вентильні електричні двигуни, оснащені електронними схемами керування, цілком відповідають цим вимогам, водночас позбавлені недоліків асинхронних машин (таких як втрати в роторі та споживання реактивної потужності) та синхронних машин (наприклад, випадання із синхронізму та пульсація частоти обертання) [4].

Вентильні двигуни є безконтактними електромашинами постійного струму з збудженням від постійних магнітів і одно- або багатообмотковим статором. Комутація обмоток статора здійснюється відповідно до положення ротора. Висока надійність таких двигунів забезпечується завдяки застосуванню електронних схем керування, що включають датчики положення ротора.

Ці двигуни використовуються у високоточних приладах та апаратах, зокрема в електроприводах магнітофонів, відеомагнітофонів, електрофонів, інформаційно-оброблювальних пристроїв, вимірювальній техніці, а також у побутових електроприладах. Вентильні електродвигуни широко застосовуються у приводах, де необхідна висока точність позиціонування ротора і пов'язаних із ним робочих органів [4].

Вентильний електродвигун постійного струму (лист [МРМА24.00.00.000Д01]) є складною електромеханічною системою, яка

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єднує три основні компоненти: електричну машину (ЕМ), призначену для приведення в рух виконавчого механізму (ВМ), датчик положення ротора (ДПР). та комутатор (К). Конструкція електричної машини розроблена на основі принципів синхронної машини. Обмотка якоря, що складається із секцій L1-L3, розташованих на статорі, а індуктор, представлений постійним магнітом, забезпечує створення магнітного потоку в повітряному зазорі, необхідного для роботи.

Датчик положення ротора складається із сигнального елемента (СЕ), жорстко закріпленого на роторі, чутливих елементів (ЧЕ), розміщених нерухомо в обіймі на статорі, та перетворюючих пристроїв (ПП). Кількість чутливих елементів постійно дорівнює більшості секцій обмотки якоря, проте спеціальним схмотехнічним рішенням може бути зменшена, що значно покращує конструкцію датчика та забезпечує надійність системи [4-6].

Схема управління вентиляним двигуном наведена на рис.1.1 (лист [МРМА24.00.00.000Д01]). Сигнальний елемент розташований у зоні впливу чутливих елементів і, обертаючись разом із ротором, взаємодіє з ними безконтактно через фізичне поле (світлове, магнітне чи електричне) залежно від типу використаних елементів. Тривалість такого впливу на посилений кутовий сигнальний сектор  $\beta_s$ , у межах якого фізичного поля, діє на чутливі елементи.

У багатополюсних вентиляних двигунах геометричний розмір сигнального сектора зменшується пропорційно до кількості пар полюсів машини. У результаті дії фізичного поля сигнальних елементів змінюються параметри чутливих елементів, а на виході датчика положення ротора генеруються електричні сигнали  $u_{\partial n}$  (УДП, ДПЕМ). Полярність і амплітуда цих сигналів залежать від кутового положення ротора і використовують для керування роботою комутатора вентиляційного двигуна [6].

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

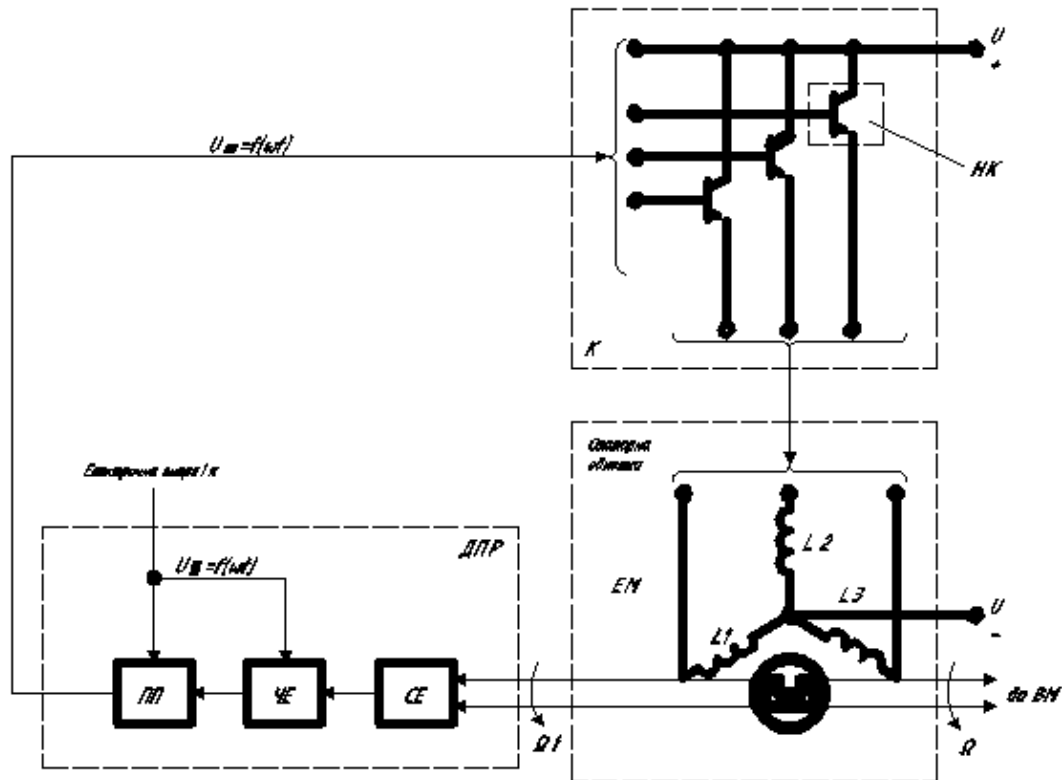


Рисунок 1.1 – Схема управління вентильним двигуном [6]

Комутатор, керуючись сигналами  $u_{\text{дн}}(\omega t)$ , які надходять на входи його напівпровідникових ключів (зазвичай транзисторів), виконує підключення секцій обмотки якоря електричної машини до джерела живлення, тобто комутує ці секції. Завдяки жорсткому зв'язку сигнального елемента датчика положення ротора з ротором, а також фіксації чутливих елементів на статорі, комутація секцій обмотки здійснюється в послідовності та в такий момент часу, коли напрям струму в провідниках секцій, розташованих у зоні однієї полярності магнітного поля індуктора, залишається незмінним, незалежно від положення ротора відносно статора [7].

У результаті взаємодії магніторушійної сили обмотки якоря з магнітним полем індуктора в електричній машині утворюється постійний за знаком електромагнітний момент, який забезпечує стабільну роботу вентильного двигуна. Таким чином, датчик положення ротора разом із комутатором виконує функції, аналогічні щітково-колекторному вузлу традиційних двигунів постійного струму. Вони забезпечують залежну від кутового положення ротора комутацію секцій обмотки якоря, що створює схожість у механічних властивостях вентильних і колекторних двигунів постійного струму.



частиною безколекторного вентиляційного електричного двигуна, без якої його робота неможлива.

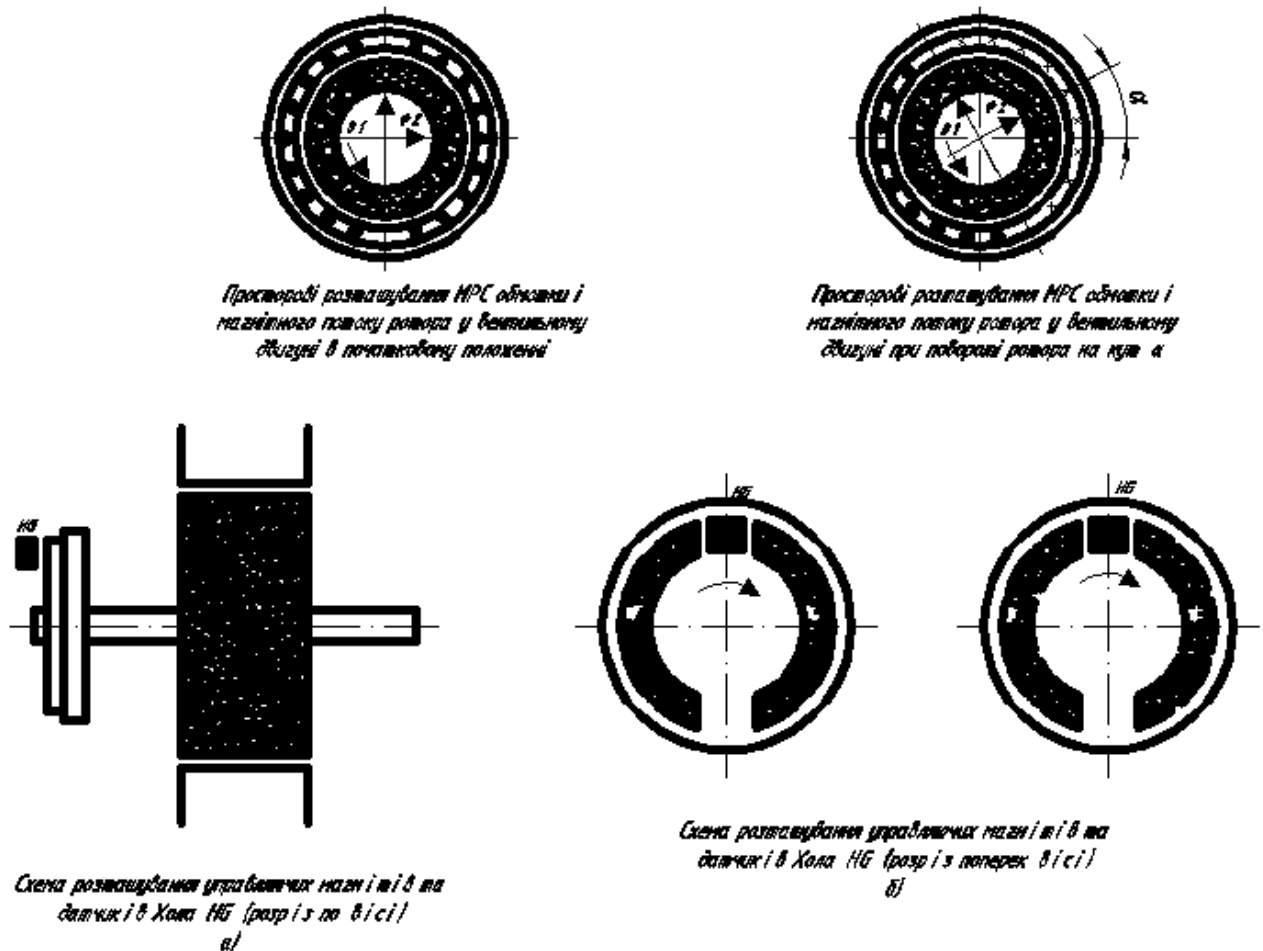


Рисунок 1.3 – Розташування магнітів в езколекторному вентильному електродвигуні

Зі збільшенням кількості обмоток на статорі значно ускладнюється електронна схема керування. З цієї причини такі двигуни зазвичай мають не більше чотирьох обмоток. Дешевші конструкції можуть містити лише одну обмотку [8].

Вентильні електричні двигуни класифікуються за кількістю обмоток статора та кількістю імпульсів струму в обмотках за один оберт валу двигуна.

Для розуміння основ конструкції вентильних двигунів із різною кількістю обмоток розглянемо однообмотковий двигун [8].

Схема конструкції однообмоткового вентиального двигуна показана на рис.1.4. На статорі розташована одна обмотка 1, яка підключається до джерела живлення  $U$  за допомогою транзистора  $VT1$  (рис.1.5) (лист [МРМА24.00.00.000Д02]). Ротор двигуна виготовлений з постійного магніту й має одну пару полюсів. Керуючий сигнал для бази транзистора подається датчиком Хола.

Сигнал на виході датчика Хола генерується за допомогою додаткового постійного магніту, встановленого на роторі, або магнітами самого ротора. Коли датчик Хола потрапляє в магнітне поле, наприклад від додаткового магніту, на його виході з'являється напруга  $U_H$ , яка використовується для активації транзистора. Залежність між магнітною індукцією зовнішнього поля та напругою на виході датчика Хола є лінійною. При зміні напрямку вектора магнітної індукції змінюється і полярність напруги на виході датчика [4].

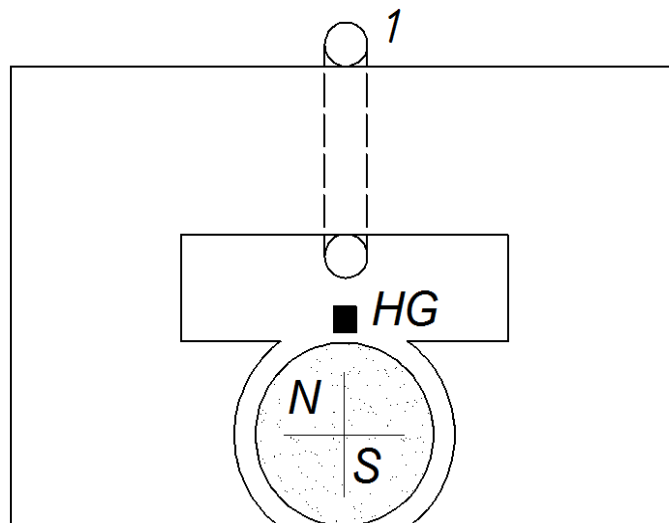


Рисунок 1.4 – Конструктивна схема однообмоткового електродвигуна з одно імпульсним живленням

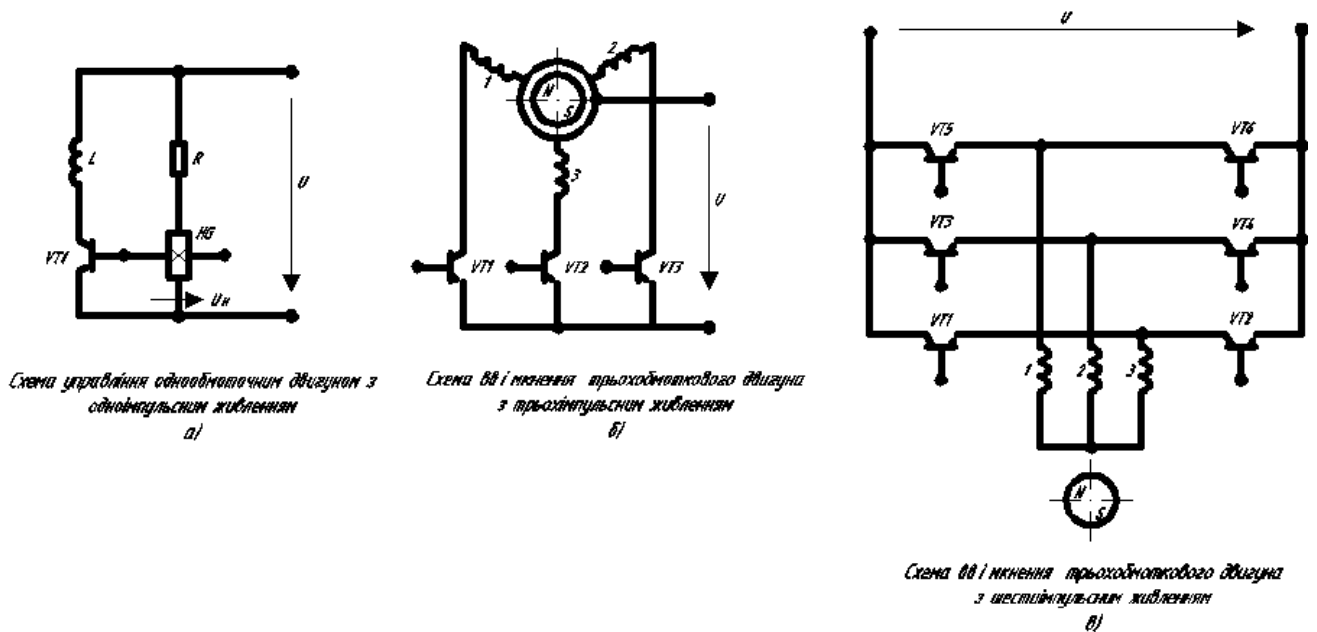


Рисунок 1.5 – Схема конструкції однообмоткового вентильного електродвигуна

У схемі, представлений на рис.1.5 (лист [МРМА24.00.00.000Д02]), транзистор може працювати лише в двох режимах: відкритому або закритому. На рис.1.3, а (лист [МРМА24.00.00.000Д02]) зображено взаємне розташування датчика Хола і керуючого додаткового магніту, а на рис.1.3, б (лист [МРМА24.00.00.000Д02]) показано положення додаткового магніту на початку (суцільні лінії) і в кінці (штрихові лінії) комутації обмотки статора двигуна. У цій схемі датчик Хола реагує на північний полюс додаткового магніту. Такі конструкції називають одновимірними або однонапівперіодними.

Датчик Хола, як показано на рис.1.5, а (лист [МРМА24.00.00.000Д02], рис.2, а), підключений до кола бази транзистора таким чином, що при появі напруги  $U_H$  транзистор переходить у відкритий стан. У результаті через обмотку статора двигуна починає проходити струм, створюючи магніторухійну силу  $\theta_1$ , спрямовану від правого до лівого полюса статора (рис.1.6). На початку комутації магнітний потік  $\Phi_2$  ротора спрямований у

протилежний бік (суцільна стрілка на рис.1.6). До моменту відключення обмотки ротор переміщується в нове положення (штрихова стрілка). Середній кут між  $\theta_1$  і  $\Phi_2$  дорівнює приблизно  $90^\circ$  [7].

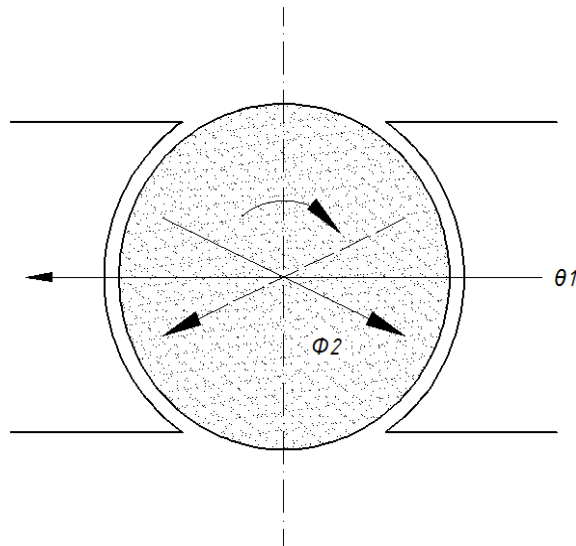


Рисунок 1.6 – Просторове положення обмотки магніторушійної сили  $\theta_1$  та обмотки управління і магнітного потоку  $\Phi_2$  ротора до і після його повороту

Через обмотку статора протікає імпульсний струм, який можна розкласти на постійну та змінну складові. Для визначення обертового моменту враховують постійну складову та першу гармоніку змінної складової. Крім того, для спрощення розрахунків передбачається просторовий синусоїдальний розподіл лінійного навантаження струму в обмотці.

Для її змінної складової,  $a = A \cdot \sin(p \cdot x_1) \cdot \sin(\omega \cdot t)$  можна виділити складові з лівостороннім  $a_L = A_L \cdot \sin(p \cdot x_1 - \omega \cdot t)$  і правостороннім  $a_R = A_R \cdot \sin(p \cdot x_1 + \omega \cdot t)$  напрямом обертання. Індукція  $B$  магнітного поля, яка створена постійним магнітом ротора, розподіляється вздовж його кола по синусоїдальному закону [8]:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B(x_2) = B \cdot \sin(p \cdot x_2) \quad (1.1)$$

Формула для визначення обертового моменту буде мати наступний вигляд [8]:

$$M = I \cdot R^2 \cdot \int_0^{2\pi} A(x_1, t) \cdot B(x_1, t) dx_1 \quad (1.2)$$

Момент електричного двигуна складається з трьох компонентів [4, 5, 9]:

- хвиля лінійного навантаження, що обертається разом із ротором, створює корисний момент, який залишається постійним у часі;
- хвиля лінійного навантаження, що обертається в зворотному напрямку, створює пульсуючий момент із подвійною частотою.

Постійна складова моменту змінюється відповідно до частоти напруги живлення.

На статорі трьохобмоткового вентильного електричного двигуна (рис.1.5, б) (лист [МРМА24.00.00.000ДО2], рис.2, б) встановлено три обмотки (1, 2, 3), розташовані по колу під кутом 120°. Кожна обмотка підключається до джерела живлення через окремий транзисторний ключ. Для управління транзисторами використовують три датчики Хола. Через кожен обмотку струм протікає протягом однієї третини періоду зміни струму.

Ці три струми можна розкласти на постійну та змінну складові. Постійна складова струму зростає через просторовий розподіл обмоток і, не сприяючи створенню обертового моменту, втрачається на нагрів обмоток. Основна гармоніка, утворена струмами  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , бере участь у створенні постійного моменту. Проте у кривій моменту також наявний пульсуючий момент, викликаний вищими гармоніками струмів  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  [9].

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Трьохобмотковий електричний двигун можна підключати за двонапівперіодною схемою (рис.1.5, в) (лист [МРМА24.00.00.000ДО2]), яка забезпечує використання шести транзисторів.

Для підвищення ефективності використання постійних магнітів, забезпечення рівномірності обертового моменту протягом одного оберту та виконання реверсування магнітної системи без необхідності перемагнічування магнітів пропонується вентильний електричний двигун із подвійною магнітною системою. Ця система складається з постійних магнітів, які формують робочий зазор із різнополярною намагніченістю, і магнітної системи з аксіально намагніченими магнітами. Активні поверхні постійних магнітів обох магнітних систем спрямовані одна до одної. Крім того, двигун оснащений електронним комутатором, керуючі ланцюги якого взаємодіють із датчиком положення магнітних систем. Вихід підключається до обмоток управління, причому конструкція здвоєної магнітної системи передбачає використання постійних магнітів із полюсними наконечниками, виготовленими з магнітом'якого матеріалу. Ці наконечники встановлені у фланцеві кришки на кільцеві магнітопроводи з інтервалом, що відповідає полюсній поділці, утворюючи магнітні системи  $2p = 2 \cdot 2^n$  з парним числом полюсів (де  $n$  - ціле число,  $n=1, 2, 3, \dots, n$ ). Магніти закріплені на валу таким чином, що однойменні полюси розташовані уздовж осі [9].

Кожен торець магнітної системи з аксіально намагніченими постійними магнітами має полюсні наконечники з магнітом'якого матеріалу, які вставлені в пази циліндра, виготовленого з немагнітного матеріалу. Кількість цих наконечників відповідає утворенню магнітних систем із  $2p = 3 \cdot 2^n$  пар полюсів на кожному торці. Полюсні наконечники виконані довшими за постійні магніти в радіальному напрямку [9].

У магнітній системі з аксіально намагніченими магнітами по

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внутрішньому діаметру циліндра з немагнітного матеріалу встановлюється статор із обмотками, розміщеними в пазах. Наприклад, така конструкція може бути використана у вентильно-індукторних електродвигунах, де кількість пазів статора і ротора відповідає розрахованим параметрам. Ротор, виконаний без обмоток, оснащується тримачами з немагнітного матеріалу, на яких закріплені магнітом'які шунти. Ці шунти обертаються разом із ротором уздовж розточки полюсних наконечників, забезпечуючи необхідні характеристики двигуна [9].

На рис.1.7 (лист [МРМА24.00.00.000ДО2, рис.1]) представлено загальний вигляд вентильного електродвигуна.

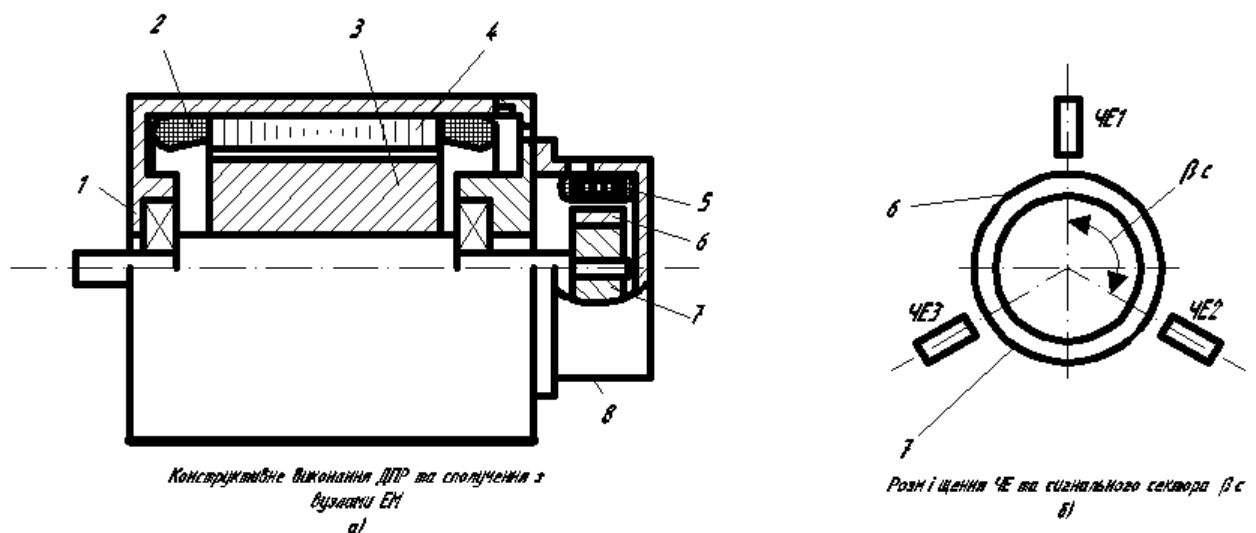


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд вентильного електродвигуна

На рис.1.8 (лист [МРМА24.00.00.000ДО2]) наведено реверсивний вентильний двигун в розрізі по А-А.

Реверсивний вентильний електродвигун включає три ключові компоненти [10]:

- статор,
- здвоєний ротор,
- вентильно-індукторний привід.

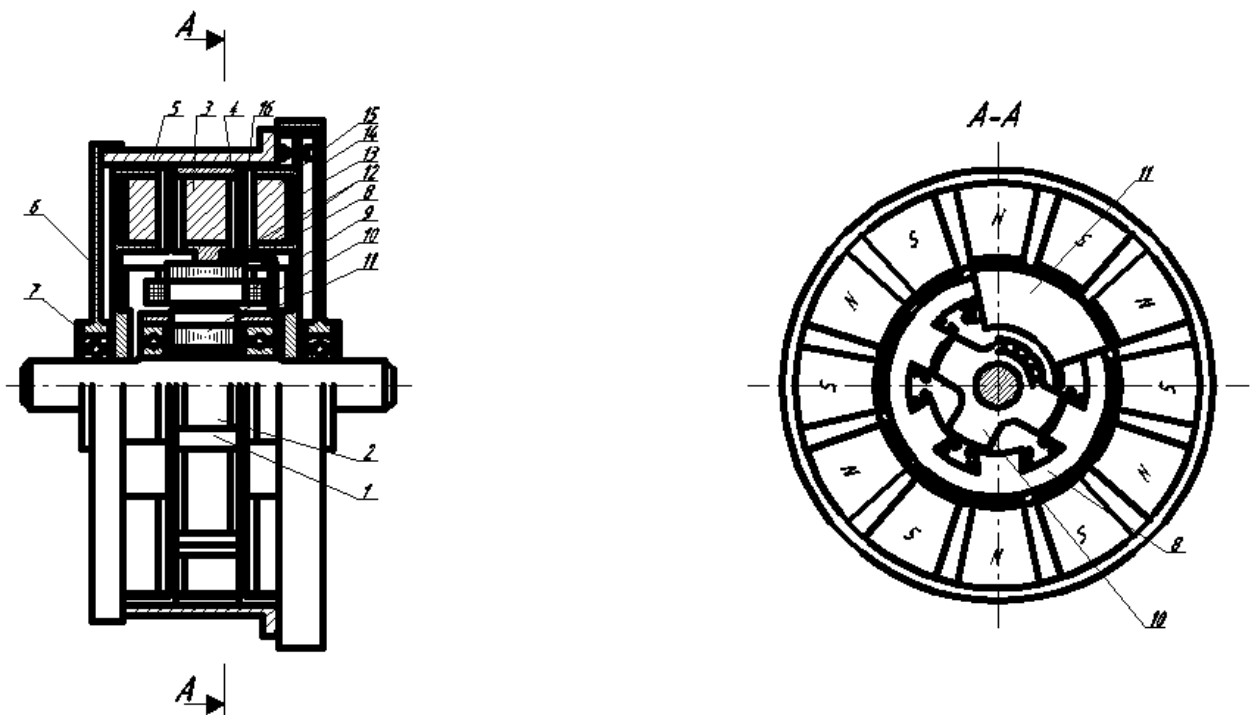


Рисунок 1.8 - Реверсивний вентильний електродвигун  
в розрізі по А-А

Статор 1 виготовлений у вигляді циліндра з немагнітного матеріалу, оснащеного пазами 2. У цій частині, розташованій по колу на відстані полюсної поділки, встановлені постійні магніти 3 з полюсними наконечниками 4. Сам статор 1 поміщений у немагнітний корпус 5 і оснащений фланцевими кришками 6 з кульковими підшипниками 7. У середині статора 1 розташована додатковий статор 8, який містить зосереджені обмотки 9, які можуть бути елементами вентильно-індукторного електродвигуна.

Ротор 10, виконаний без обмоток, здатен обертатися на окремих кулькових підшипниках. З обох торців ротор забезпечений тримачами 11, виготовленими з немагнітного матеріалу, які мають форму фланцевих кришок із секторними вирізами. Уздовж зовнішнього діаметра тримачів розташовані шунти 12 із магнітом'якого матеріалу. Ці шунти перекривають три полюсні наконечники 4 статора 1 і пару полюсних наконечників здвоєної магнітної

										Арк.
										19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

системи [10].

Обмотки 9 статора 8 з'єднані з виходом електронного комутатора, який управляється сигналами, отриманими від датчика положення магнітних систем.

Ротор 13 має фланцеві кришки, до яких закріплені кільцеві магнітопроводи 14. На них із дотриманням полюсної поділки встановлені постійні магніти 15 із полюсними наконечниками 16. Ротор утворює здвоєну магнітну систему з  $2p = 2 \cdot 2^n$  парами полюсів, що охоплюють статор 1 з обох торців. Ротор 13 може обертатися навколо осі статора 1. При цьому зазори між активними поверхнями магнітних систем ротора 13 і статора 1 підбираються так, щоб забезпечити максимальну ефективність використання постійних магнітів, де енергія  $(ВН)_{\max}/2$  є ключовою характеристикою магнітів [10].

Число пазів статора 8 і ротора 10 визначається умовами переміщення магнітом'яких шунтів 12 відповідно до полюсної поділки магнітної системи з  $2p = 3 \cdot 2^n$  парами полюсів.

Датчик положення магнітних систем 16 може бути різних типів, зокрема:

- трансформаторним;
- індуктивним;
- дросельним;
- на ефекті Холла тощо.

Проте перевагу слід віддати фотоелектричним датчикам через їхню точність і надійність.

Незважаючи на переваги конструкції, її складність, необхідність додаткових елементів силової апаратури, таких як електромагнітні реле, ускладнюють схему управління і знижують ефективність застосування цього типу електродвигуна [10].

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Аналіз робочих характеристик і електромагнітних процесів вентильних електродвигунів

### 1.2.1 Усталені процеси

Для вентильних електричних двигунів із постійними магнітами (також відомих як безконтактні електродвигуни постійного струму) при невеликих потужностях на валу, що становлять кілька ватів або менше, у процесі вивчення їх характеристик і виконання розрахунків можна нехтувати індуктивністю фаз обмотки. У таких випадках основний вплив на характеристики електродвигуна здійснюють активний опір фаз і електрорушійна сила обертання, яка зумовлена потоком постійного магніту. Ці фактори домінують над індуктивними опорами та електрорушійною силою само- і взаємоіндукції обмотки. Це пояснюється низькою магнітною проникністю матеріалів постійних магнітів, яка майже дорівнює проникності вакууму [10].

Однією з характерних особливостей роботи вентильного електричного двигуна є періодичність (циклічність) процесів у системі, що включає сам електродвигун і комутатор. Ця періодичність визначається кутом, що відповідає комутаційному періоду. Таким чином, для сталого режиму роботи, в якому кутова швидкість ротора  $\Omega$  вважається сталою, достатньо дослідити характеристики електродвигуна в межах одного періоду. Це означає аналіз процесів в інтервалі зміни кута положення ротора. Початком такого інтервалу можна вважати момент, коли одна фаза вимикається, а інша одночасно вмикається [10].

Для інтервалу використовується наступне рівняння рівноваги напруги для фаз, що підключені до джерела живлення [11]:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$IR_{\Sigma} + E_{\Sigma} = U \quad (1.1)$$

де  $I$  - миттєва величина струму в контурі;

$U$  - напруга підведена до контуру;

$E_{\Sigma}$  - сума усіх електрорушійних сил обертання в послідовно з'єднаних фазах створюючих контур;

$R_{\Sigma}$  - еквівалентний активний опір обмотки електричного двигуна.

У реальних схемах електричних двигунів контур у межах комутаційного періоду може складатися з різної кількості фаз. Наприклад, у схемах з однією фазою (рис. 1.9, а), як у трьохфазній схемі з нереверсивним живленням, кожна фаза працює по черзі. У випадку двох послідовно з'єднаних фаз (рис. 1.9, б), таких як у трьохфазній схемі з реверсивним живленням, обидві фази діють одночасно. Якщо ж обговорюється замкнута обмотка, контур може включати кілька фаз одночасно (рис. 1.9, в).

Приймаючи припущення, що магнітна індукція в повітряному зазорі розподілена синусоїдально, електрорушійна сила обертання кожної фази також буде змінюватися за синусоїдальним законом, залежно від кута повороту ротора двигуна. Іншими словами:

$$E_i = E_m \sin(\vartheta + \vartheta_0),$$

де  $\vartheta_0$  - певний початковий кут в ел. радіанах, що визначається положенням магнітної осі ротора по відношенню до осі фази для початку інтервалу  $\vartheta = 0$ .

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$k_y$  - коефіцієнт укорочення;

$k_c$  - коефіцієнт скосу, відповідно,

$w_1, N_1$  - число провідників фази;

$P$  - число пара полюсів;

$\Phi$  - потік магніту в зазорі на пару полюсів (Вб), зчеплений із фазою;

$w_1, N_1$  - число витків;

$\Omega$  - кутова швидкість ротора (рад/с).

Для кожного з контурів (рис.1.9) сумарна електрорушійна сила обертання  $E_{\Sigma}$  буде визначатися з векторних діаграм (рис.1.10).

Загальне рівняння для результуючої електрорушійної сили зручно визначити для випадку послідовного з'єднання  $S_g$  фаз, що створюють гілку обмотки електричного двигуна. Якщо  $a$  - радіус кола, описаного навколо багатокутника із сторонами  $E_1$  то з рис.1.5, г випливає, що [11]:

$$E_{\Sigma} = 2a \sin a_2;$$

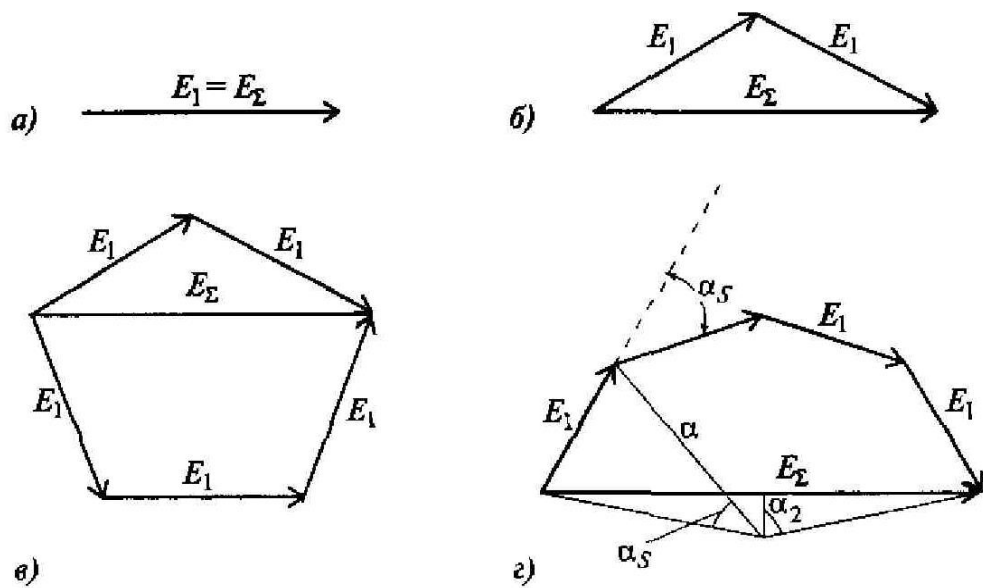
$$a = \frac{E_1}{2 \sin \frac{a_s}{2}},$$

$$a_2 = \frac{S_g a_s}{2}.$$

звідси

$$E_{\Sigma} = E_1 \frac{\sin S_g \frac{a_s}{2}}{\sin \frac{a_s}{2}}. \quad (1.3)$$

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а – контур однофазний, б – контур з двох послідовно з'єднаних фаз, в – контур замкнутий, г – діаграма сумарної електрорушійної сили  
 Рисунок 1.10 – Векторні діаграми електрорушійної сили:

Можна побачити, що кут між магнітними осями секцій променевих обмоток знаходиться наступним чином:

$$a_s = \pi / S = \vartheta_k - \text{для не парного числа секцій (фаз) } S;$$

$$a_s = 2\pi / S = \vartheta_k - \text{для парного числа секцій (фаз) } S.$$

Для замкнутих обмоток буде рівнятися:

$$a_s = 2\pi / S$$

$$a_s = \pi / S - \text{для непарних, } S'y$$

$$a_s = 2\pi / S - \text{для парних, } S.$$

Формула (1.3) є загальною для всіх схем обмоток, як променевих розімкнутих, так і замкнутих, які, як правило, застосовуються з непарним числом секцій [11].

Підставивши в (1.3) значення електрорушійної сили  $E_1$  та врахувавши (1.2) було отримано:

$$E_{\Sigma} = k_{01} \frac{\sin(S_g \frac{a_s}{2})}{\sin \frac{a_s}{2}} p \Phi w_1 \sin(\vartheta + \vartheta_0) \quad (1.4)$$

Помноживши чисельник і знаменник на число фаз (секцій) в гілці, було отримано наступний вираз:

$$E_{\Sigma} = k_{01} \frac{\sin(S_g \frac{a_s}{2})}{S_g \sin \frac{a_s}{2}} p \Phi w_{av} \sin(\vartheta + \vartheta_0), \quad (1.5)$$

$w_{av} = S_g w_1$  - число активних витків в гілці.

Для розімкнутих обмоток число активних витків всієї обмотки буде дорівнювати  $w_a = w_{av}$ .

Число фаз  $S_g = 2$  в гілці розімкнутих обмоток може бути або  $S_g = 1$  (трьохфазна з живленням не реверсивним), або  $S_g = 2$  (трьохфазна з живленням реверсивним).

Для замкнутих обмоток з не парним числом секцій (з парним числом секцій замкнуті обмотки застосовувати не слід)  $S_g = (3-1)/2$  (найменше число секцій в паралельній гілці). Таким чином, для замкнутих обмоток було отримано [11]:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\sin\left(S_g \frac{a_s}{2}\right)}{S_g \sin \frac{a_s}{2}} = \frac{\sin \frac{S-1}{2} \frac{\pi}{S}}{\frac{S-1}{2} \sin \frac{\pi}{S}} = \frac{\cos \frac{\pi}{2S}}{\frac{S-1}{2} \sin \frac{\pi}{S}} = \frac{1}{(S-1) \sin \frac{\pi}{2S}}.$$

Для замкнутих обмоток число активних витків обмотки  $w_a$ , які обтікаються струмом, і число активних витків в гілці з найменшим числом секцій пов'язані слідувачим співвідношенням:

$$w_{ав} = w_a \frac{S_g}{S} = w_a \frac{S-1}{2S}.$$

Підставивши в формулу (1.5) дані результати, було отримано електрорушійну силу замкнутої обмотки, що вміщує непарне число секцій та визначається за слідувачою формулою [11]:

$$E_{\Sigma} = \left( k_{01} \frac{1}{2S \sin \frac{\pi}{2S}} \right) p \Phi w_a \Omega \sin(\vartheta + \vartheta_0). \quad (1.6)$$

Аналогічно для розімкнутих обмоток на підставі рівняння (1.5) можна записати (оскільки  $w_{ав} = w_a$ ):

$$E_{\Sigma} = \left( k_{01} \frac{\sin S_g \frac{\vartheta_k}{2}}{S_g \sin \frac{\vartheta_k}{2}} \right) p \Phi w_g \Omega \sin(\vartheta + \vartheta_0) \quad (1.7)$$

Якщо вираз в дужках в формулах (1.6) і (1.7) позначити для всіх схем обмоток як  $k_0$  загальний обмотувальний коефіцієнт обмотки, то для всіх схем обмоток отримано наступний вираз:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

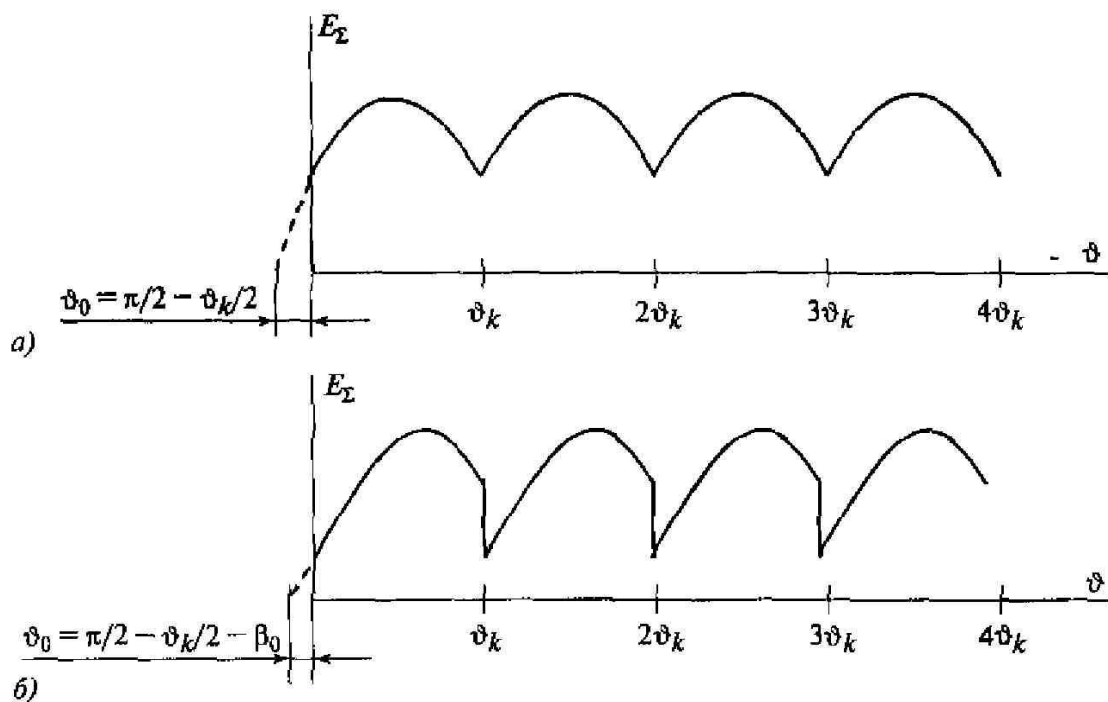
$$E_{\Sigma} = k_0 p \Phi w_g \Omega \sin(\vartheta + \vartheta_0) \quad (1.8)$$

Звернемося до рівняння рівноваги напруги (1.1) на інтервалі  $0 \leq \vartheta \leq \vartheta_k$ .

Відповідно було отримано:

$$IE_{\Sigma} + k_0 p \Phi w_a \Omega \sin(\vartheta + \vartheta_0) = U \quad (1.9)$$

Зрозуміло, що залежно від початкового кута -  $\vartheta_0$ , при якому здійснюється комутація і починається черговий цикл (період) роботи, електрорушійна сила обертання може мати на інтервалі абсолютно різну форму. Наприклад, на рис.1.11 представлено два випадки [11].



а – комутація нейтральна, б – комутація випереджуюча

Рисунок 1.11 – Електрорушійна сила електродвигуна під час ряду комутаційних інтервалів:

Перший випадок (рис.1.11, а) відповідає комутації нейтральній, коли датчик положення ротора встановлений так, що електрорушійна сила  $E_{\Sigma}$  на початку і в кінці інтервалу однакова, тобто  $E_{\Sigma}(0) = E_{\Sigma}(\vartheta_k)$ . Другий випадок (рис.1.11, б) відповідає комутації випереджаючій, коли обойма з чутливими елементами датчика положення ротора повернута назустріч напрямку обертання на певний кут  $\beta_0$ . Для цього випадку можна записати:  $E_{\Sigma}(0) < E_{\Sigma}(\vartheta_k)$ .

Випадок комутації, яка запізнюється, коли  $E_{\Sigma}(0) > E_{\Sigma}(\vartheta_k)$ , не розглядається, оскільки він не має практичного застосування [11].

Оскільки, як це впливає з рис.1.11 початкова фаза  $\vartheta_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0$ , то рівняння рівноваги напруги (формула 1.9) прийме наступний вигляд:

$$IE_{\Sigma} + k_0 p \Phi w_a \Omega \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right) = U \quad (1.10)$$

### 1.2.2 Аналіз характеристик

Момент двигуна, який виникає на ділянці, визначається електромагнітною потужністю і кутовою швидкістю самого ротора. Тоді, можна записати, враховуючи, що електромагнітна потужність описується виразом  $P_0 = E_{\Sigma} I$ :

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{E_{\Sigma} I}{\Omega} = k_0 p \Phi w_a I \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right) \quad (1.11)$$

Формули (1.10), (1.11) дозволяють визначити як миттєві величини струму

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і моменту на періоді  $\vartheta_k$  так і їх середні значення за весь період [11, 12].

Найбільший інтерес для оцінювання характеристик електродвигуна представляють середні значення величин.

З формул (1.10) та (1.11) можна знайти наступні середні величини:

- середній струм, що споживається електродвигуном:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{\vartheta_k} \int_0^{\vartheta_k} I d\vartheta; \quad (1.12)$$

- середню потужність, що споживається електричним двигуном:

$$\langle P \rangle = U \langle I \rangle; \quad (1.13)$$

- середній електромагнітний момент електродвигуна:

$$\langle M \rangle = k_0 p \Phi w_a \frac{1}{\vartheta_k} \int_0^{\vartheta_k} \left( I \cos \left( \vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0 \right) \right) d\vartheta; \quad (1.14)$$

- середню електромагнітну потужність електродвигуна:

$$\langle P_e \rangle = \langle M \rangle \Omega \quad (1.15)$$

- середні втрати в міді обмотки електродвигуна:

$$\langle P_M \rangle = R_{\Sigma} \frac{1}{\vartheta_k} \int_0^{\vartheta_k} I^2 d\vartheta; \quad (1.16)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- середній електромагнітний ККД електродвигуна:

$$\eta = \frac{\langle P_e \rangle}{\langle P \rangle}; \quad (1.17)$$

Але, перш ніж здійснювати розрахунки за зазначеними формулами, слід привести вираз рівноваги напруги на періоді (1.10) і вираз моменту (1.11) до безрозмірної форми [11, 12].

Як базову величину було обрано пусковий струм  $I_n$  визначений з наступної умови:

$$I_n R_{\Sigma} = U. \quad (1.18)$$

Як базову величину визначено кутову швидкість  $\Omega_g$ :

$$U = k_0 p \Phi w_a \Omega_g. \quad (1.19)$$

Як базову величину визначено рівністю момент  $M_g$ :

$$M_g = k_0 p \Phi w_a I_n. \quad (1.20)$$

Далі слід ввести безрозмірні величини:

- співвідношення моменту  $\mu = \frac{M}{M_n}$ ;

- співвідношення струму  $i = \frac{I}{I_n}$ ;

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- співвідношення швидкості  $w = \frac{\Omega}{\Omega_g}$ ;

- співвідношення електромагнітної потужності на валу двигуна  $p_g = M\Omega / M_g\Omega_g$ ;

- співвідношення потужності, що споживається  $p = UI / UI_n = i$ .

Розділивши всі члени рівняння рівноваги напруг (1.10) на напругу  $U$ , виражену в відповідності з формулами (1.18) і (1.19), а вираз (1.11) поділивши на моменти  $M_g$ , що визначені з (1.20), прийдемо до наступного безрозмірного запису:

$$i + \omega \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right) = 1; \quad (1.21)$$

$$\mu = i \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right).$$

Звідси на періоді  $0 \leq \vartheta \leq \vartheta_k$  миттєвий струм і миттєвий момент електродвигуна будуть рівнятися:

$$i = 1 - \omega \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right); \quad (1.22)$$

$$\mu = \cos\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right) - \omega \cos^2\left(\vartheta - \frac{\vartheta_k}{2} - \beta_0\right).$$

Струм і момент електродвигуна на періоді  $\vartheta_k$  носять нерівномірний характер і вміщують пульсуючі складові. На рис.1.12 в відповідності з виразом (1.22) наведено характер зміни струму та моменту при швидкості  $\omega = 0,7$ , а також характер зміни пускового моменту при  $\omega = 0$ . Криві побудовані для

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\vartheta_k = 2/3\pi$  (трьохфазний електродвигун з не реверсивним живленням фаз). Звідси можна побачити, що при швидкості  $\omega = 0,7$  момент не так сильно пульсує, як при швидкості  $\omega$ , що дорівнює або є близькою до нуля [11, 12].

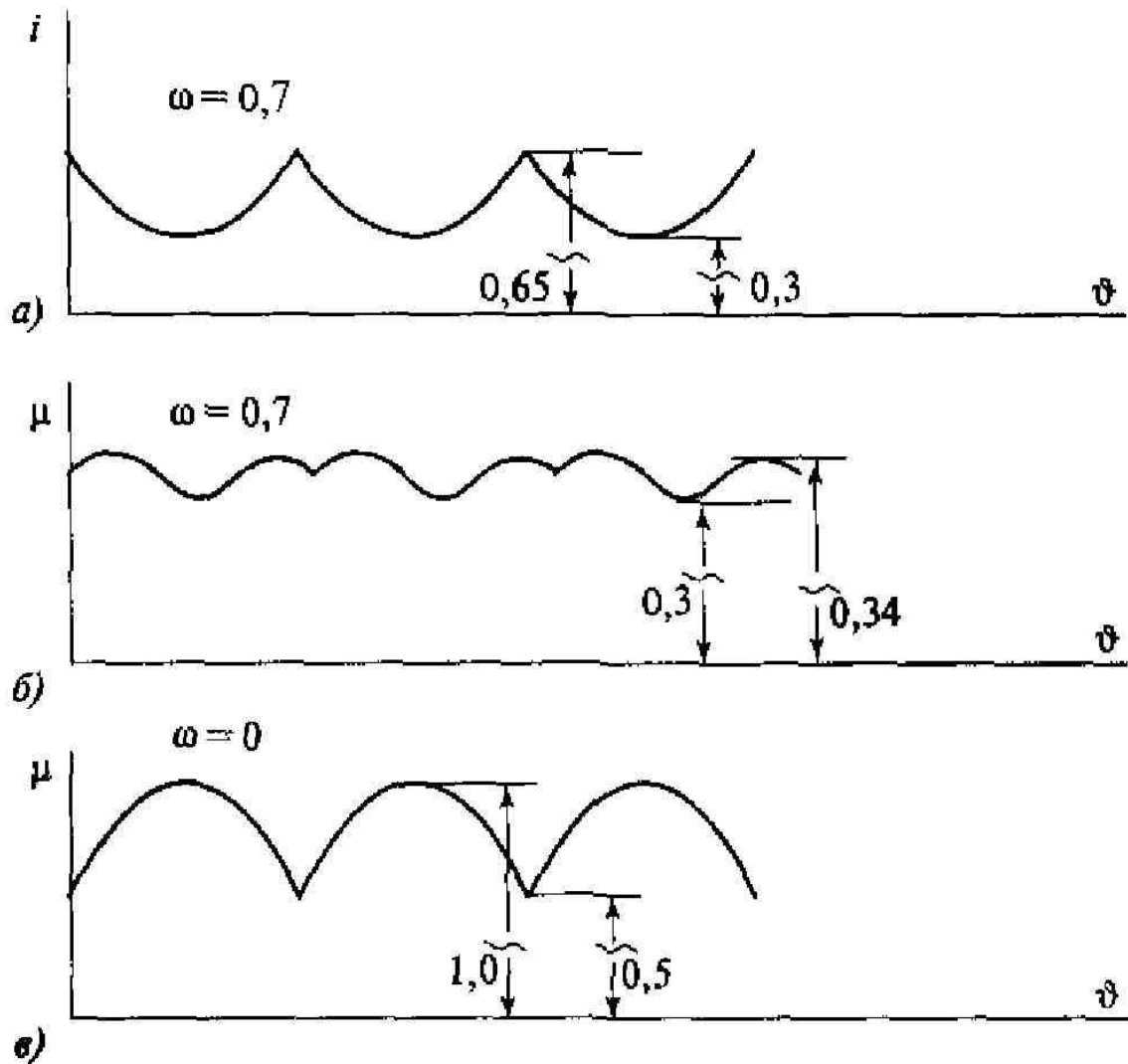


Рисунок 1.12- Графіки зміни струму і моменту електродвигуна залежно від кута повороту ротора

З виразу (1.22) середній струм і середня потужність, що споживається від джерела живлення будуть знаходитися наступним чином:

$$\langle i \rangle = \langle p \rangle = \int_0^{\vartheta_k} i d\vartheta = 1 - \omega \frac{\sin \frac{\vartheta_k}{2}}{\frac{\vartheta_k}{2}} \cos \beta_0. \quad (1.23)$$

Середній електромагнітний момент електродвигуна знаходиться із наступної формули:

$$\langle \mu \rangle = \frac{1}{\vartheta_k} \int_0^{\vartheta_k} \mu d\vartheta = \frac{\sin \frac{\vartheta_k}{2}}{\frac{\vartheta_k}{2}} \cos \beta_0 - \frac{1}{2} \omega \left( 1 + \frac{\sin \vartheta_k}{\vartheta_k} \cos 2\beta_0 \right). \quad (1.24)$$

З формули (1.24) може бути встановлена швидкість ідеального холостого ходу двигуна. Припустивши, що  $\mu_{cp} = 0$ , можна знайти:

$$\omega_0 = \frac{2}{1 + \frac{\sin \vartheta_k}{\vartheta_k} \cos 2\beta_0} \frac{\sin \frac{\vartheta_k}{2}}{\frac{\vartheta_k}{2}} \cos \beta_0. \quad (1.25)$$

### 1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі здійснено аналітичний огляд конструктивних особливостей, будови та принципу роботи вентильних електричних двигунів. Детально розглянуто їхню конструкцію, описано електромагнітні процеси, що відбуваються під час роботи, а також досліджено основні робочі характеристики вентильних електродвигунів.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІІ СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ

### 2.1 Аналіз існуючих схем для дослідження вентильних електричних двигунів

Вентильний електричний двигун із змінною структурою електричного перетворювального вузла дозволяє адаптивно змінювати конфігурацію з'єднання секцій обмотки для оптимізації його характеристик. Аналіз механічних властивостей таких двигунів з послідовним і паралельним підключенням секцій свідчить, що досягнення механічної характеристики, близької до рівної потужності, можливе завдяки автоматичному переключенню секцій обмотки між цими конфігураціями. Це переключення здійснюється залежно від кута повороту ротора, частоти обертання або споживаного струму [13, 14].

На рис.2.1 показана електрична схема вентильного двигуна із змінною структурою, де переключення секцій обмотки виконується за допомогою перемикача, який включає транзистори VT5, VT6 і діод VD1. Якорна обмотка двигуна складається з чотирьох секцій L1–L4, розташованих з кутовим зсувом на 90°. У кожній парі (L1, L2 і L3, L4) секції з'єднані послідовно та підключені до колекторів транзисторів VT1–VT4 через діод VD1. Транзистор VT5 типу NPN підключений до анода діода VD1 і негативного затискача джерела живлення, а транзистор VT6 типу PNP - до катода діода VD1 і позитивного затискача джерела.

Коли транзистори VT5 і VT6 вимкнені, секції якорної обмотки з'єднуються попарно послідовно через діод VD1 і транзистори VT1–VT4. У такому режимі напруга  $U$  врівноважується сумарною електрорушійною силою двох послідовно підключених секцій.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



рівної потужності (рис. 2.2).

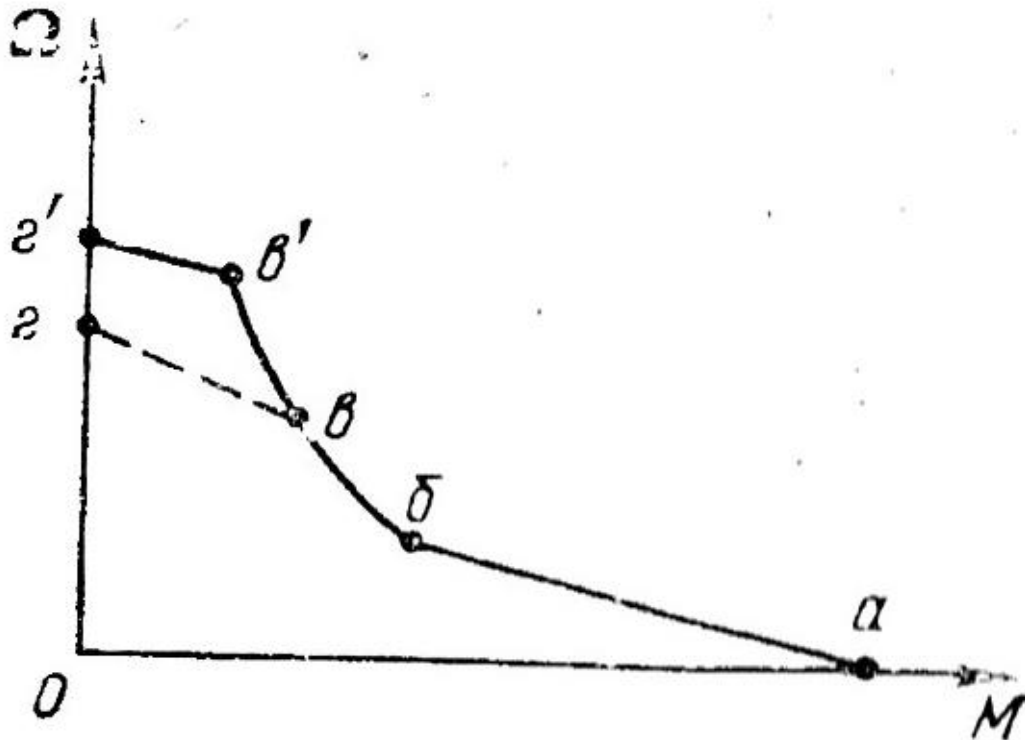


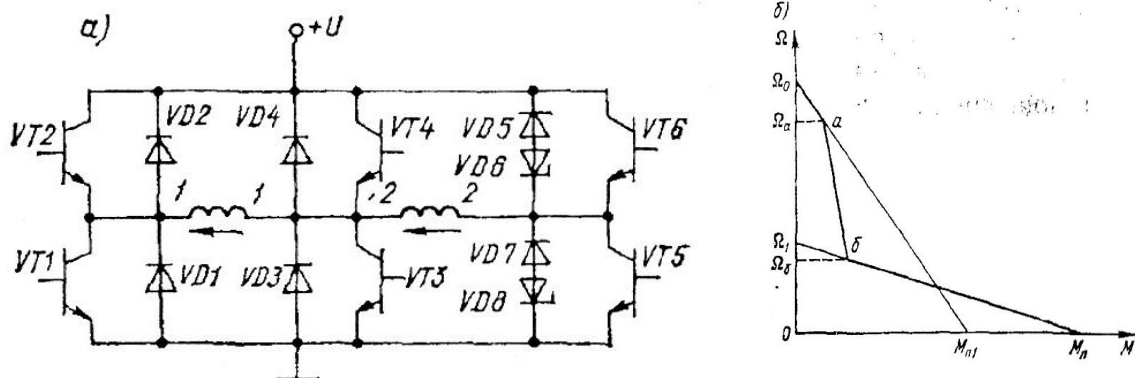
Рисунок 2.2 – Механічна характеристика вентильного електродвигуна зі змінною структурою

У вентильному електричному двигуні зі змінною структурою та фазованими джерелами додаткової напруги (рис. 2.3) транзистор VT5 типу NPN підключений емітером до негативного полюса джерела живлення, а колектором – до виводу першої обмотки дроселя L5. Аналогічно, транзистор VT6 типу PNP з'єднаний емітером із позитивним полюсом джерела живлення, а колектором – із виводом другої обмотки дроселя L5, яка має однойменний кінець із першою обмоткою, з'єднаною із транзистором VT6. Інші кінці обмоток дроселя L5 підключені відповідно до анода і катода діода VD1 [13, 14].

Управління транзисторами VT5 і VT6 здійснюється через порогові пристрої П1 і П2. Сигнали для цих пристроїв генеруються шляхом



кількість витків змінюватиметься не вдвічі, а в задану кількість разів, що перевищує два [13, 14].



*a* – схема принципова з фаз; *б* – механічна характеристика.

Рисунок 2.4 – Вентильний електродвигун з секційними обмотками:

На рис. 2.4, представлено схему силової частини комутатора для однієї з фази вентиляційного електродвигуна. На статорі двигуна розташовані дві співвісні двофазні обмотки з кількістю витків у фазі, що відповідає значенню  $\omega_{11}$  і  $\omega_{22}$ .

Механічна характеристика такого двигуна наведена на рис. 2.4, б. Робота двигуна здійснюється наступним чином. На ділянці механічної характеристики, що відповідає режиму обмеження струму, функціонує обмотка 1-1, струм у якій комутується транзисторами VT1-VT4. У точці б, за сигналом від датчика частоти обертання, до обмотки 1-1 послідовно підключається обмотка 2-2. На ділянці механічної характеристики  $bM_{\pi}$  струм у послідовно з'єднаних обмотках 1-1 і 2-2 комутується транзисторами VT1, VT2, VT5, VT6, при цьому транзистори VT3 і VT4 залишаються замкненими [13, 14].

Стабілітрони VD6 і VD8, увімкнені послідовно зі зворотними діодами VD5 і VD7, запобігають замиканню електрорушійної сили обертання, що

наводиться в обмотці 2-2 під час роботи двигуна в діапазоні частот  $\Omega_0 - \Omega_6$ . Співвідношення кількості витків  $w_{11}$  і  $w_{22}$  визначає діапазон частот обертання, у якому забезпечується режим постійної потужності на валу. Точка а, у якій двигун переходить у режим обмеження споживаного струму, вибирається для досягнення найкращого наближення характеристики до лінії постійної механічної потужності. Таким чином, застосування принципу секціонування обмоток дозволяє надати вентильному двигуну властивості колекторного двигуна з послідовним збудженням [13-18].

У цій магістерській роботі обрано схему управління вентильним електродвигуном за допомогою мікроконтролера, оскільки на сучасному етапі це є найефективнішим, доцільним і зручним способом керування.

## 2.2 Створення електричної схеми стенда для дослідження вентильного електродвигуна

Електрична схема – це документ, що відображає електричні з'єднання між компонентами електричних пристроїв [19, 20]. Основне призначення електричної схеми полягає в наданні зрозумілого уявлення про принцип роботи конкретного електричного пристрою або кола. Наявність електричної схеми дозволяє:

- виконувати монтаж або збирання установки (кола) згідно зі схемою;
- проводити перевірку правильності монтажу та уникати помилок під час пуско-налагоджувальних робіт;
- здійснювати діагностику та усувати несправності під час ремонтних робіт.

Електричні схеми поділяються на кілька типів залежно від рівня деталізації технічних відомостей про будову та принцип роботи пристроїв [19,

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20]. Вони можуть бути повними або загальними, залежно від призначення схеми.

Типи електричних схем: структурні; функціональні; принципіві; монтажні.

Існують суворі нормативні документи, які визначають правила виконання (креслення) електричних схем. На даний час таким стандартом є ГОСТ 2.702-2011, який є обов'язковим для всіх типів електричних схем.

Розроблена електрична схема стенду для дослідження вентильного електричного двигуна представлена на рис.2.5 (аркуш [МРМА24.00.00.000Е1]).

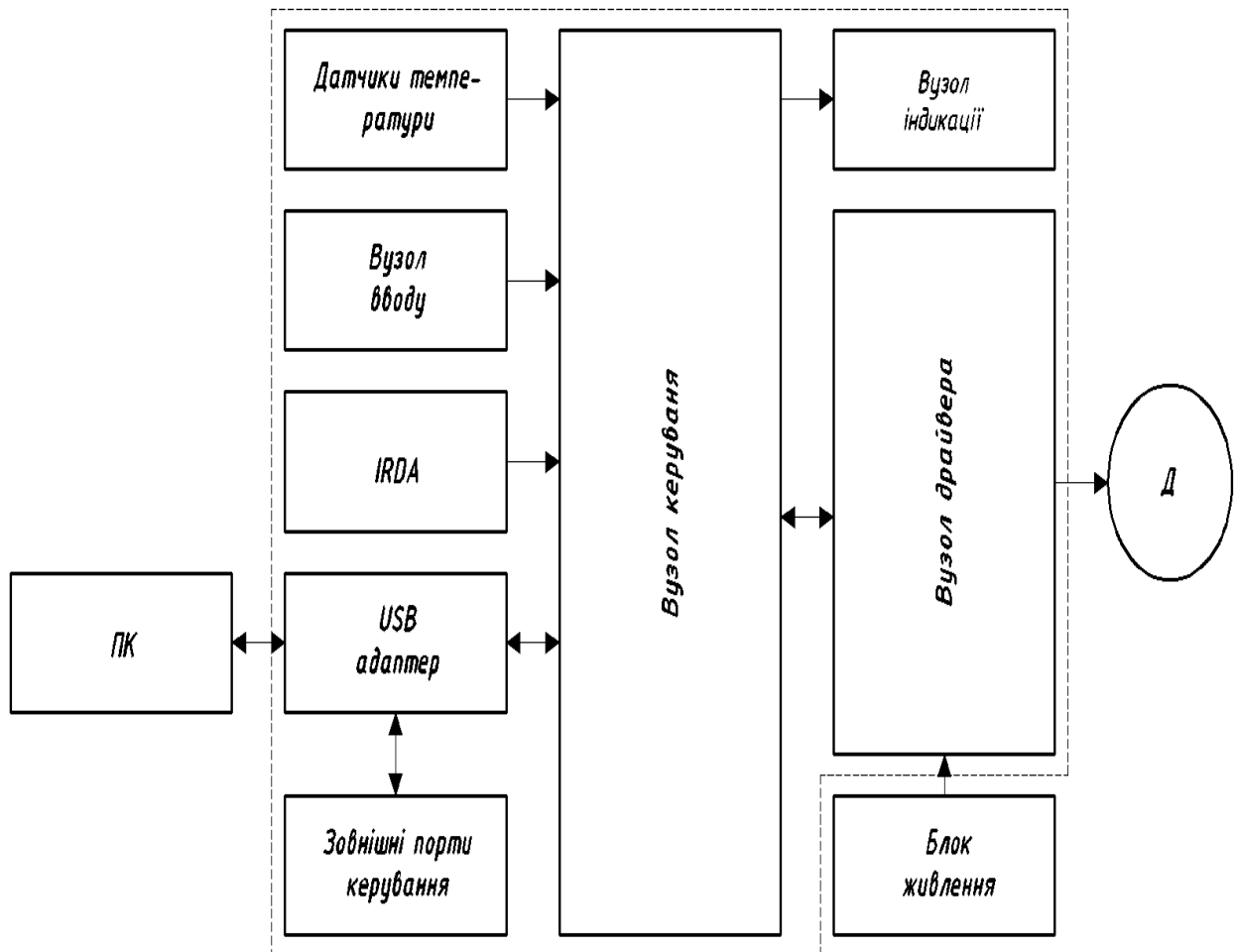


Рисунок 2.5 – Схема електрична структурна стенду для дослідження вентильного двигуна

Основними компонентами цього стенду є: вентильний двигун, вузол драйвера, вузол індикації, блок живлення, вузол керування, датчик температури, вузол введення, USB-адаптер, зовнішні порти керування, а також персональний комп'ютер.

### 2.3 Склад і призначення вузлів стенда для дослідження вентильних електродвигунів

Вузол введення призначений для керування електричним вентильним двигуном. Введення параметрів здійснюється у ручному режимі, з клавіатури (рис.2.6) [21-23].

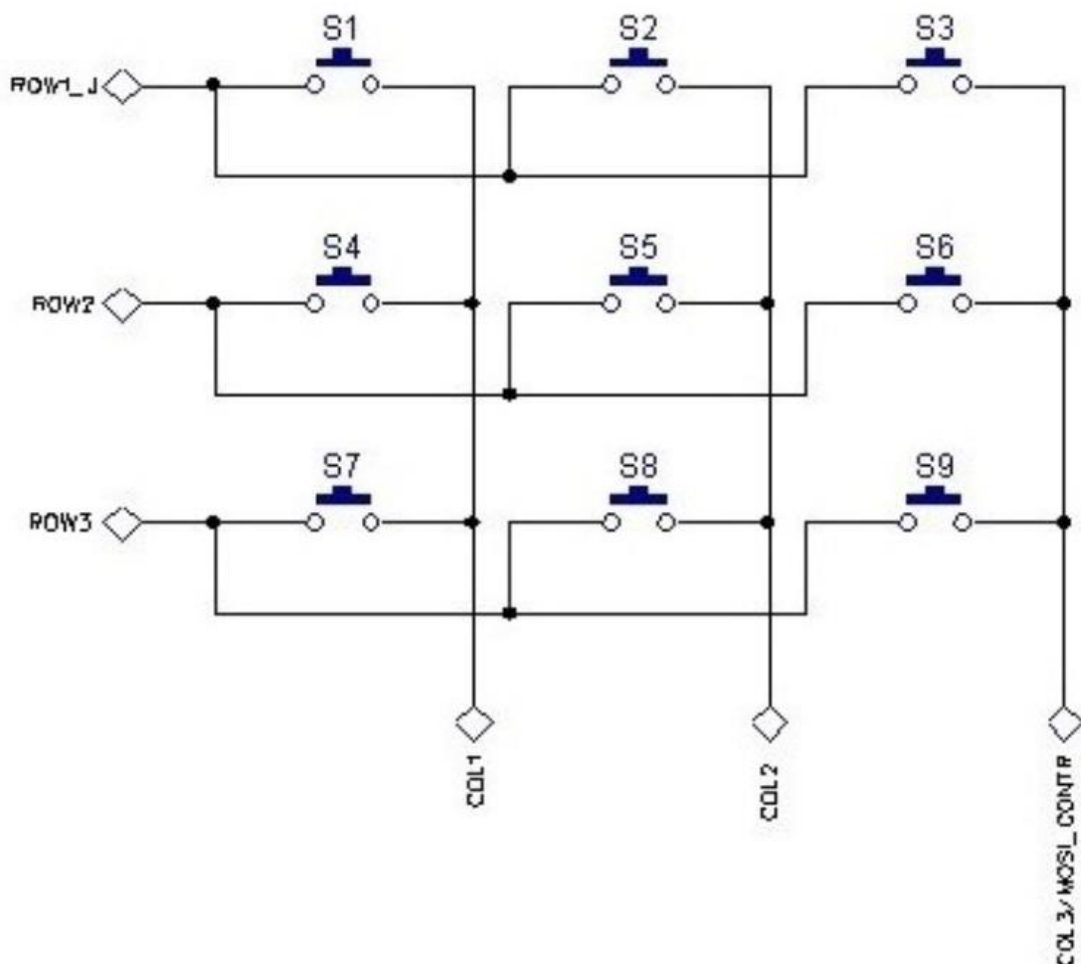


Рисунок 2.6 – Вузол вводу параметрів

Вузол керування призначений для прийняття даних з усіх вузлів, обробці даних, і управління усім стендом (рис.2.7).

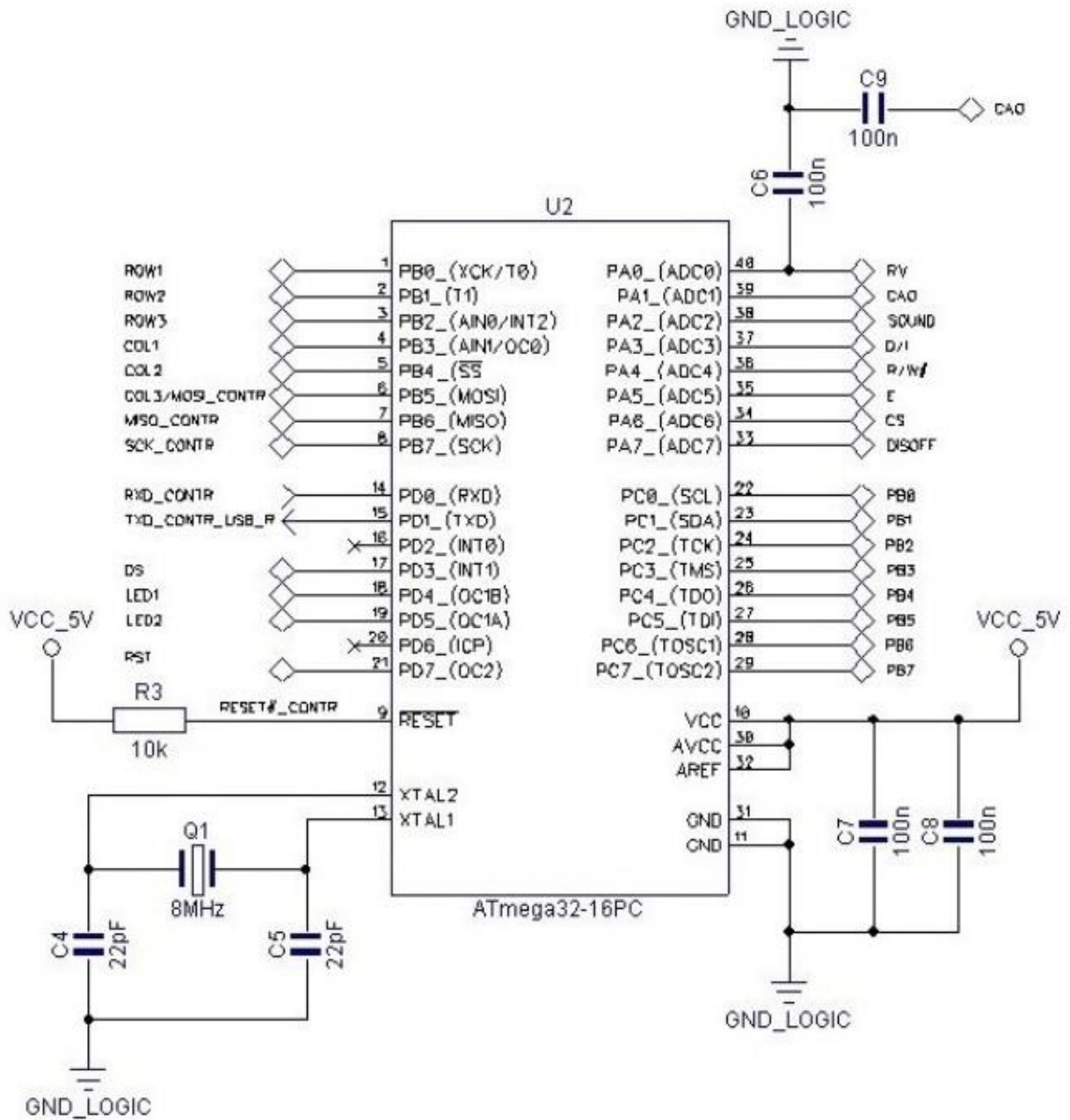


Рисунок 2.7- Вузол керування стенду для дослідження  
вентильного двигуна

Вузол стабілізації призначений для [24]:

- U1 стабілізації напруги електричного двигуна;
- U2 в свою чергу стабілізує напругу схеми (рис.2.8).

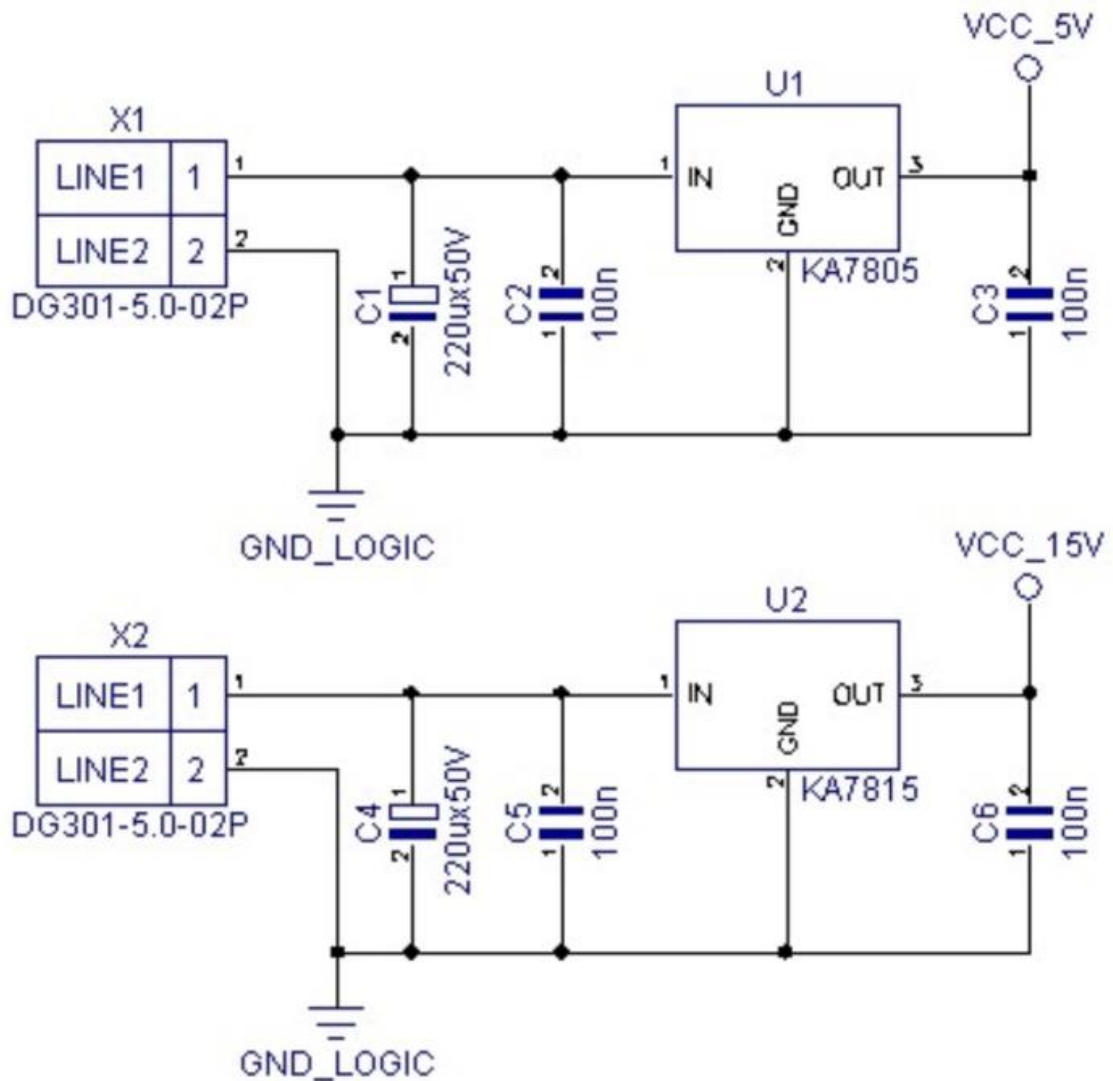


Рисунок 2.8 – Вузли стабілізації стенду для дослідження  
вентильного двигуна

Вузол драйвера призначений для забезпечення уникнення короткого замикання між фазами вентильного двигуна. Вузол драйвера складеться із наступних частин: драйвера ключів; вихідних та вхідних ключів; контролера.

Вузол вихідних ключів призначений для комутації фаз двигуна у послідовності, що, в свою чергу, і створює в ньому магнітне обертове поле (рис.2.9).

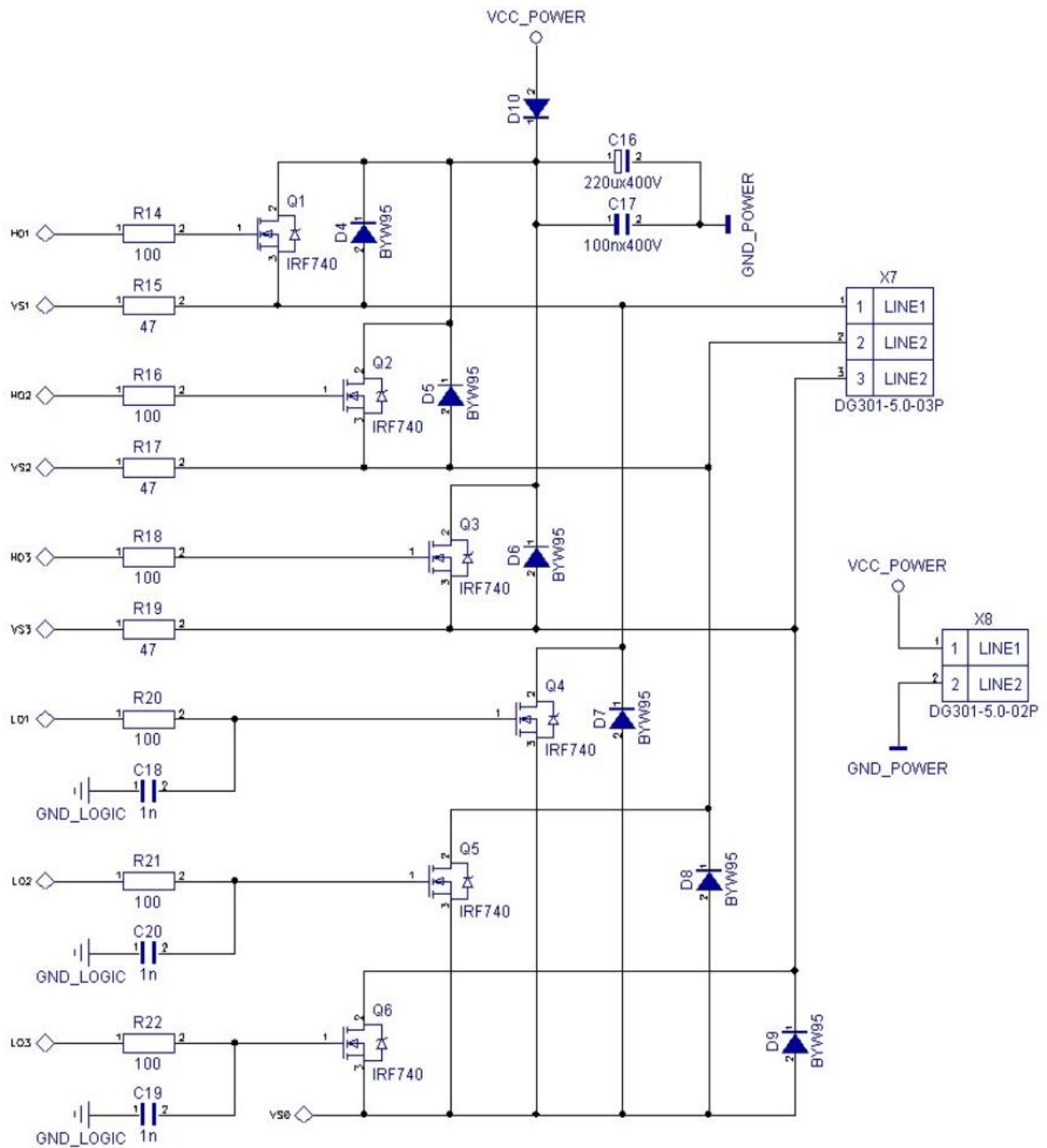


Рисунок 2.9 – Вузол вихідних ключів стенду для дослідження  
вентильного двигуна





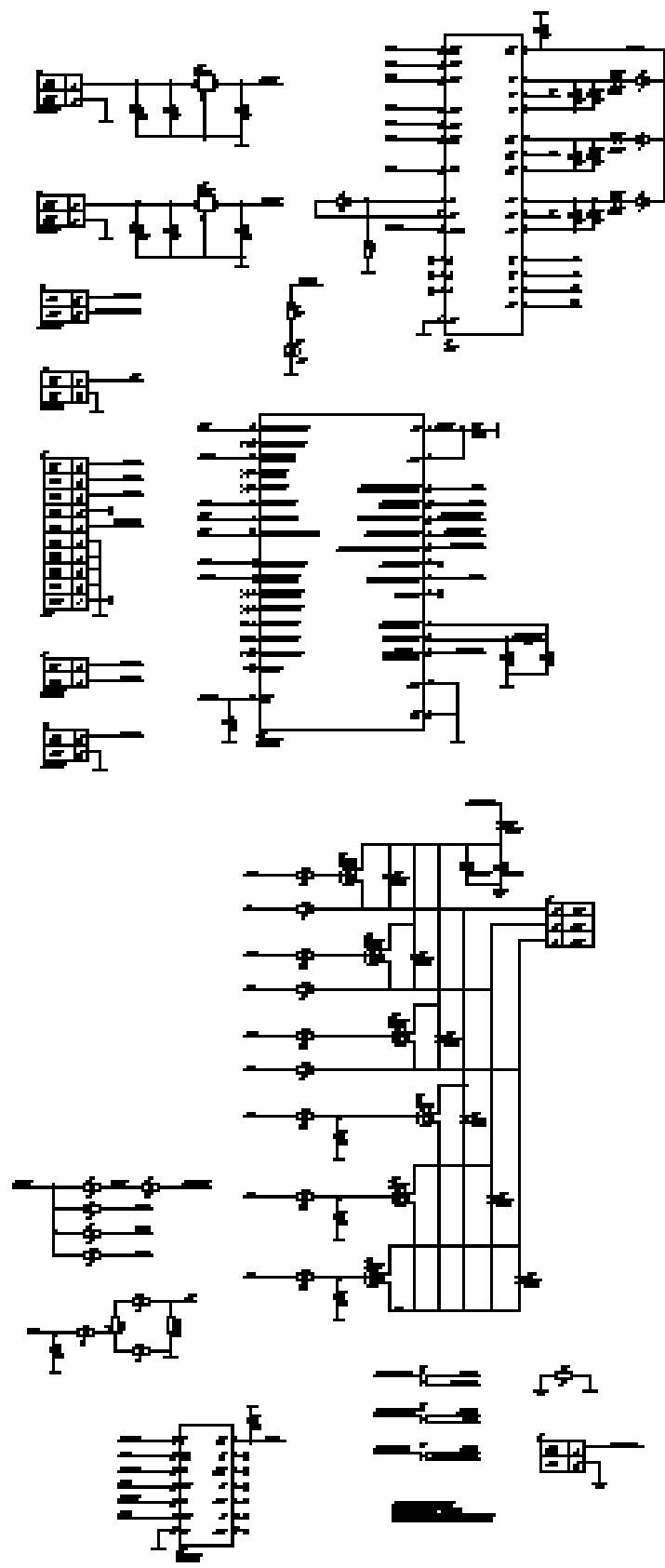


Рисунок 2.12 – Схема електрична принципова драйвера

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

## 2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано аналіз існуючих схем, призначених для дослідження вентильних електричних двигунів, з метою виявлення їх особливостей та переваг. Проведено детальну розробку електричної схеми, яка забезпечує оптимальні умови для дослідження функціональних характеристик даного типу пристроїв. Розділ також містить детальний опис ключових вузлів розробленої системи, їх взаємозв'язків та принципів роботи. Особливу увагу приділено забезпеченню надійності роботи схеми, її адаптивності до різних режимів експлуатації та можливості інтеграції з сучасними інструментами вимірювання та контролю.

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 3 КОНСТРУКЦІЯ, ФУНКЦІОНАЛ І РОБОТА СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕНТИЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

### 3.1 Розробка та виготовлення друкованої плати

Для створення друкованих плат у схемах управління вентилями електродвигунами використовується програмне забезпечення DipTrace. Ця програма, розроблена українською компанією "Новарм", є багатофункціональним інструментом для розробки принципових схем і друкованих плат [25].

DipTrace - це повний набір інструментів для наскрізного проектування, який включає:

- редактор схем (Schematic) для створення електричних схем із підтримкою ієрархії та багатосторінкових проєктів;
- редактор друкованих плат (PCB Layout) з інструментами автотрасування, ручного трасування і позиціонування компонентів;
- редактор корпусів (Pattern Editor) для створення корпусів компонентів і їх бібліотек;
- редактор компонентів (Component Editor) для створення символів і зв'язування їх із корпусами.

Ця система також включає 3D-редактор для попереднього перегляду друкованих плат і функції імпорту/експорту з популярних програм, таких як P-CAD, PADS, а також експорт у формати Gerber.

Основні переваги DipTrace:

- інтуїтивно зрозумілий дизайн дозволяє швидко освоїти програму навіть новачкам;
- за допомогою автотрасувальника можна швидко створювати друковані

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Завдяки підтримці багаторівневої ієрархії та багатосторінкових схем, DipTrace дозволяє швидко розробляти навіть складні принципові схеми. Функції перетворення схем у плату, оновлення проекту після змін і зворотна анотація виконуються всього одним кліком. Підсвічування об'єктів під час роботи та наявність покрокового підручника роблять процес проектування ще простішим.

## 2. Зручне розташування компонентів.

Інструменти "Упорядкування", "Позиціонування за списком" і "Автоматична розстановка компонентів" забезпечують швидке і точне розташування компонентів та оптимізацію розмірів плати.

## 3. Сучасні можливості трасування

- безсітковий автотрасувальник дозволяє швидко створювати складні багат шарові плати;
- сітковий трасувальник підходить для простих одношарових плат із перемичками;
- підтримка Specstra DSN/SES дозволяє використовувати зовнішні трасувальники;
- інструменти ручного трасування забезпечують гнучкість і точність у створенні нестандартних плат;
- розмір плат у DipTrace не обмежується.

## 4. Всебічна перевірка проекту.

DipTrace надає інструменти для перевірки на всіх етапах створення проекту:

- автоматизована перевірка нових компонентів у бібліотеках;
- аналіз допустимості з'єднань у схемі (ERC);
- перевірка зазорів, розмірностей і можливих помилок на платі (DRC);
- перевірка цілісності з'єднань і порівняння зі схемою.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виявлені помилки виводяться у вигляді списку та можуть бути виправлені одразу з перезапуском перевірки.

#### 5. 3D-візуалізація друкованих плат.

Завдяки функції тривимірного попереднього перегляду можна моделювати зовнішній вигляд готового виробу, виявляючи недоліки конструювання до передачі у виробництво. Апаратне прискорення графіки дозволяє обертати та масштабувати модель у реальному часі. У програму включено понад 2,5 тисячі 3D-моделей корпусів.

Використання DipTrace у створенні плат для стенду [25.]

DipTrace надає можливості для:

- розташування компонентів на платі;
- трасування друкованих провідників і створення ескізів плати;
- перевірки з'єднань дорожок і посадкових місць.

Основні способи створення рисунка плати на виробництві.

DipTrace підтримує кілька методів створення друкованих плат:

- офсетний друк - перенесення зображення рисунка на заготовку за допомогою офсетних форм;
- трафаретний друк - використання трафаретів для друку рисунка;
- фотографічний метод - застосування світлочувливих матеріалів для експонування;
- пресування - створення рельєфної поверхні на основі плати.
- ксерографічний метод - нанесення рисунка за допомогою напівпровідникового шару.
- гравірування - фрезерування рисунка за допомогою координатного пристрою;
- штамповка - вирубування рисунка з фольги за допомогою спеціального штампа;

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- малювання вручну - створення зображення рисунка вручну.

DipTrace забезпечує ефективність і гнучкість у роботі як для професійного, так і для навчального використання.

У лабораторії кафедри машин, апаратів, електромеханічних та енергетичних систем друковані плати виготовлялися відповідно до наступної технології:

Етапи виготовлення друкованих плат [26].

#### 1. Розробка та друк плати.

Проект друкованої плати створювався у програмі DipTrace. Далі рисунок плати в дзеркальному відображенні друкувався на глянцевому папері за допомогою лазерного принтера.

#### 2. Перенесення рисунка на фольгований текстоліт.

За допомогою електричної праски, нагрітої до температури 110–140 °С, рисунок з паперу переносився на зачищену пластину з фольгованого склотекстоліту.

#### 3. Травлення плати.

Готувався травильний розчин на основі мідного купоросу ( $\text{CuSO}_4$ ) або хлорного заліза. Температура розчину підтримувалася на рівні 70–80 °С.

Після розмочування паперу в теплій воді плату занурювали в розчин на 40–60 хвилин, підтримуючи стабільну температуру близько 75 °С.

#### 4. Зняття залишків тонера.

З витравленої плати розчинником видаляли шар тонера, а плату промивали мильним розчином.

#### 5. Свердління, луження та паяння.

У платі свердлили отвори необхідного діаметра, лудили доріжки та встановлювали елементи згідно зі схемою.

На аркуші [МРМА24.00.00.000ДІ1] наведена плата драйвера, а на аркуші

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[МРМА24.00.00.000ДІ2] - плати інших електричних схем стенду для дослідження вентильного електричного приводу.

Монтаж електрорадіоелементів (ЕРЕ) [27].

Монтаж друкованих плат починався з установки електрорадіоелементів та інтегральних схем. Процес складався з наступних операцій.

1. Подача компонентів. Елементи подавалися в зону монтажу.
2. Орієнтація виводів. Виводи елементів узгоджувалися з монтажними отворами.
3. Фіксація компонентів. Елементи закріплювали у необхідному положенні.

Послідовність монтажу.

Електрорадіоелементи встановлювали у такому порядку:

- резистори;
- конденсатори;
- мікросхеми.

Компоненти розташовували на стороні плати, де немає друкованих провідників, що значно спрощувало процес паяння.

Кріплення компонентів.

Елементи закріплювали переважно за допомогою їхніх виводів:

- виводи вставляли у монтажні отвори та підгинали;
- з'єднували їх із друкованими провідниками методом паяння, забезпечуючи механічну міцність і надійний електричний контакт.

Особливості автоматизації.

Монтаж і паяння можуть здійснюватися на автоматизованих лініях, але їх використання доцільне лише для серійного або масового виробництва, оскільки такі пристрої мають високу вартість.

Паяння.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для паяння використовувався електричний паяльник із напругою не більше 36 В. У якості паяльних матеріалів застосовувалися припій ПОС-61 та каніфоль [28].

На аркуші [МРМА24.00.00.000МК] наведені монтажні плати електричних схем стенду для дослідження вентиляного електричного приводу.

### 3.2 Розробка та виготовлення корпусу стенда для управління вентиляним електричним двигуном

Опис конструкції корпусу стенду для управління вентиляним електродвигуном.

Корпусу стенду для управління вентиляним електродвигуном має наступні компоненти:

- основний корпус із передньою, верхньою, нижньою та двома боковими стінками;
- шість друкованих плат;
- клеми для підключення електродвигуна, датчика температури, джерела живлення та додаткової периферії;
- роз'єм для підключення програматора;
- USB-роз'єм;
- пульт дистанційного управління.

Конструкція передньої стінки.

Передня стінка виготовлена з оргскла товщиною 4 мм. Вона з'єднує між собою такі компоненти:

- друковану плату драйвера,
- друковану плату контролера,
- друковану плату адаптера USB,
- друковану плату випрямних мостів,

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- друковану плату роз'ємів для програмування,
- друковану плату приймача IRDA.

Елементи з'єднуються за допомогою гвинтів М3. Крім цього, на передній стінці розміщені елементи управління.

Особливості кріплення.

Для забезпечення відстані між оргсклом і друкованими платами використовуються металеві трубки з зовнішнім діаметром 6 мм і внутрішнім 4 мм. Це дозволяє уникнути контакту верхньої частини трубок із радіoeлементами. Кріплення транзисторів до плати виконується гвинтами, що забезпечує надійний контакт.

Переваги конструкції.

Продумана конструкція корпусу забезпечує:

- зручність у монтажі компонентів,
- швидкий доступ для огляду та обслуговування,
- легкість налагодження пристрою,
- можливість ознайомлення з будовою системи.

Функціональність.

За допомогою роз'ємів корпус дозволяє підключати:

- вентильний електродвигун,
- датчик температури,
- зовнішню периферію,
- персональний комп'ютер,
- джерело живлення.

Ця конструкція сприяє ефективній роботі пристрою та забезпечує зручність його використання для досліджень і налаштувань.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3 Опис функціоналу стенду для дослідження вентильних електродвигунів

Пристрій забезпечує наступний набір функцій:

- встановлення напряму обертання вентильного електродвигуна;
- регулювання швидкості обертання у відсотковому співвідношенні до номінальної швидкості;
- захист від перегріву з можливістю налаштування критичної температури;
- захист від перевантажень;
- захист від короткого замикання;
- вибір режимів управління;
- управління через IRDA та USB інтерфейси.

### 3.4 Опис функцій клавіатури

Схема клавіатури для керування драйвером наведена на рис.3.2. Опис функцій клавіатури представлений в табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Опис функцій клавіатури

№ поз.	Опис
1	2
S1	Зменшення швидкості обертання електричного вентильного двигуна в режимі управління швидкістю від клавіатури
S2	Переміщення вгору меню

Продовження табл.3.1.

1	2
S3	Збільшення швидкості обертання вентильного електродвигуна в режимі керування швидкістю від клавіатури
S4	Переміщення вліво меню
S5	Вибір функції
S6	Переміщення вправо меню
S7	Повернутися назад на крок
S8	Переміщення до низу меню
S9	Переключення в ручний режим керування

### 3.5 Порядок роботи з пристроєм

Налаштування та робота драйвера.

Драйвер за замовчуванням працює у внутрішньому режимі управління з мінімальною частотою обертання, встановленою на рівні 20%. Інші параметри можуть бути збережені в пам'яті EEPROM, зокрема:

- напрям обертання;
- час розгону;
- гранична температура для захисту від перегріву;
- поріг перевищення струму для захисту.

Алгоритм роботи після увімкнення.

#### 1. Перевірка підключення датчика температури.

Якщо датчик підключено, функції, пов'язані із контролем температури, активуються.

У разі відсутності датчика ці функції будуть недоступні.

## 2. Режим готовності до запуску.

У цьому режимі користувач може:

- задати стартову частоту обертання;
- встановити напрям обертання;
- визначити критичну температуру для захисту;
- активувати захист від перегрівання.

## 3. Режим роботи.

Під час роботи електродвигуна доступна функція зміни частоти обертання.

## 4. Розширене управління через ПК.

При підключенні до персонального комп'ютера користувач може передавати більше команд і виконувати додаткові налаштування відповідно до запрограмованого функціоналу.

Цей підхід забезпечує гнучкість управління та широкий спектр можливостей для адаптації пристрою під конкретні задачі.

### 3.6 Опис елементів управління стендом

Розміщення елементів керування на передній панелі стенду наведено на рис.3.2.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

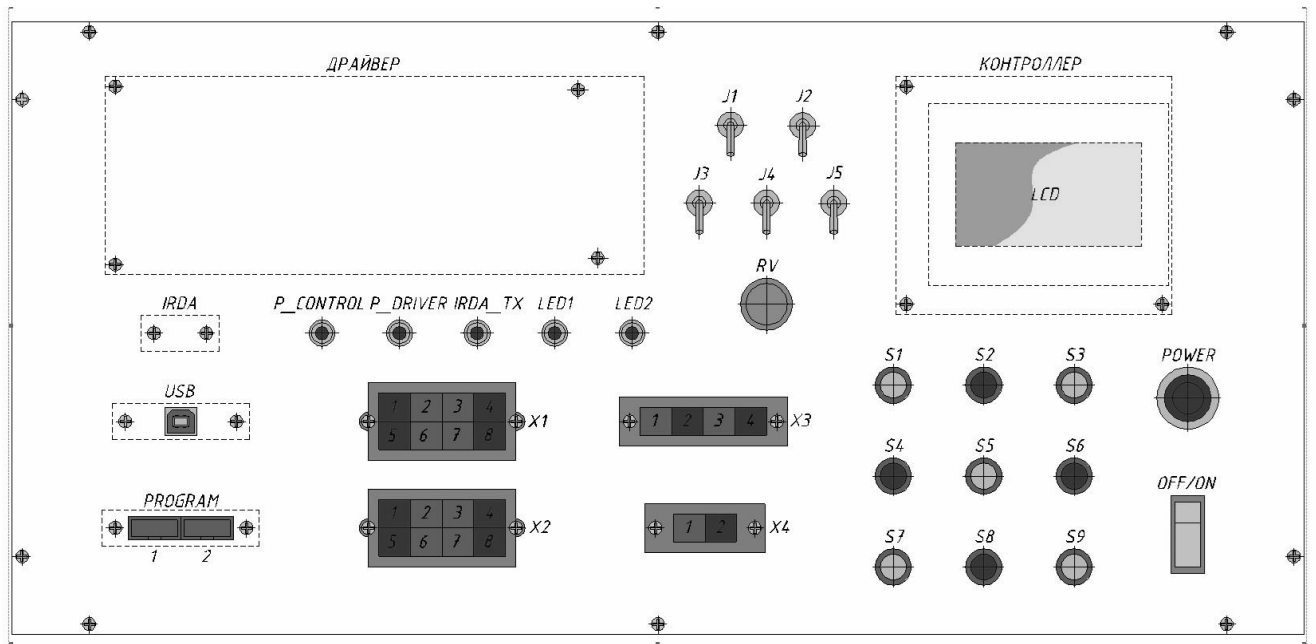


Рисунок 3.2 – Розміщення елементів управління на передній панелі стенду для дослідження вентильного електродвигуна

Опис елементів керування стендом для дослідження вентильного електричного приводу показано в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Опис елементів керування стендом для дослідження вентильного електроприводу

№ поз.	Опис
1	2
IRDA	Місце для кріплення приймача IRDA
USB	Місце для кріплення адаптера USB
PROGRAM 1	Роз'єм для програмування контролера плати драйвера
PROGRAM 2	Роз'єм для програмування контролера плати керування

Продовження табл.3.2.

1	2
P_CONTROL	Індикатор наявності живлення на платі керування
P_DRIVER	Індикатор про наявність живлення на платі драйвера
IRDA_TX	Індикатор передачі даних по IRDA
LED1, LED2	Допоміжні світлодіоди
X1.1-X1.6	Цифрові входи/виходи від самої плати адаптера USB для додаткового підєднання зовнішньої периферії
X1.7	Плюс живлення (+5V)
X1.8	Спільний провід
X2.1	Фаза U електричного двигуна
X2.2	Фаза V електричного двигуна
X2.3	Фаза W електричного двигуна
X2.4	Hall A (для вентильного електродвигуна)
X2.5	Плюс живлення (+5V)
X2.6	Спільний провід
X2.7	Hall C (для вентильного двигуна)
X2.8	Hall B (для вентильного двигуна)
X3.1	Лінія даних датчика температури
X3.2	Плюс живлення (+5V) датчика температури
X3.3	Спільний провід
X3.4	Спільний провід
X4.1	Спільний провід
X4.2	Підєднання напруги живлення для вентильного двигуна
S1-S9	Матрична клавіатура 3x3
POWER	Індикатор увімкнення напруги живлення

Продовження табл.3.2.

1	2
OFF/ON	Вмикач напруги живлення
LCD	Графічний дисплей
RV	Резистор змінний
J3	Перемикач MOSI_DR/TXD_J
J4	Перемикач MISO_DR/PSCIN2_J
J5	Перемикач SCK_DR/RXD_J
J1	Вмикач приймача IRDA
J2	Вмикач адаптера USB

### 3.7 Виготовлення та монтаж стенду

Виготовлення стенду починається з передньої панелі, виконаної з оргскла. На цій панелі розташовуються всі компоненти та елементи управління стенду, які закріплюються на металевому корпусі. Креслення передньої панелі наведено на рисунку 3.3.

Загальний вигляд навчально-дослідного стенду для дослідження вентильного електродвигуна представлений на рис.3.4 та на аркуші [МРМА24.00.00.000ДІЗ].

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

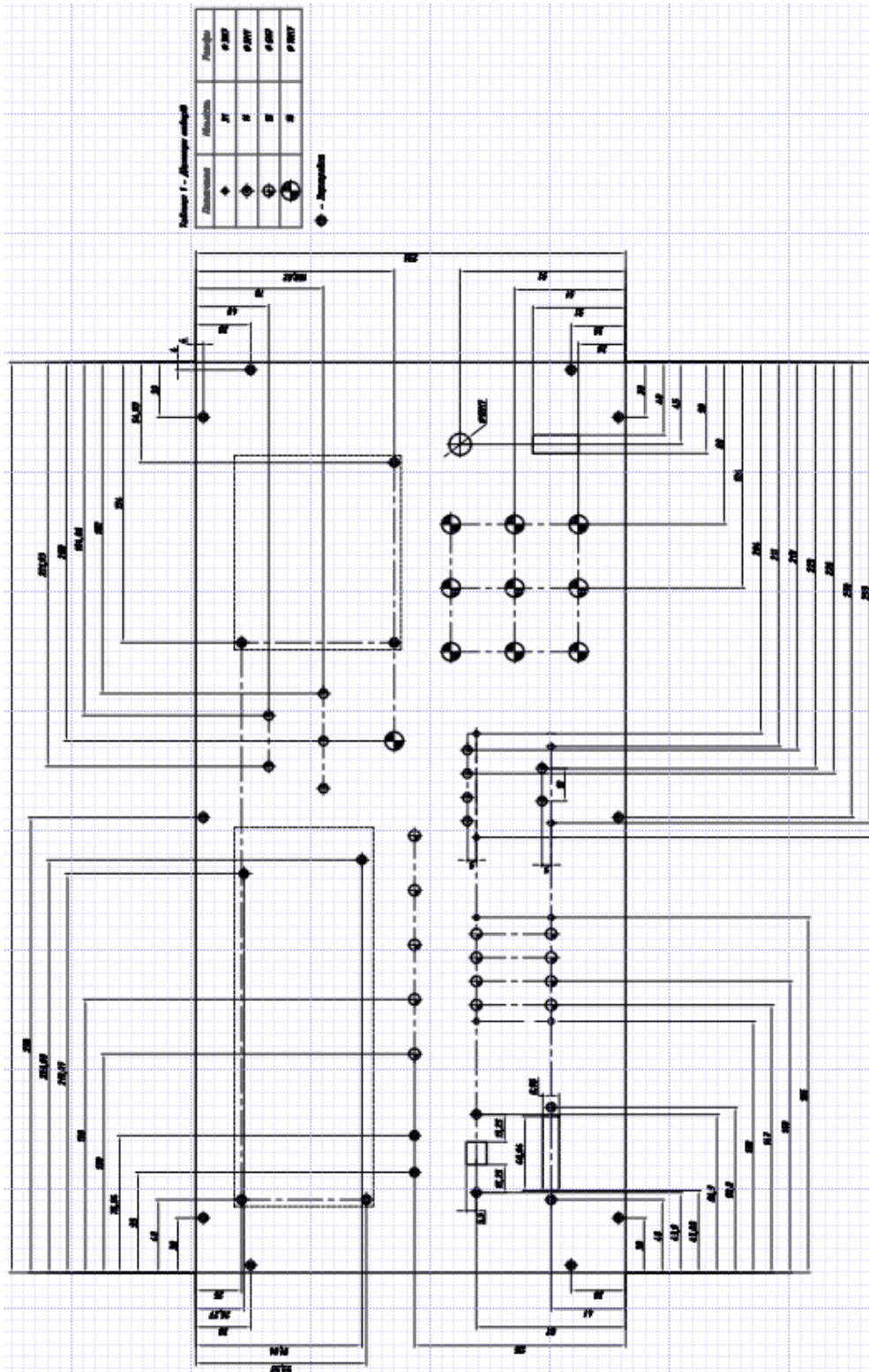


Рисунок .3.3 – Передня панель стенду для дослідження вентильного електродвигуна

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

64

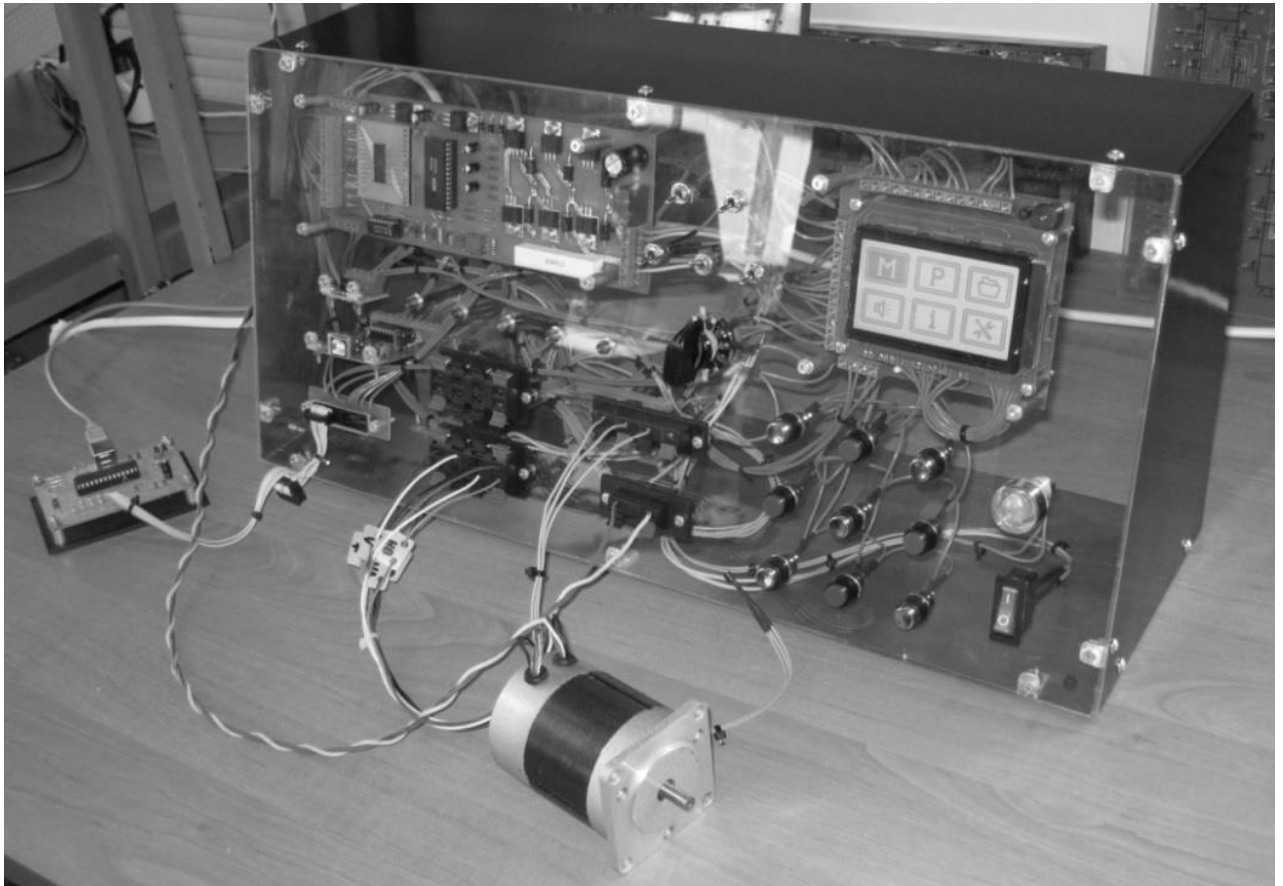


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд навчально-дослідного стенду для дослідження вентильного електродвигуна

### 3.8 Опис програми для дослідження вентильного електричного двигуна

Для управління вентильним електродвигуном через персональний комп'ютер було створено просту та зручну програму, яка забезпечує базові функції управління. За допомогою цієї програми користувач може:

- регулювати частоту обертання двигуна;
- підключати та управляти зовнішньою периферією;
- задавати напрямок обертання двигуна;
- налаштовувати час розгону;

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65



## ВИСНОВКИ

Вентильні електродвигуни завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам є перспективними для застосування в електричних машинах малого та середнього діапазону потужностей. Вони відзначаються конструктивною простотою, надійністю, жорсткими механічними характеристиками та відсутністю потреби у витратах електроенергії на збудження.

Ці двигуни знаходять широке застосування в промислових системах автоматичної роботи, маніпуляторах, приводах подачі, а також у медичній та побутовій техніці.

Аналіз сімейства механічних характеристик вентильних електродвигунів показує, що вони мають лінійну форму, схожу на характеристики колекторних двигунів із незалежним збудженням. Регулювання швидкості таких двигунів можливе за рахунок зміни кута  $\beta_0$ .

Однак цей метод регулювання є більш ефективним при менших відносних навантаженнях на валу двигуна. Разом із тим, він супроводжується збільшенням втрат і зниженням коефіцієнта корисної дії.

Для вивчення вентильних електродвигунів було розроблено та виготовлено спеціальний навчально-дослідний стенд. Цей стенд може бути впроваджений у навчальний процес для проведення лабораторних робіт з курсу «Спеціальні електричні машини».

Стенд є корисним інструментом у підготовці фахівців спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Хмельницького національного університету. Його використання дозволяє покращити якість підготовки спеціалістів-електромеханіків, забезпечуючи їм практичний досвід роботи з сучасними електричними машинами.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вентильний електродвигун [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9\\_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D1%83%D0%BD).
2. Сучасні вентильні електродвигуни та їх застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19949/1/SEIS\\_mono\\_2021\\_P189-195.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19949/1/SEIS_mono_2021_P189-195.pdf).
3. Основи РТ та МТ застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/305197/mod\\_resource/content/1/%2B%D0%9B7%20%287.1%29\\_%D0%9C%D0%9C%D0%A0\\_%D0%A0%D0%A2%D1%82%D0%B0%D0%9C%D0%A2.%20%D0%A7.%D0%86%2B%D0%86%D0%86.pdf](https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/305197/mod_resource/content/1/%2B%D0%9B7%20%287.1%29_%D0%9C%D0%9C%D0%A0_%D0%A0%D0%A2%D1%82%D0%B0%D0%9C%D0%A2.%20%D0%A7.%D0%86%2B%D0%86%D0%86.pdf).
4. Розен В.П., Закладний О.О., Прядко С.Л. Електропривод з вентильним двигуном. Навчальний посібник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 38с.
5. Василега П. О. Електропривод робочих машин : навч. посібник / П. О. Василега, Д. В. Муріков. – Суми : Університетська книга, 2006. – 228 с.
6. Закладний О.М. Електропривод: Навч. Посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316с.
7. Закладний О.М. Електропривод: Навч. Посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009. – 351с.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Ткачук В.І. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму. – Л.: Львівська політехніка, 2011. – 288с.

9. Автоматизовані електромеханічні системи : конспект лекцій / укладачі : Черв'яков В. Д., Леонтєв П. В., Соколов С. В. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 253 с.

10. Основи електропривода : підручник / Ю. М. Лавріненко та ін. ; за ред. Ю. М. Лавріненка. – Київ : Ліра-К, 2017. – 378 с.

11. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний та ін. – Кременчук, 2001. – 376 с.

12. Єрмілова Н.В. Навчальний посібник з дисципліни "Електротехніка та електропостачання" для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – 177 с.

13. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. ; за заг. ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.

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

15. Електроприводи з вентильними двигунами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://stud.com.ua/84212/tehnika/elektroprivodi\\_ventilnimi\\_dvigunami#google\\_vignette](https://stud.com.ua/84212/tehnika/elektroprivodi_ventilnimi_dvigunami#google_vignette).

16. Шевченко І.С. Цифрове моделювання елементів електропривода /електромеханічні, електромагнітні та вентильні перетворювачі/: Навч. посібник / За заг. ред. А.Б. Зеленова. – К.: ІСДО, 1996. – 287 с.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Зеленов А.Б., Шевченко І.С., Андреева Н.І. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з вентилями перетворювачами: Навч. посібник для студ. вузів. – Алчевськ: ДГМІ, 2002. – 400 с.

18. Шевченко І.С. Автоматизований електропривод виробничих установок: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1994. – 256 с.

19. Методичні вказівки до виконання графічної роботи «Вивчення правил оформлення конструкторської документації з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» для студентів – радіо і електро спеціальностей» / Уклад.: Н.М. Коломийчук К.: НТУУ (КПІ), 2016. - 29 с.

20. Електрична схема [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0\\_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0).

21. Панкратов А.І. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання). – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.

22. Комплектні електроприводи: Навч. посібник / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.

23. Яцун М.А. Електричні машини. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 464 с.

24. Елементи електронних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/3/22/3-22-b3/part1/part1.html>.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. DipTrace [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://diptrace.com/ua/>.

26. Процес виготовлення друкованих плат [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.fmuser.net/content/?7981.html>.

27. Крилик Л.В. Монтаж радіоелектронних приладів. Спеціальна технологія: навчальний посібник / Л.В. Крилик, О.О. Селецька. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 75с.

28. Пайка як метод з'єднання компонентів електронних пристроїв [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/materials/Tech-osn-elekt\\_r\\_lab-2\\_Payka.pdf](https://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/materials/Tech-osn-elekt_r_lab-2_Payka.pdf).

					<i>МРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						71
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# ДОДАТОК А

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		