

**КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ**

Бакалавр

Освітній рівень

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном

Назва теми

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

Шифр КПТР022078.01.07ПЗ

Виконав: здобувач 4 курсу, група ТР2-22-1



П.В. Михайловський

Ініціали, прізвище

Керівник:.

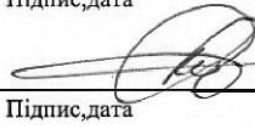


1.06.26

О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

Нормоконтроль:



В.І. Стецюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав.кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних  
технологій



С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

1 червня 2026 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)*

Освітній рівень *бакалавр*

Галузь знань *17 «Електроніка та телекомунікації»*


Шифр і назва

Спеціальність *172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Шифр і назва

Освітня-професійна програма *«Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»*

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТМІТ  
Сергій ПІДЧЕНКО

 23.01.26р  
Підпис, дата

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ**

*Михайловському Павлу Володимировичу*

Прізвище, ім'я, по батькові здобувача

1 Тема проєкту *Контролер пропорційного керування кроковим двигуном*

керівник проєкту *Пивовар Олег Сергійович, к.т.н, доцент*

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

Затверджено наказом ректора університету від «20» січня 2026р. № 7, дод.№20

2 Строк подання студентом проєкту на кафедру: *1.06.2026р.*

3 Вихідні дані до проєкту *Схеми електричні принципові прототипів пристрою керування кроковим двигуном, описання принципу роботи. Напруга живлення пристрою – 30В. Струм окремої фази – не менше 5А. Кількість фазних виходів – 6. Вихідна потужність пристрою – не менше 200Вт.*

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

*Техніко-економічне обґрунтування необхідності нової розробки контролера крокового двигуна.*

*2. Аналіз типів крокових двигунів та їх режимів роботи.*

*3. Аналіз схем керування струмами обмоток статора електричної машини.*

*4. Аналіз функціональних аналогів.*

*5. Розробка електричної схеми пристрою.*

*6. Схемотехнічні та конструкторські розрахунки.*

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

*1. Схеми електрична структурна.*

*2. Схеми електрична принципова.*

*3. Демонстраційні плакати та технічні рисунки.*

## 6 Консультанти розділів кваліфікаційного проєкту


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

7 Дата видачі завдання 23.02.2026

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	<i>Вибір тематики проєкту</i>	<i>до 1.03.26</i>	<i>обрано</i>
2	<i>Аналіз початкових даних проєкту</i>	<i>до 5.03.26</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Написання вступу та 1 розділу</i>	<i>до 15.03.26</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Написання 2 розділу</i>	<i>до 15.04.26</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення креслення структурної схеми</i>	<i>до 15.04.26</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Написання 3 розділу</i>	<i>до 1.05.26</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Оформлення креслення принципової схеми та демонстраційних плакатів</i>	<i>до 10.05.26</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Компоновка та формування висновків</i>	<i>до 15.05.26</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Корекція зауважень керівника</i>	<i>до 17.05.26</i>	<i>виконано</i>
10	<i>Підготовка доповіді, оформлення документів супровіду проєкту</i>	<i>до 25.05.26</i>	<i>виконано</i>
11	<i>Подання готового проєкту на попередній захист</i>	<i>1.06.26</i>	<i>виконано</i>
12	<i>Корекція зауважень під час попереднього захисту</i>	<i>до 01.06.26</i>	<i>виконано</i>
13	<i>Рецензування, антиплагіат, підписи</i>	<i>до 06.06.26</i>	<i>виконано</i>

Здобувач


  
Підпис
П.В. Михайловський

Ініціали, прізвище

Керівник проєкту


  
Підпис
О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проєкту:

«Контролер пропорційного керування кроковим двигуном».

Автор роботи: Михайловський Павло Володимирович.

Керівник роботи: канд. техн. наук, доц. Пивовар Олег Сергійович.

Пояснювальна записка: 66сторінок, 27 рисунків, 7 таблиці, 11 джерел.

Графічна частина: 2 креслення, 6 презентаційних слайдів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** НАПІВКРОКОВИЙ РЕЖИМ, ПОВНОКРОКОВИЙ РЕЖИМ, РОТОР, СТАТОР, ДРАЙВЕР ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ, КОНТРОЛЕР, ДАВАЧ СТРУМУ.

*Метою кваліфікаційного проєкту є розробка варіанту універсального пристрою з гнучкою (програмованою) логікою керування різними типами електричних крокових двигунів, реалізації різних схем підключення, що дасть можливість використання пристрою для дослідження властивостей і параметрів крокових двигунів та побудови лабораторних стендів нормованих механічних переміщень та зусиль з великою розрізнявальною здатністю.*

Проєкт має на меті проведення аналізу сучасних типів крокових двигунів, особливостей їх керування, вибір та обґрунтування схеми керування струмом обмоток статора, та розробки окремих елементів схеми та вимог конструкції виробу. Запропоновано схему багатоканального пристрою керування електричними машинами з будь-якою кількістю обмоток статора та схеми керування і захисту елементів електронної схеми. Розроблена конструкторська документація структурної та електричної схеми контролера пропорційного керування. Проведено окремі електричні розрахунки з метою підтвердження доцільності запропонованого рішення.

П.В. Михайловський

Ініціали, прізвище здобувача

 1.06.26р

Підпис, дата

## ANNOTATION

The theme of the qualification project:

«Proportional stepper motor controller»

Written by Myhajlovsky Pavlo Volodymyrovych

Academic advisor: Pyvovar Oleg Serhiyovych PhD, Associate Professor.

The total volume of the paper is 65 pages; it contains 16 figures, 2 tables, 30 bibliographic references.

Graphic part: 2 graphic schemes, 6 presentation slides.

KEYWORDS: HALF-STEP MODE, FULL-STEP MODE, ROTOR, STATOR, ELECTRONIC SWITCH DRIVER, CONTROLLER, CURRENT SENSOR.

The purpose of the qualification project is to develop a version of a universal device with flexible (programmable) control logic for various types of electric stepper motors, implementing various connection schemes, which will make it possible to use the device to study the properties and parameters of stepper motors and build laboratory stands of normalized mechanical displacements and forces with high resolution.

The project aims to analyze modern types of stepper motors, their control features, select and justify the stator winding current control scheme, and develop individual circuit elements and product design requirements. A scheme of a multi-channel control device for electric machines with any number of stator windings and a scheme for controlling and protecting electronic circuit elements are proposed. Design documentation for the structural and electrical circuit of the proportional control controller has been developed. Separate electrical calculations have been performed to confirm the feasibility of the proposed solution.

Pavlo MYHAJLOVSKY

Name

 1.06.26p

Sign, Date

№ ряд	Формат	Позначення	Найменування	Кіл арк	№ екз	Примітки
1						
2			<u>Документація загальна</u>			
3						
4	A4		Завдання на дипломний			
5			проект			
6	A4		Календарний план	1		
7	A4		Реферат (укр./англ.)	1		
8	A4	КПТРО22078.01.07ПЗ	Пояснювальна записка	66		
9	A4	КПТРО22078.01.07ПЕЗ	Перелік елементів	2		
10						
11	A4		Копії креслень	2		
12	A4		Копії довідок антиплагіату	1		
13	A4		Рішення каф. про допуск	1		
14	A4		Копія відгуку рецензента	1		
15	A4		Копія відгуку керівника	1		
16	A4		Копія заяви про академічну			
17			добросесність	1		
18						
19			<u>Документація графічна</u>			
20						
21	A1	КПТРО22078.01.07Е1	Схема електрична			
22			структурна	1		
23	A1	КПТРО22078.01.07ЕЗ	Схема електрична			
24			принципова	1		
25			Демонстраційні плакати	8		
26						
27						
28						

КПТРО22078.01.07ВП				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Разроб.		Михайловський		1.06.26
Перевір.		Пубовар		1.06.26
Н.контр.		Стецюк		1.06.26
Затв.		Підченко		1.06.26
Контролер пропорційного керування кроковим двигуном			Відомість проекту	
Літер.		Аркуш	Аркушів	
У			1	
ХНУ, ФІТ				

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ.....	10
1.1 Загальна характеристика крокових двигунів .....	10
1.2 Типи крокових двигунів.....	12
1.3 Керування кроковими двигунами .....	16
1.3.1 Схеми керування кроковими двигунами .....	18
1.3.2 Керування струмом обмоток.....	21
1.4 Особливості керування кроковими двигунами.....	25
2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ.....	29
2.1 Розробка технічного завдання на виріб .....	29
2.1.1 Загальна інформація про пристрій .....	29
2.1.2 Склад пристрою, що розробляється.....	29
2.1.3 Технічні характеристики пристрою .....	30
2.1.4 Додаткові технічні умови.....	31
2.2 Принцип роботи пристрою .....	32
2.3 Функціональні рішення аналогічних виробів.....	34
2.3.1 Параметри крокового двигуна .....	34
2.3.2 Схема силових ключів керування .....	37
2.3.3 Схема формувача імпульсів керування .....	39
2.3.4 Варіант із використанням мікроконтролера.....	41
2.4 Конструкція розроблюваного пристрою .....	43
3 РОЗРОБКА СХЕМ ТА ТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	46
3.1 Електричні схеми пристрою .....	46

					КПТР022078.01.07ПЗ			
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Контроллер пропорційного керування кроковими двигуном Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Михайловськ		1.06.26			6	65
Перевірів		Пивовар		1.06.26				
Н. контр.		Стецюк		1.06.26				
Затв.		Підченко		1.06.26				
						ХНУ, ФІТ		

3.1.1	Схема електрична структурна .....	46
3.1.2	Схема електрична принципова .....	48
3.2	Електричні розрахунки елементів пристрою .....	52
3.3	Конструкторські розрахунки .....	57
3.3.1	Визначення габаритних розмірів плати контролера .....	57
3.3.2	Розрахунок надійності виробу .....	59
ВИСНОВКИ.....		62
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		64

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ВСТУП

Крокові двигуни (stepping motors) вже досить давно і успішно використовуються у пристроях різноманітного призначення [1,2]. Їх можна зустріти практично скрізь – у принтерах, сканерах, дисководах, вінчестерах, також у різноманітних пристроях промислового та спеціального призначення. Процес створення гнучких систем і автоматизованих робочих місць, який почався ще при кінці минулого сторіччя, постійно удосконалюється. Більшість периферійних пристроїв для цих цілей, а також роботів і станків з числовим програмним керуванням засновано на застосуванні крокових двигунів, керування якими здійснюється від центральної ЕОМ [3-7].

Сучасне різноманіття типів крокових двигунів дозволяє задовольнити будь-яким вимогам і потребам. Але правильний вибір типу двигуна за його технічними характеристиками це тільки перший крок на шляху до успішного вирішення поставленої задачі. Не менш важливо правильно розробити схему керування та алгоритм роботи. На сьогодні ця задача досить успішно вирішується за допомогою застосування мікроконтролерів, на основі яких будуються керуючі автомати з необхідною логікою роботи [8,9].

Кроковий двигун – це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси у дискретні механічні переміщення. Зовнішні крокові двигуни мало чим відрізняються від електричних двигунів інших типів. Навіть у своєму складі вони мають такі традиційні елементи електричної машини як вал, ротор, статор, осердя, обмотки. Не тільки значна кількість виводів (обмоток) є характерною зовнішньою ознакою крокового двигуна, але і унікальні електромеханічні властивості цих електричних приладів роблять їх не тільки виключно зручними для застосування, але незамінними у ряді випадків. Сама назва двигуна пояснює його основну і унікальну властивість – здійснювати радіальні (і навіть лінійні) переміщення на задану дискретну нескінченно малу величину, яка становить одиниці градусів.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фіксація стану ротора може відбуватися протягом необмеженого часу. При застосуванні редукторів можна не тільки збільшити зусилля, але і покращити точність позиціонування, створити нормовані стискаючі або розтягуючі зусилля.

Основною метою дипломного проекту є розробка варіанту універсального пристрою з гнучкою (програмованою) логікою керування різними типами електричних крокових двигунів та можливістю реалізації різних схем підключення, що дасть можливість використання пристрою для дослідження властивостей і параметрів крокових двигунів та побудови лабораторних стендів різноманітного призначення.

1 Розглянути типи крокових двигунів, провести систематизацію відомостей про будову цих пристроїв, їх властивості та електричні параметри.

2 Розробити пристрій керування кроковим двигуном: розробити схему електричну принципову та представити її обґрунтування, описати принцип роботи пристрою.

3 Провести необхідні розрахунки елементів пристрою.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

# 1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ

## 1.1 Загальна характеристика крокових двигунів

У сучасних системах автоматизованого керування широко застосовуються пристрої цифрової обробки сигналів [10,11]. Розвиток цифрових систем керування вимагав створення адекватних виконуючих механізмів. В результаті чого з'явився новий тип електромеханічних пристроїв – кроковий двигун. Кроковий двигун знайшов широке застосування у галузях, де необхідні висока точність переміщень та швидкості. Наочними прикладами можуть бути принтери, факси, копіювальні машини, а також більш складні пристрої – станки з числовим програмним керуванням, робототехніка, різноманітні маніпулятори.

Крокові двигуни – це електромеханічні пристрої, які перетворюють сигнали керування у кутові або лінійні переміщення рухомої частини (ротора) відносно нерухомої частини (статора) з подальшою фіксацією стану без використання пристроїв зворотного зв'язку. Ці електромеханічні пристрої відносяться до класу безколекторних двигунів постійного струму. Відсутність колектора та ковзаючих електричних контактів визначає високу надійність та значний термін придатності цих електротехнічних виробів. Але у порівнянні зі звичайними двигунами постійного струму, для керування кроковими двигунами необхідні складні електронні схеми [13,14]. Крім того сам кроковий двигун має досить високу вартість, тому там де, не має потреби у точному позиціонуванні, звичайні колекторні двигуни мають помітну перевагу.

Основна відміна крокових двигунів від інших безколекторних електричних двигунів – це те, що обертання ротора здійснюється на певний кут (крок), який визначається конструктивними особливостями двигуна та

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

схемою керування. Він не залежить від величини струму в обмотках і прикладеної напруги. Позиціонування ротора крокового двигуна здійснюється з точністю до долів градуса, а швидкість визначається лише частотою імпульсів збудження обмоток. Ротор крокового двигуна можна зафіксувати в необхідному положенні з точністю і утримувати без застосування тормозних і утримуючих пристроїв. Для цього достатньо підтримувати струм в певній обмотці двигуна.

Основною перевагою крокових двигунів слід вважати їх унікальну можливість здійснювати точне позиціонування та регулювання швидкості переміщення без будь-яких елементів зворотного зв'язку. Реалізація схем зворотного зв'язку може коштувати більше самого двигуна зі схемою збудження. Проте, як показує практика, системи зі зворотним зв'язком можуть працювати у складних режимах зі значним прискоренням та при змінному характері навантаження. При умові, що навантаження крокового двигуна перевищить його момент, то інформація про поточне положення ротора втрачається і система може поновити контроль за переміщенням тільки в результаті повернення у початковий стан. Звісно у системах зі зворотним зв'язком такі випадки виключені.

Вибір на користь певного двигуна здійснюється під час проектування конкретної системи. Якщо необхідно забезпечити прецизійне позиціонування та підтримання швидкості з великою точністю, а необхідний момент та швидкість не перевищують припустимі межі, то використання крокового двигуна є найбільш доцільним рішенням. З метою збільшення крутного моменту крокового двигуна, як і для будь-яких інших двигунів, може бути використаний понижуючий редуктор. Момент, який розвиває двигун, залежить від струму в обмотках та тривалості імпульсу збудження. На відміну від колекторних двигунів, у яких момент зростає з підвищенням швидкості обертання, кроковий двигун має більший момент на низьких

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

швидкостях обертання. До того ж крокові двигуни мають значно меншу максимальну швидкість у порівнянні з колекторними двигунами.

Існують крокові двигуни з лінійним переміщенням ротора. Ротор такого двигуна зміщується на певну відстань лінійно. Для пристроїв на основі крокового двигуна, як правило, не має потреби у кінцевих вимикачах або будь-яких кінцевих сенсорів [12].

## 1.2 Типи крокових двигунів

На сьогодні промислове виробництво постачає на ринок велике різноманіття крокових двигунів для усіх випадків життя [8]. Існує три основних типи крокових двигунів:

- зі змінним магнітним опором;
- на основі постійних магнітів;
- гібридні.

Тип крокового двигуна можна визначити досить просто: якщо вал двигуна, на обмотки якого не подана напруга, обертати вручну, то вал обертається вільно або відчувається змінний опір обертанню. У першому випадку мова іде про двигун зі змінним магнітним опором, у другому – це двигун з постійними магнітами або гібридний двигун. Гібридні двигуни є наступним удосконаленням двигунів з постійними магнітами. Керування цими типами двигунів не має ні яких відмінностей.

У кроковому двигуні крутний момент створюється магнітними потоками ротор і статора, які мають певну взаємну орієнтацію. Статор і ротор мають кілька полюсів. Виготовляється статор і ротор з матеріалів, які характеризуються високим значенням магнітної проникності. З метою зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи складаються з великої кількості пластин. Крутний момент прямо пропорційний величині магнітного поля. Магнітне поле, як в будь-якому іншому електричному двигуні залежить

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

від величини струму і кількості витків обмотки. При подачі напруги на одну з обмоток ротор двигуна замає певне положення і знаходиться в ньому до тих пір поки зовнішній момент не перевищить деякого значення. Цей момент називається моментом утримання. При зовнішньому порушенні рівноваги ротор повернеться у наступне положення рівноваги [3-5].

Крокові двигуни зі змінним магнітним опором мають ротор і статор зубчастої форми (рис.1). У ротора відсутнє намагнічування. На статорі розміщено три незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах. Для двигуна з трьома незалежними обмотками статора і чотирма зубцями ротора крок дискретного переміщення становитиме  $30^\circ$ .

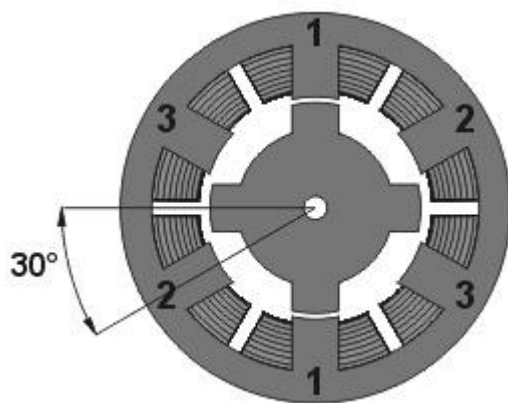


Рисунок 1 – Схема крокового двигуна зі змінним магнітним опором

При збудженні струму в одній з обмоток, ротор буде намагатися зайняти положення, при якому магнітний потік замкнутий, тобто зубці ротора будуть встановлятися навпроти полюсів з активною обмоткою. Якщо переключити збудження на наступну обмотку, то ротор поміняє своє положення, замкнувши своїми зубцями магнітний потік через наступну обмотку. Послідовне перемикання обмоток призведе до безперервного обертання ротора. Двигун не чутливий до напрямку струму в обмотках. Для зменшення кроку одиничного переміщення необхідно збільшувати кількість полюсів

						КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			13

статора і зубців ротора. Для цього поверхню кожного полюса статора виконують зубчастої форми, що разом з відповідними зубцями ротора забезпечує крок у кілька градусів

Крокові двигуни з постійними магнітами складаються зі статора з обмотками, і ротора на основі постійних магнітів[3-5]. Чергуються Полюса ротора мають осеву орієнтацію і чергуються між собою. Ротор циліндричної форми має абсолютно гладку поверхню. Намагніченість ротора забезпечує більший магнітний потік і, як наслідок, більший момент, ніж у двигунах зі змінним магнітним опором.

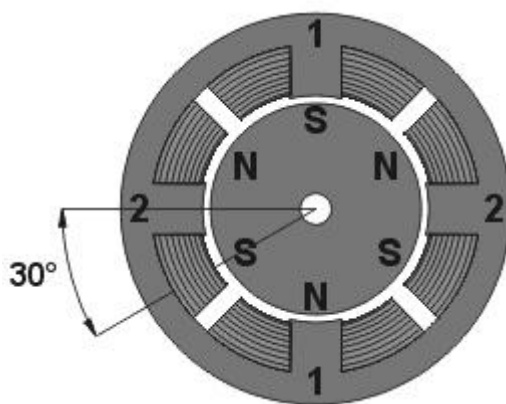


Рисунок 2 – Схема крокового двигуна постійними магнітами

Представлений на рисунку 2 двигун має 3 пари полюсів ротора і 2 пари полюсів статора. Дві незалежні обмотки намотані на двох протилежних полюсах статора. Такий двигун забезпечує крок у  $30^\circ$ . При збудженні струму в одній з обмоток, ротор буде намагатися зайняти таке положення, коли протилежні полюси ротора і статора знаходяться один навпроти іншого. Послідовне перемикання обмоток призведе до безперервного переміщення ротора. Двигуни з постійними магнітами можуть мати від 24 до 48 кроків на повний оберт ротора, що відповідає куту одиничного переміщення від  $15^\circ$  до  $7,5^\circ$ . У двигунах з постійними магнітами виникає зворотна електрорушійна сила (ЕРС) з боку ротора, яка обмежує максимальну швидкість.

						КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			14

На відміну від своїх попередників, гібридні двигуни забезпечують меншу величину кроку, більший момент і велику швидкість. Число кроків на оберт для гібридних двигунів становить від 100 до 400, що відповідає куту одиничного переміщення від  $3,6^\circ$  до  $0,9^\circ$ . Гібридні двигуни поєднують в собі кращі властивості двигунів зі змінним магнітним опором і двигунів з постійними магнітами. Циліндричний ротор такого двигуна має зубці, які розташовані у напрямку центральних осей (рис.3).

Ротор побудовано на основі постійного магніту, де зубці верхньої половини ротора є північними полюсами, а зубці нижньої половини - південними. Половини ротора зміщені між собою на половину кута кроку зубців. Число пар полюсів ротора дорівнює кількості зубців на одній з його половинок. Статор гібридного двигуна також має зубці. Кількість основних полюсів статора, на яких розташовано обмотки, як правило становить 4 або 8.

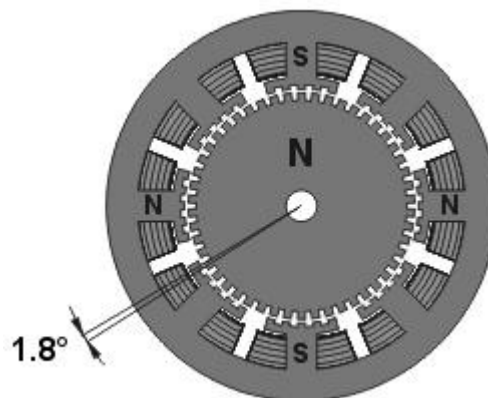


Рисунок 3 – Схема гібридного крокового двигуна

Зубці на поверхні основних полюсів утворюють велику кількість еквівалентних полюсів. Зубці ротора мають менший опір магнітного кола в певних положеннях ротора, що покращує статичний і динамічний момент. Це забезпечується відповідним розташуванням зубців, коли частина зубців ротора знаходиться строго навпроти зубців статора, а частина між ними.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

### 1.3 Керування кроковими двигунами

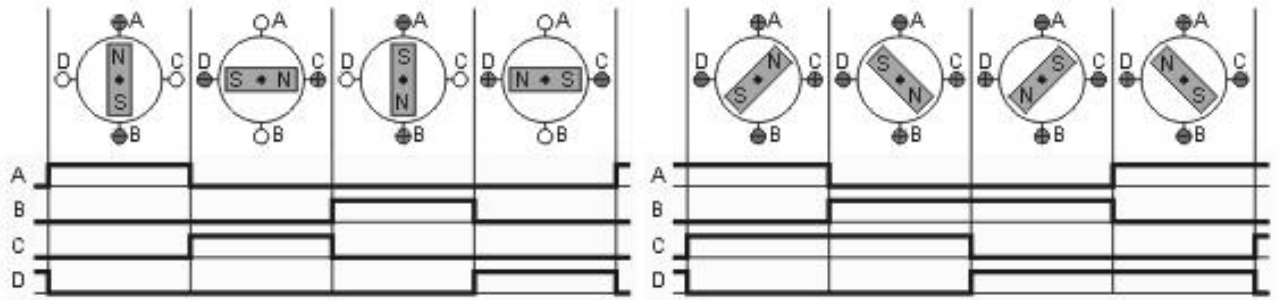
Існує кілька основних способів керування фазовими струмами в обмотках крокової двигуна [9,11].

Перший спосіб керування полягає у тому, що відбувається почергова комутація фазових струмів - в кожний момент часу до джерела струму підключена тільки одна фаза (рис.4, а). Цей спосіб називають "one phase on" full step (одна фаза, повний крок). Точки рівноваги ротора для кожного кроку співпадають з точками рівноваги ротора у неактивному режимі. Недоліком цього способу керування є те, що для біполярного двигуна в один і той же момент часу використовується 50% обмоток, а для уніполярного - тільки 25%. Це означає, що в такому режимі не можна отримати повний момент.

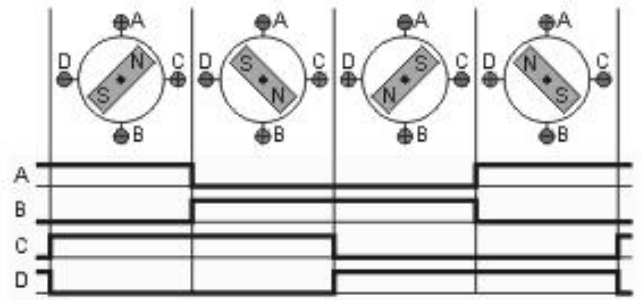
Другий спосіб керування полягає у тому, що збудження струмів в окремих фазових обмотках перекривається у часі. Цей режим називають "two-phase-on" full step (дві фази повний крок). При цьому способі управління ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора (рисунок 4, б) і забезпечується приблизно на 40% більший момент, ніж у випадку однієї включеної фази. Цей спосіб керування забезпечує такий же кут кроку, як і перший спосіб, але положення точок рівноваги ротора зміщене на півкроку.

Третій спосіб є комбінацією перших двох "one and two-phase-on" half step" (напівкроковий режим). У цьому режимі ротор зміщується на крок, який становить половину основного. Цей метод керування дозволяє отримати від 100-крокового двигуна у два рази більше кроків на один оберт. Кожен другий крок активною є лише одна фаза, а в інших випадках активними є дві (рис.4, в). В результаті кутове переміщення ротора становить половину кута кроку відносно попередніх способів керування. Також цей спосіб дозволяє частково позбутися явища резонансу. Слід зазначити, що напівкроковий режим не дозволяє отримати повний момент.

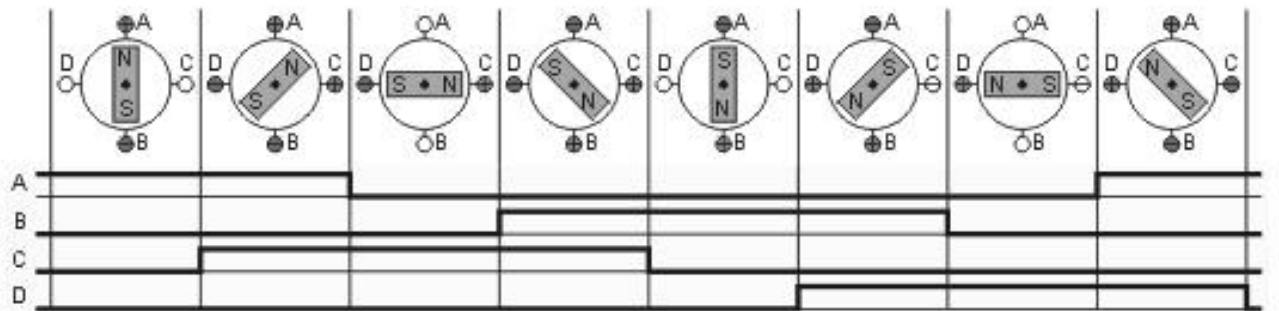
					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Діаграми різних способів керування кроковим двигуном

а) повнокроковий режим, включена одна фаза;

б) повнокроковий режим, включено дві фази;

в) напівкроковий режим

Четвертий спосіб керування micro stepping mode (мікрокроковий режим). Струм в обмотках можна змінювати невеликими порціями. Таким чином відбувається поділення напівкроку на ще менші мікропереміщення. Коли одночасно активними є дві фази, але струми їх обмоток не рівні, то рівновага ротора буде знаходитись не в середині кроку, а в іншому місці, яке буде визначатися співвідношенням струмів фаз. Поступово змінюючи це співвідношення, можна забезпечити плавний перехід або деяку кількість мікрокроків всередині одного кроку. Звісно для реалізації цього режиму



Деякі типи двигунів мають чотири розділені обмотки і відповідно вісім виводів. Така конструкція обмоток статора дозволяє легко перетворити біполярний двигун в уніполярний шляхом відповідного з'єднання обмоток. Кроковий двигун з уніполярним типом обмоток можна включити у біполярному режимі, якщо середні виводи обмоток залишити непідключеними.

Рух ротора будь-якої електричної машини відбувається завдяки циклічній зміні сили і напрямку магнітного поля незалежно для кожної фази. Існують декілька способів зміни напрямку магнітного поля. В уніполярних двигунах кожна фаза має дві обмотки або одну обмотку з виводом від середини, тобто за допомогою однієї обмотки (однієї половини) здійснюється рух ротора у прямому, а за рахунок другої обмотки (другої половини) - рух у зворотному напрямку. У будь-якому випадку обмотки повинні бути протифазними. Для обмоток з відводом від середини це правило виконується автоматично. Зміна напрямку магнітного поля здійснюється шляхом переключення обмоток (їх частин). На рисунку 6 представлена схема комутації обмоток за умови використання одного джерела живлення.

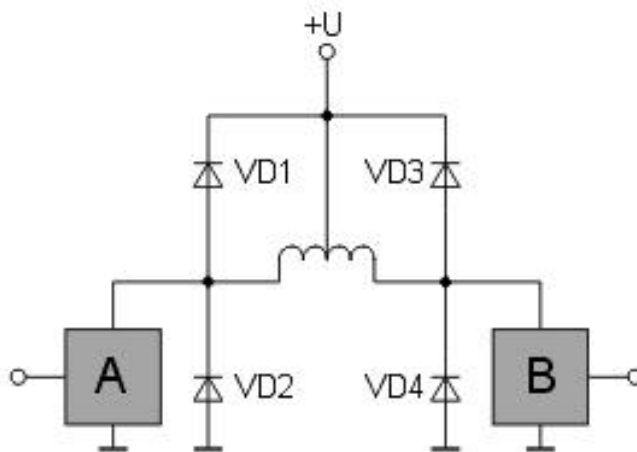


Рисунок 6 - Живлення обмоток уніполярного двигуна

У цьому випадку необхідно два електронних комутатора для кожної фази. Керування струмами обмоток біполярного двигуна має більш складну

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

схему комутації. Напрямок струму обмоток змінюється за рахунок зміни полярності напруги, на обмотці. У цьому випадку необхідно застосовувати схему повного Н - моста (рис.7).

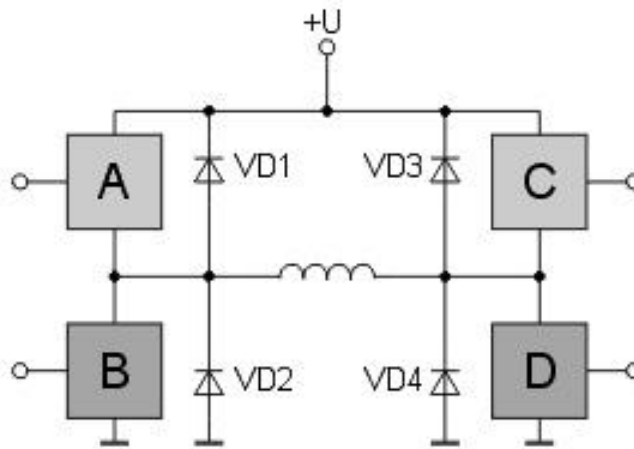


Рисунок 7 - Живлення обмоток біполярного двигуна

Слід зазначити, що у будь-якому випадку для керування комутаторами необхідна електронна схема, яка виконує розподілення сигналів керування і контроль струмів обмоток. Взагалі ситуація коли верхній ключ А і нижній ключ В знаходяться у провідному стані неприпустима. У цьому випадку виникають наскрізні струми, що неминуче приводить до виходу з ладу електронних комутаторів.

Зміна струму в обмотках статора під час комутаційних процесів має складний перехідний інерційний характер. При прикладенні напруги або зняття струм в обмотці не може змінюватись миттєво. В моменти переключення на обмотках виникають значні викиди напруги за рахунок енергії, яка накопичується під час проходження струму через індуктивність. Полярність цієї напруги є зворотною відносно напруги живлення. Величина таких викидів прямо пропорційна величині струму в обмотці, що у потужних двигунах являє суттєву загрозу для електронних ключів. Для захисту електронних ключів від дії зворотних напруг у схему захисту вводять спеціальні швидкісні потужні діоди.

										Арк.
										20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

### 1.3.2 Керування струмом обмоток

Струм в обмотках статора крокового двигуна змінюється нелінійно у широкому діапазоні значень і обмежується тільки активним опором обмотки [3,4,7]. Для забезпечення величини крутного моменту електричного двигуна необхідно регулювати струм обмоток статора. Струм в обмотках статора змінюється нелінійно і обмежується достатньо малим активним опором обмоток. Задача захисту як двигуна так і електронних комутаторів полягає в обмеженні струму. Крім того в напівкроковому режимі роботи необхідно забезпечити відсікання струму у певні моменти часу а у мікрокроковому режимі необхідні різні значення струмів. Живлення крокових двигунів здійснюється від джерела постійного струму, номінальне значення якого вказується виробником. Струм в обмотці не змінюється миттєво і зростає за експоненціальним законом. Швидкість зміни струму залежить від величини напруги живлення, індуктивності та активного опору. Тому при збільшенні частоти обертання ротора (швидкості двигуна) струм не може досягнути значення яке необхідне для забезпечення крутного моменту. Керування у такий простий спосіб може бути запропоновано тільки для малопотужних двигунів на малих швидкостях.

Одним зі способів керування струмом обмоток є застосування джерела живлення зі змінною вихідною напругою. Струм обмотки при цьому обмежується за допомогою додаткового резистора (рис.8).

Суттєвим недоліком такого методу є значна потужність, яка виділяється на обмежувальному резисторі. Габарити обмежувального резистора мають бути досить великими. Такий спосіб не є ефективним, так як значна частина корисної потужності буде виділятися у вигляді тепла, коефіцієнт корисної дії при цьому зменшується.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

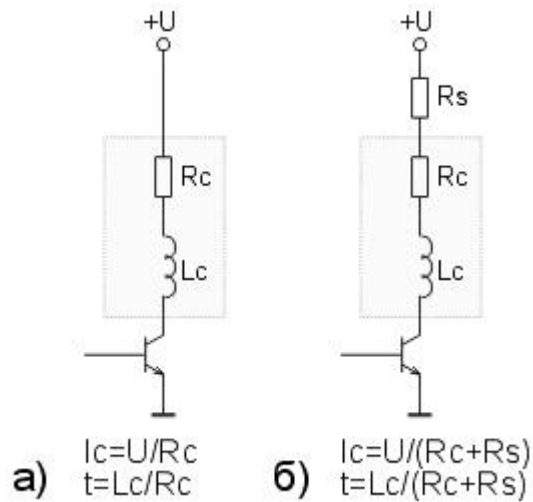


Рисунок 8 – Живлення обмоток статора

а) без додаткового резистора, б) з додатковим резистором

Забезпечити високу швидкість зростання струму і зменшення втрат можна за рахунок застосування двох джерел живлення з різною вихідною напругою. Збільшення швидкості зростання буде відбуватися у моменти підключення джерела живлення з більшою вихідною напругою. На початку кожного кроку обмотки підключаються до джерела високої напруги, потім напруга живлення обмоток зменшується (рис.9).

Недолік такого методу очевидний: наявність двох джерел живлення і елементів комутації та схеми керування. Визначення часу  $t_1$  не є однозначним для загального випадку. Для двигунів з малою індуктивністю обмоток зростання струму може перевищувати припустимі значення і ставати причиною перегріву. Тому такий метод потребує індивідуальної адаптації для кожного окремого двигуна.

Найбільш ефективним методом регулювання струму в обмотках двигуна є широтно-імпульсна модуляція на основі ключових (імпульсних) стабілізаторів (рис.10). Для реалізації цього методу необхідні електронні комутатори та драйвери, які забезпечують високу швидкість переключення. Сучасні драйвери крокових двигунів використовують цей метод.

									КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						22

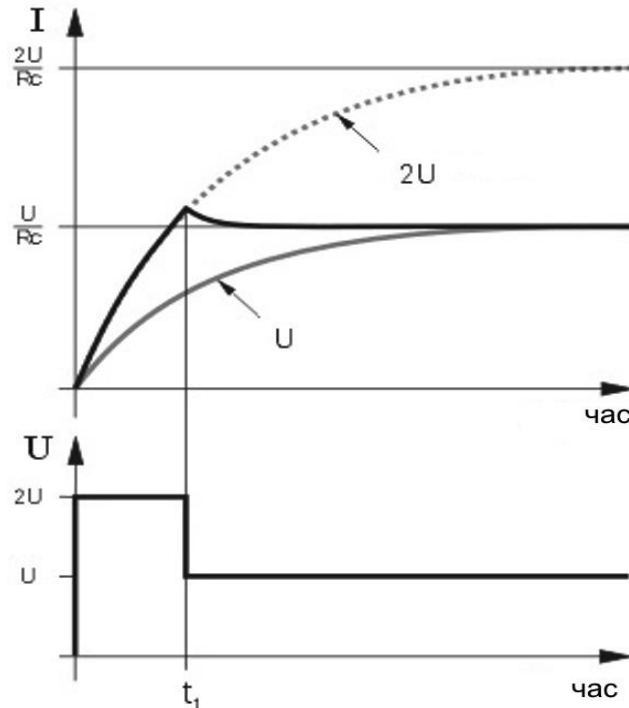


Рисунок 9 – Перехідні процеси під час перемикання напруги крокового двигуна

Ключовий стабілізатор забезпечує високу швидкість зростання струму з дуже низькими втратами. Крутний момент двигуна підтримується у широкому діапазоні значень при значних коливаннях напруги живлення. Це дозволяє зменшити вимоги до стабільності напруги, та використовувати прості та дешеві джерела живлення без стабілізації.

Швидкість наростання струму буде визначатися величиною напруги живлення. Середня напруга та струм підтримуються за рахунок шпаруватості імпульсів струму внаслідок дії зворотного зв'язку. Для вимірювання струму послідовно з обмотками двигуна включається давач струму. Це може бути звичайний резистор з низьким опором. Падіння напруги на цьому резисторі пропорційно струму в обмотці. Виключення транзистора відбувається у моменти коли падіння напруги на резисторі перевищує значення опорної напруги  $U_{ref}$ . Змінюючи величину опорної напруги можна гнучко керувати

струмом обмоток в різних режимах роботи – розгону, гальмування, екстренні зупинки, статичного утримання, підтримання необхідної швидкості обертання ротора та крутного моменту. Якщо опорну напругу формувати за допомогою цифро-аналогового перетворювача то можна реалізувати синусоїдальний характер зміни струму в обмотках, що має суттєві переваги для реалізації мікрокрокового режиму роботи.

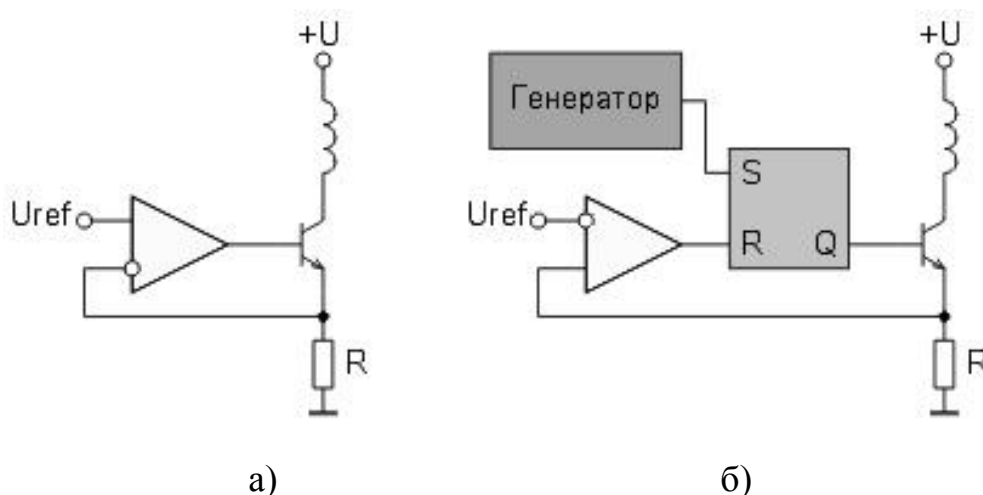


Рисунок 10 – Схеми стабілізації струму крокових двигунів

Частота перемикачів залежатиме від швидкості зміни струму в обмотці, зокрема від її індуктивності та напруги живлення (рис.10а). Схема з постійною частотою перемикачів представлена на рисунку 10б. Така схема забезпечує постійну частоту комутації, і величина пульсацій струму буде постійної. Частота генератора повинна бути вищою за звуковий діапазон, щоб комутаційні процеси не створювали небажаних звуків. Збільшення частоти перемикачів струмів не може мати абсолютний характер. При збільшенні частоти перемикачів збільшуються втрати у силових ключах, драйверах та осерді двигуна. Що стосовно втрат в осерді, то з підвищенням частоти вони зростають не так швидко через зменшення амплітуди

пульсацій. Рівень втрат є незначним якщо пульсації становлять близько 10% від середнього значення струму [11].

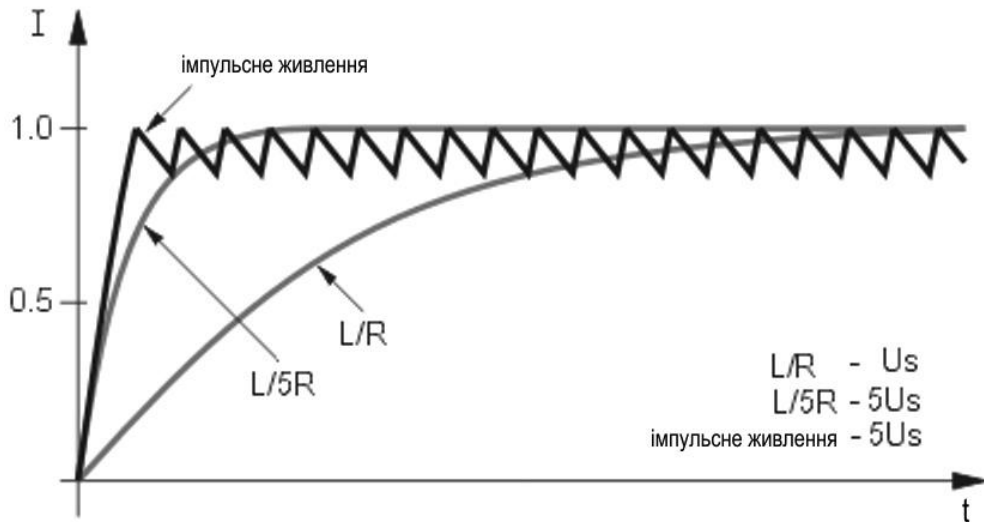


Рисунок 11 – Форма струму в обмотках крокових двигунів за різних схем живлення

На рисунку 11 представлені форми струмів в обмотках двигуна для різних способів живлення. Метод широтно-імпульсної модуляції як видно є найбільш ефективним, він забезпечує високий коефіцієнт корисної дії і досить просто здійснювати регулювання струму.

#### 1.4 Особливості керування кроковими двигунами

При розробці пристроїв та систем автоматичного керування необхідно враховувати особливості крокових двигунів [2,3].

Перше, це явище механічного резонансу, яке пов'язано з тим, що ротор при переміщенні в нову позицію здійснює затухаючі коливання навколо стану рівноваги. На кожному кроці відбувається розхитування ротора і

двигун на деяких частотах обертання втрачає свій момент. Для усунення коливань ротора використовуються як механічні методи (демпферні муфти), або тимчасове замикання вільної обмотки. Найбільш ефективним способом є використання мікрокрокового режиму. Поступове зміщення ротора за рахунок того, що основний крок поділяється на додаткові мікрокроки, зменшує механічні коливання ротора практично до повного усунення (рис.12).

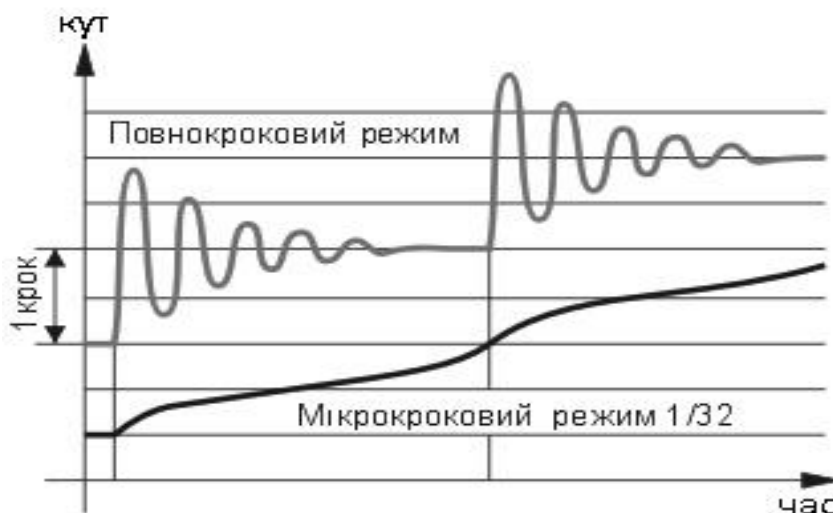


Рисунок 12 – Переміщення ротора у повнокроковому та мікрокроковому режимі

Друге, обмотка двигуна має власну індуктивність. Отже, струм в обмотці не може змінитися миттєво, а зміна його відбувається з деякою швидкістю. Таким чином, при підвищенні частоти комутації обмоток момент ротора зменшується, тому що струм в обмотці не встигає досягти необхідного рівня за час дії імпульсу керування. Збільшити струм обмотки можна тільки за рахунок підвищення напруги збудження з обмеженням величини струму. Таке обмеження здійснюється шляхом включенням послідовно з обмоткою двигуна резистора, або драйвер повинен переходити у режим стабілізації струму. Найбільшу ефективність забезпечують імпульсні



плавний розгін двигуна. Ця крива показує максимальну швидкість двигуна без навантаження. Максимальна швидкість залежить від струму в обмотках двигуна і способу керування збудженням обмоток.

Таким чином, може знадобитися розгін двигуна на малих швидкостях до необхідної робочої швидкості, а у процесі гальмування - зменшення швидкості до деякого значення і тільки потім повної зупинки двигуна з переходом в режим утримання. В іншому випадку гарантувати точність позиціонування ротора не можливо, а внаслідок інерційності системи може статися руйнування редуктора.

Оцінити максимальну швидкість обертання двигуна можна по індуктивності його обмоток. Чим вище індуктивність, тим менша максимальна швидкість двигуна.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

### 2.1 Розробка технічного завдання на виріб

#### 2.1.1 Загальна інформація про пристрій

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном представляє собою пристрій, призначений для автоматизованого керування режимами роботи багатофазними кроковими двигунами підвищеної потужності. Робота контролера може здійснюватись в автономному режимі на основі програми, яка завантажується і зберігається у внутрішній пам'яті пристрою або від ПЕОМ через послідовний канал зв'язку з USB інтерфейсом. Вихідна частина контролера побудована за схемою багатофазного інвертора ключового типу зі змінними параметрами сигналів збудження обмоток двигуна.

На основі контролера може здійснюватись керування різноманітними електричними машинами та механізмами, конвеєрними лініями, повільний запуск та зупинка двигунів, регулювання обертів, регулювання обертаючих моментів, створення нормованих механічних напружень.

#### 2.1.2 Склад пристрою, що розробляється

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном складається з двох самостійних частин:

- плата керування та індикації;
- джерело живлення з регулюванням вихідної напруги.

Детальній розробці підлягає плата керування.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

### 2.1.3 Технічні характеристики пристрою

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном призначено для керування потужними багатofазними електричними машинами тому повинен задовольняти загальним вимогам уніфікації з метою наступної модернізації та забезпечення необхідного функціонального складу. Слід передбачити варіанти використання пристрою для керування кроковими двигунами з різною кількістю обмоток (фаз). Регулювання частоти обертання ротора та підтримання крутного моменту на валу двигуна повинні здійснюватись у широкому діапазоні значень відповідно до аналогів, які наведено у розділі. Основні показники призначення виробу представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні показники призначення пристрою

№ п/п	Найменування параметру	Одиниці вимір.	Значення
1	Кількість фазових виходів	<i>шт.</i>	6
2	Діапазон зміни напруги збудження	<i>B</i>	12 ... 30
2	Максимальний струм фазового виходу	<i>A</i>	5
3	Потужність на виході кожної фази	<i>Bт</i>	100
3	Частота імпульсів збудження	<i>Гц</i>	0 ... 16000
4	Живлення приладу	<i>B, Гц</i>	220, 50

Формування сигналів збудження фазових виходів повинно здійснюватись програмно за допомогою мікроконтролера (наприклад, ATmega 16 фірми Atmel). Пристрій повинен забезпечувати основні режими збудження обмоток двигуна: повнокроковий, напівкроковий та мікроковий.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Регулювання режимів збудження (частота, амплітуда, потужність) повинно здійснюватись одним зі способів: за допомогою механічних органів керування (регулятори, перемикачі) або програмно від персонального комп'ютера.

#### 2.1.4 Додаткові технічні умови

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном повинен представляти окремий завершений блок до складу якого входять два функціонально-конструктивні модулі: плата керування та модуль живлення. Конструкція блоку повинна задовольняти умовам технічних стандартів промислових зразків радіоелектронного обладнання професійного призначення [7,9]. Маса і габарити виробу не обмежуються.

Конструкція корпусу коробчастого типу повинна складатися з шасі, до якого кріпляться усі електронні плати та верхньої кришки П-подібного типу. З метою застосування простих технологічних процесів шасі може бути виготовлено з окремих деталей, які поєднуються між собою за допомогою гвинтів, саморізів, заклепок. Елементи конструкції корпусу повинні виготовлятися з листового металу методом штампування або різання. Усі органи керування та індикації розміщуються на передній панелі. На задній панелі розміщуються елементи зовнішніх з'єднань.

Пристрій повинен відповідати вимогам безпеки виробництва та експлуатації. Корпус приладу повинен бути надійно ізольований від напруги мережі живлення. При проведенні складання, випробування або ремонту виключити можливість ураження електричним струмом кіл високої напруги шляхом ізоляції та обмеження доступу.

Пристрій повинен забезпечувати наступні показники надійності: середній строк служби - 5 років, середня напрацювання на відмову - не менше 10000 годин.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Технологія виробу повинна задовольняти вимогам дрібносерійного виробництва. Під час конструювання слід звернути увагу на зниження трудомісткості і матеріало - та енергоємності виробництва.

## 2.2 Принцип роботи пристрою

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном представляє собою пристрій, призначений для автоматичного керування режимами роботи багатофазних крокових двигунів підвищеної потужності [3]. Робота контролера може здійснюватись в автономному режимі на основі програми, яка завантажується і зберігається у внутрішній пам'яті пристрою або від ПЕОМ через стандартний USB інтерфейс. Вихідна частина контролера побудована за схемою багатофазного інвертора ключового типу. Часові параметри сигналів збудження обмоток двигуна змінюються у широкому діапазоні припустимих значень, що дозволяє реалізувати усі можливі режими роботи крокового двигуна – повнокроковий, напівкроковий та мікрокроковий.

Амплітуда імпульсів збудження встановлюється на виході джерела постійного струму за допомогою плавного регулятора. За допомогою пристрою може здійснюватись керування різноманітними електричними машинами та механізмами, конвеєрними лініями, повільний запуск та зупинка двигунів, регулювання обертів, регулювання обертаючих моментів, створення нормованих механічних напружень. Пристрій з успіхом може використовуватись при проведенні експериментів у галузевих науково-дослідних лабораторіях [1-4].

Контролер пропорційного керування кроковим двигуном доцільно виконати у вигляді моноблока з урахуванням технічних вимог ергономіки та естетики на основі сучасної елементної бази. До складу пристрою входять три функціонально-конструктивних модулі – керування, індикації та джерело

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

постійного струму. В якості джерела струму можуть бути використані будь-які джерела живлення зі змінними параметрами навантаження в діапазоні напруг від 12В до 30В і струмом навантаження не менше 5А.

Так як ніяких вимог до спектральної чистоти вихідної напруги не висувається то доцільно запропонувати джерело на основі імпульсної стабілізації вихідної напруги і струму. Це дозволить покращити цілий ряд якісних показників виробу:

- значно зменшити масу і габарити джерела живлення;
- зменшити потужність розсіювання;
- значно підвищити коефіцієнт корисної дії;
- спростити електричну схему модуля за рахунок застосування спеціалізованих інтегральних виробів;
- підвищити надійність виробу;
- забезпечити високу технологічність та повторюваність;
- значно зменшити вартість.

Формування багатофазної імпульсної послідовності здійснюється контролером режимів роботи. Побудований він на основі програмованої інтегральної схеми. Імпульси керування формуються на шістнадцяти незалежних виходах мікросхеми. Використовуватись може будь-яка кількість виходів в залежності від кількості фазових обмоток та їх виводів. Сигнали з кожного виходу подаються на електронний комутатор [12,13].

Усі шістнадцять електронних комутаторів утворюють багатофазний інвертор високої потужності, тобто напруга від джерела постійного струму перетворюється у послідовність імпульсів збудження обмоток крокового двигуна. Сам характер збудження полягає у тому, що струм через обмотку двигуна проходить у ті моменти часу, коли на вході відповідного комутатора встановлюється той рівень сигналу, який переводить його у провідний стан. За рахунок того, що будь-яка обмотка має власну індуктивність, струм в обмотці не може змінитися миттєво, а зміна його відбувається з деякою

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

швидкістю. Таким чином, при підвищенні частоти комутації обмоток момент ротора зменшується, тому що струм в обмотці не встигає досягти необхідного рівня за час дії імпульсу керування. Збільшити струм обмотки можна тільки за рахунок підвищення напруги збудження. Зміна напруги збудження відбувається у джерелі живлення постійного струму [16].

На виході кожного з електронних комутаторів передбачено схему захисту виходу. Схема захисту виконує дві основні функції:

- обмеження максимальної величини струму;
- усунення небезпечного впливу зворотних напруг, які виникають за

рахунок коливальних процесів при імпульсному збудженні обмоток.

Обмеженням величини струму здійснюється шляхом включеним послідовно з обмоткою двигуна резистора, або драйвер повинен переходити у режим стабілізації струму. Найбільшу ефективність забезпечують імпульсні стабілізатори струму. Такий метод керування реалізований у більшості спеціалізованих інтегральних драйверів [5].

## **2.3 Функціональні рішення аналогічних виробів**

### **2.3.1 Параметри крокового двигуна**

Кроковий двигун ШД-5Д1МУ3 (ДШР-80) (рис.14) призначено для перетворення електричних імпульсів у дискретні кутові (радіальні) переміщення ротора. Завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам [11] двигун з успіхом може бути використаний у системах багатокоординатної подачі та системах точного позиціонування. Основні технічні характеристики двигуна представлено в таблицях 2, 3.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



Рисунок 14 – Кроковий двигун ШД-5Д1МУ3

Таблиця 2 – Розподілення обмоток двигуна ШД-5Д1МУ3

№ обмотки	початок	№ контакту	кінець	№ контакту
1	M1	1	O1	4
2	M2	7	O2	10
3	M3	2	O3	5
4	M4	8	O5	11
5	M5	3	O5	6
6	M6	9	O6	12

Ротор двигуна ШД-5Д1МУ3 має 6 незалежних обмоток і не має постійних магнітів. Кінці усіх шести обмоток виведено на 12-контактне роз'язтя. У таблиці 2 представлено позначення, послідовність та порядок фазування обмоток під час роботи крокового двигуна.

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики двигуна ШД-5Д1МУ3

№ п/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Значення параметру
1	Кількість фаз	шт.	6
2	Номінальна напруга живлення	В	48
3	Струм у колі фазової обмотки у режимі фіксованої стоянки при напрузі живлення 48В при трьох включених фазах	А	2
4	Одиничний крок	град.	1,5
5	Статична похибки відпрацювання кроку	хв.	± 27
6	Номінальний обертаючий момент навантаження	Н×м	0,1
7	Номінальний момент інерції навантаження	кг×м <sup>2</sup>	4×10 <sup>-6</sup>
8	Максимальний статичний момент при живленні двох фазових обмоток струмом 3А кожної фази	Н×м	> 0,4
9	Максимальна частота відпрацювання кроків - при резистивному форсуванні - при імпульсному форсуванні	крок / с	8000 16000
10	Момент обертання при частоті імпульсів керування: - 400 - 800 - 1000 - 1500 - 2000 - 4000 - 6000 - 8000 ... 16000	Н×м	0,35 0,40 0,45 0,48 0,50 0,29 0,20 0,10
11	Номінальний режим роботи		S1
12	Маса	кг	2,2



- формувач імпульсів керування;
- генератор імпульсів з логічним блоком;
- кінцеві давачі.

Електрична схема інвертора представлено на рисунку 16. Усі канали інвертора абсолютно однакові. На входи каналів інвертора з формувача імпульсів подається шестифазна послідовність. Вхідний струм каналу підсилюється транзисторами VT1 та VT2 і через резистор R5 подається у відповідну обмотку. Резистор R5 призначено для обмеження струму обмотки з метою захисту від теплового пробою. Сумісно з діодом VD1 резистор R5 забезпечує захист транзистору VT2 від дії зворотної напруги, яка виникає при імпульсній комутації обмоток двигуна.

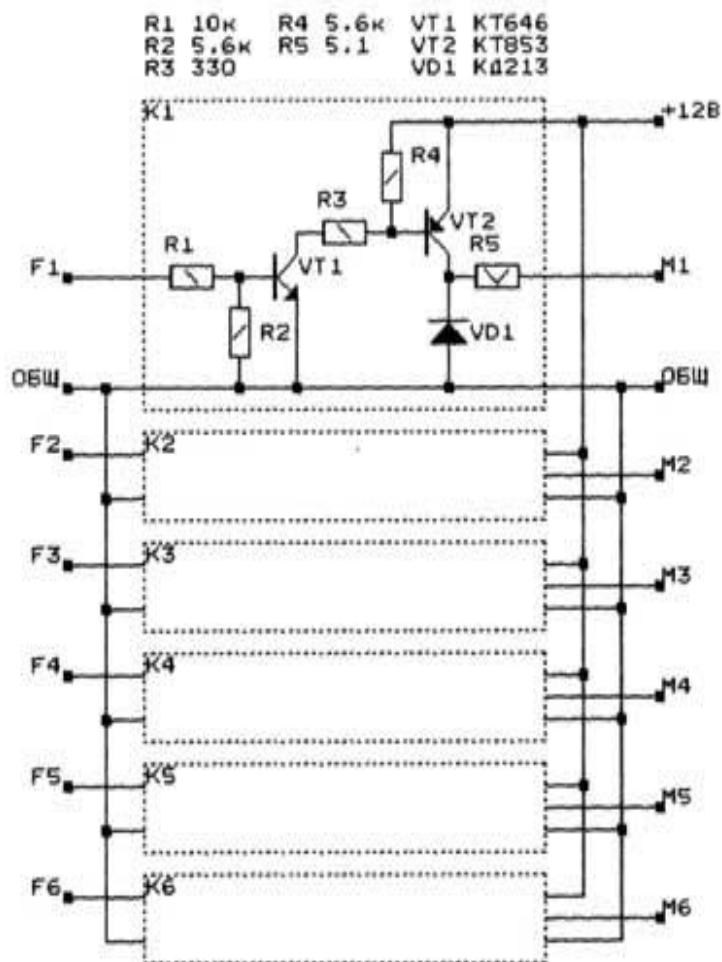


Рисунок 16 – Електрична схема силових ключів інвертора крокового двигуна

										Арк.
										38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



Електричну схему генератора імпульсів і логічного блоку представлено на рисунку 18. Опорний генератор DA1 побудовано на основі таймерного пристрою. Частота імпульсної послідовності визначається величиною часозадаючих конденсаторів C1, C2 і у номінальному режимі становить 2кГц.

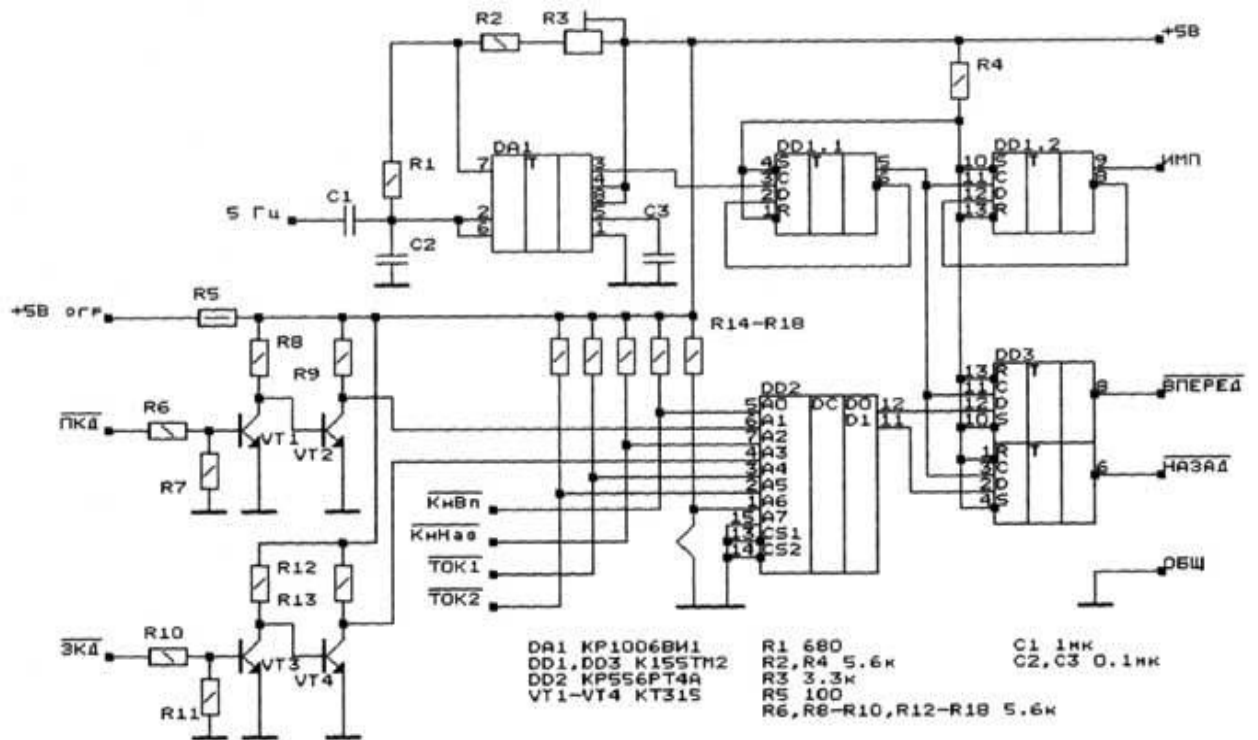


Рисунок 18 – Електрична схема генератора імпульсів і логічного блоку

На тригері DD1 побудовано подільник частоти, на виході якого формується імпульсна послідовність з частотою слідування 1кГц і шпаруватістю 2. Лічильні імпульси частотою 500Гц формуються за допомогою подільника DD1.2. Логічні рівні керування напрямком обертання формуються на виході тригера DD3.

Варіант конструкції блоку керування кроковим двигуном може має вигляд коробчастої конструкції із внутрішнім розташуванням модулів другого структурного рівня таким чином, щоб забезпечити розташування силових елементів із метою природного охолодження для крокових двигунів середньої потужності, як за умов технічного завдання (рис.19).

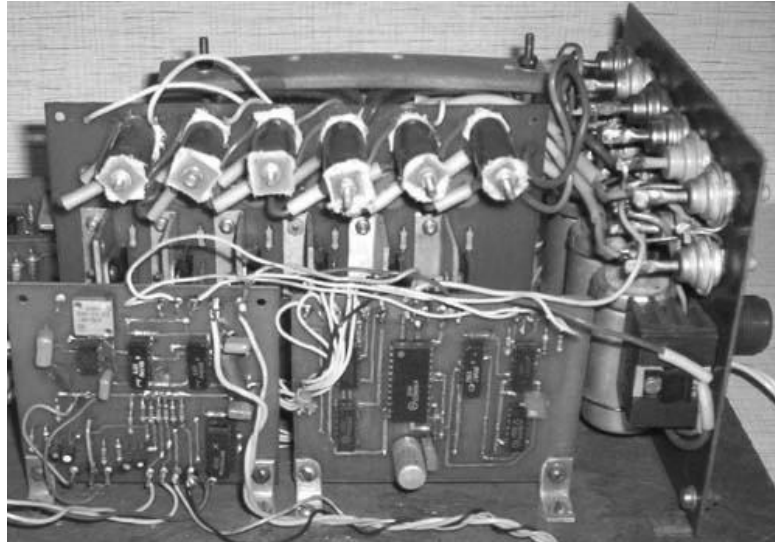


Рисунок 19 – Типова конструкція контролера керування потужним кроковим двигуном у зборі

### 2.3.4 Варіант із використанням мікроконтролера

Ще один варіант схеми контролера крокового двигуна представлено на рисунку 20. Контролер виконано на печатній платі [11] з одностороннім розміщенням електронних компонентів (див. рис.21). Контролер призначений для керування уніполярним кроковим двигуном. Чотирьохфазний інвертор побудовано на основі 4 пар транзисторів, які включено паралельно (VT1...VT8). Польові транзистори КП505 виконано у корпусі ТО-92 і можуть здійснювати комутацію струмів до 1,4А. Це можливо завдяки дуже низькому опорі каналу, який становить близько 0,3 Ом.

Для надійного переключення транзисторів і усунення випадкових комутацій між затвором та витком польових транзисторів включено резистори R11...R14. Для обмеження паразитних струмів перезарядження паразитної ємності затворів встановлено резистори R6...R9. Формування

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

імпульсів керування здійснюється програмно в одному пристрої – мікроконтролер U1 типу AT90S2313 фірми Atmel.

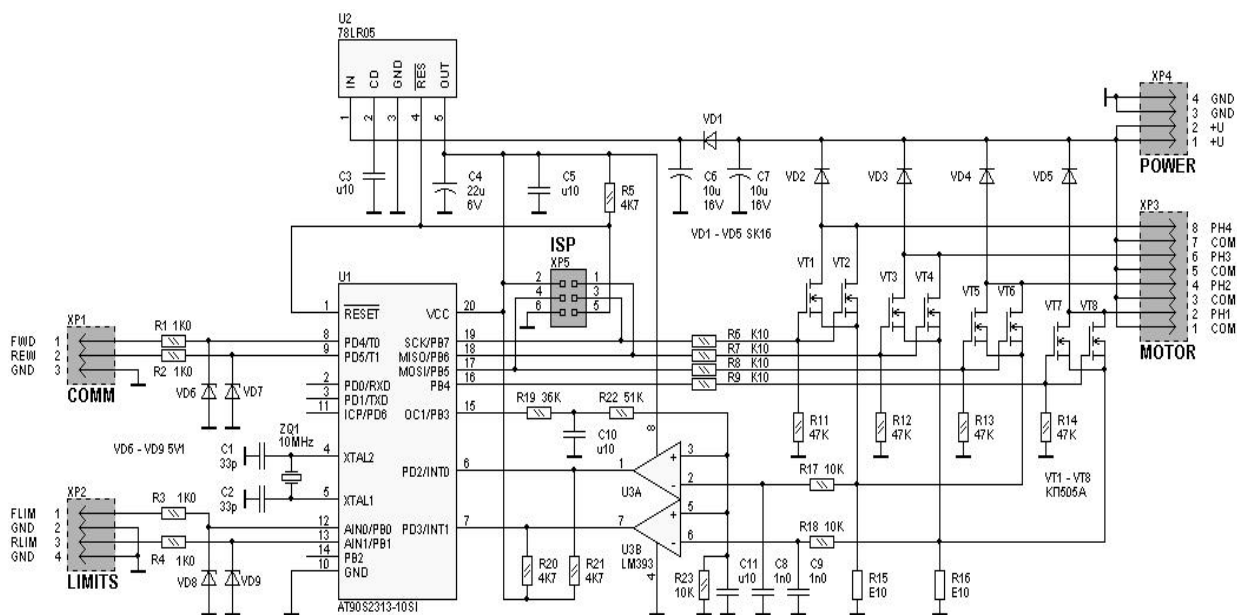


Рисунок 20 - Варіант схема контролера для керування уніполярним кроковим двигуном із використанням інтегрального мікроконтролера

Універсальність схеми полягає в тому, що кількість фазових виходів (порти PB4...PB7) при необхідності може бути збільшена без зайвих переробок схеми. Контролер може використовуватись для керування більш потужними кроковими двигунами зі значним середнім струмом обмоток. Для цього необхідно замінити транзистори VT1...VT8 та діоди VD2...VD5 на більш потужні. Паралельне включення транзисторів можна не використовувати. Найбільш доречними можуть бути спеціалізовані ключові транзистори з низьким опором каналу виток - стік, керування якими здійснюється стандартними логічними рівнями (наприклад, КП723Г, КП727В та ін.).

Стабілізація струму обмоток двигуна здійснюється програмно, на основі широтно-імпульсної модуляції [16]. Для вимірювання струмів

використовуються два сенсора струму R14 та R15. Сигнали давачів струму через інтегруючі ланки R17,C8 та R18,C9 подаються на входи компараторів U3A та U3B. На другий вхід кожного з компараторів подається опорна напруга. Ця напруга формується програмно на відповідному виході мікроконтролера за допомогою вбудованого широтно-імпульсного модулятора формувача.

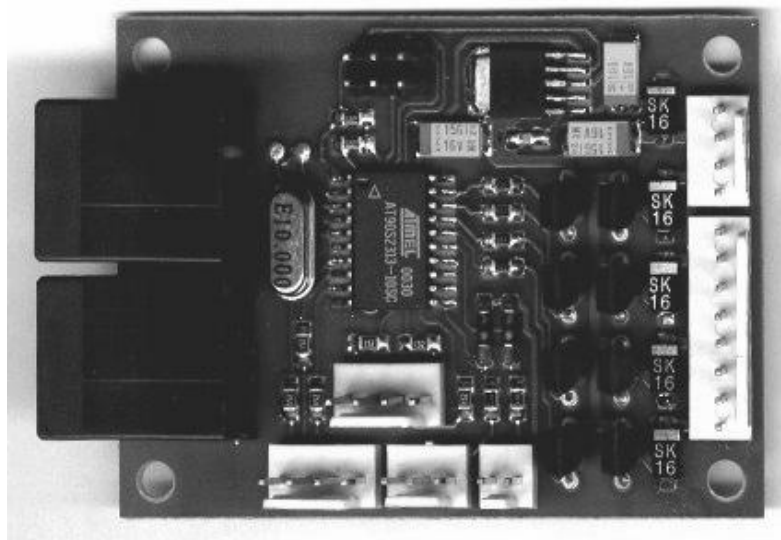


Рисунок 21 – Контролер для керування уніполярним кроковим двигуном

Після проходження сигналу ШІМ через інтегруючу ланку R19,C10,R22,C1 утворюється необхідна величина опорної напруги. Резистори R19, R22, R23 утворюють подільник напруги, який визначає масштаб фазових струмів. Максимальний струм, який відповідає коду 255 обрано 5.11А. Це відповідає падінню напруги на резистивних сенсорах струму близько 0,5В.

## 2.4 Конструкція розроблюваного пристрою

Виходячи із розгляду поданих аналогічних схемотехнічних та конструкторських рішень контролер пропорційного керування кроковим

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

двигуном повинен представляти собою універсальний виріб який може здійснювати керування будь-яким кроковим двигуном. В якості прототипу обрано кроковий двигун високої потужності гібридного типу ШД-5Д1МУ3. Двигун має шість фазових обмоток, максимальний струм яких становить 10А. Підтримання крутного моменту ротора двигуна при зміні частоти обертів здійснюється за рахунок підвищення напруги збудження від 12В до 50В.

Слід зазначити, що потужність джерела постійного струму досить значна (близько 500 Вт). З урахуванням коефіцієнту корисної дії потужність, яка буде розсіюватись у вигляді тепла становитиме близько 50 Вт. Потужність, яка буде виділятися у вигляді тепла на елементах електронних комутаторів при струмі окремої ланки керування струмом обмотки двигуна 5А не буде перевищувати 50 Вт.

Сучасні напрямки розробок пристроїв автоматизованого керування об'єктами призначення характеризуються широким застосуванням готових електронних модулів – мікропроцесорний модуль, модуль керування (маніпулятор), модуль індикації, модуль виконуючих пристроїв (електронні комутатори або силові елементи) і т.п. Всі ці модулі можуть бути поєднані між собою досить швидко на основі гнучких шлейфів дротів або безпосереднього під'єднання через відповідні роз'єкти. Тому при розробці загальної концепції окремих модулів доцільно передбачити використання їх окремо у безкорпусному варіанті використання. Так наприклад керування мікроконтролером та режимами роботи може здійснюватись за допомогою кнопок. Кнопки можуть бути поєднані на окремій печатній платі і під'єднуватись через стандартні роз'єкти або можуть бути встановлені безпосередньо на платі мікроконтролера. Модуль індикації також може бути встановлений на платі мікроконтролера. Таким чином пристрій керування кроковим двигуном може бути побудований на основі одного

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

функціонально-конструктивного модуля і стандартного імпульсного джерела постійного струму.

Елементи несучих конструкцій корпусу доцільно виготовити з листового металу та металевих профілів. На сьогодні промисловістю випускається широка номенклатура конструкційних профілів з металу для виготовлення панелей блоків різноманітного призначення. Виготовлення елементів несучих конструкцій блоків з листового металу методом штампування дозволяє:

- виготовляти деталі без застосування спеціального обладнання (прес-форм, штампів і т.п.);
- підвищити загальний рівень технологічності виробу;
- підвищити гнучкість виробництва;
- оперативно змінювати форму та розміри елементів конструкцій;
- зменшити витрати матеріалу;
- зменшити вартість.

Вказані конструкторські вимоги [17] та обмеження потребують підтвердження технічними розрахункам та можуть бути скореговані на подальших етапах конструювання виробу[18].

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРОБКА СХЕМ ТА ТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ

#### 3.1 Електричні схеми пристрою

##### 3.1.1 Схема електрична структурна

Схема електрична структурна контролера пропорційного керування КПТР022078.01.07Е1 представлена на рисунку 22.

Пристрій побудовано на основі восьми незалежних ідентичних ланок, які утворюють багатофазний інвертор. Кожна ланка складається з :

- формувача логічного виключення;
- драйвера електронних ключів;
- електронного комутатора;
- схеми захисту.

Керування кожною окремою ланкою здійснюється від контролера режимів роботи. З виходу контролера режимів роботи на вхід кожної ланки подаються сигнали керування драйверами електронних комутаторів. У складі контролера є джерело опорної напруги, аналогово-цифровий перетворювач, аналоговий компаратор, за допомогою яких здійснюється вимірювання зовнішніх аналогових сигналів.

Контролер режимів має такі функції:

- формує сигнали керування для забезпечення роботи схеми у мостовому та напівмостовому режимі біполярного та уніполярного двигуна;
- здійснює плавне регулювання швидкості двигуна у ручному і автоматичному режимі;
- керує режимами розгону і зупинки двигуна;
- здійснює контроль струму електронних комутаторів і формує сигнали керування з широтно-імпульсною модуляцією;

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- стабілізує струм електронних комутаторів в режимі статичного утримання.

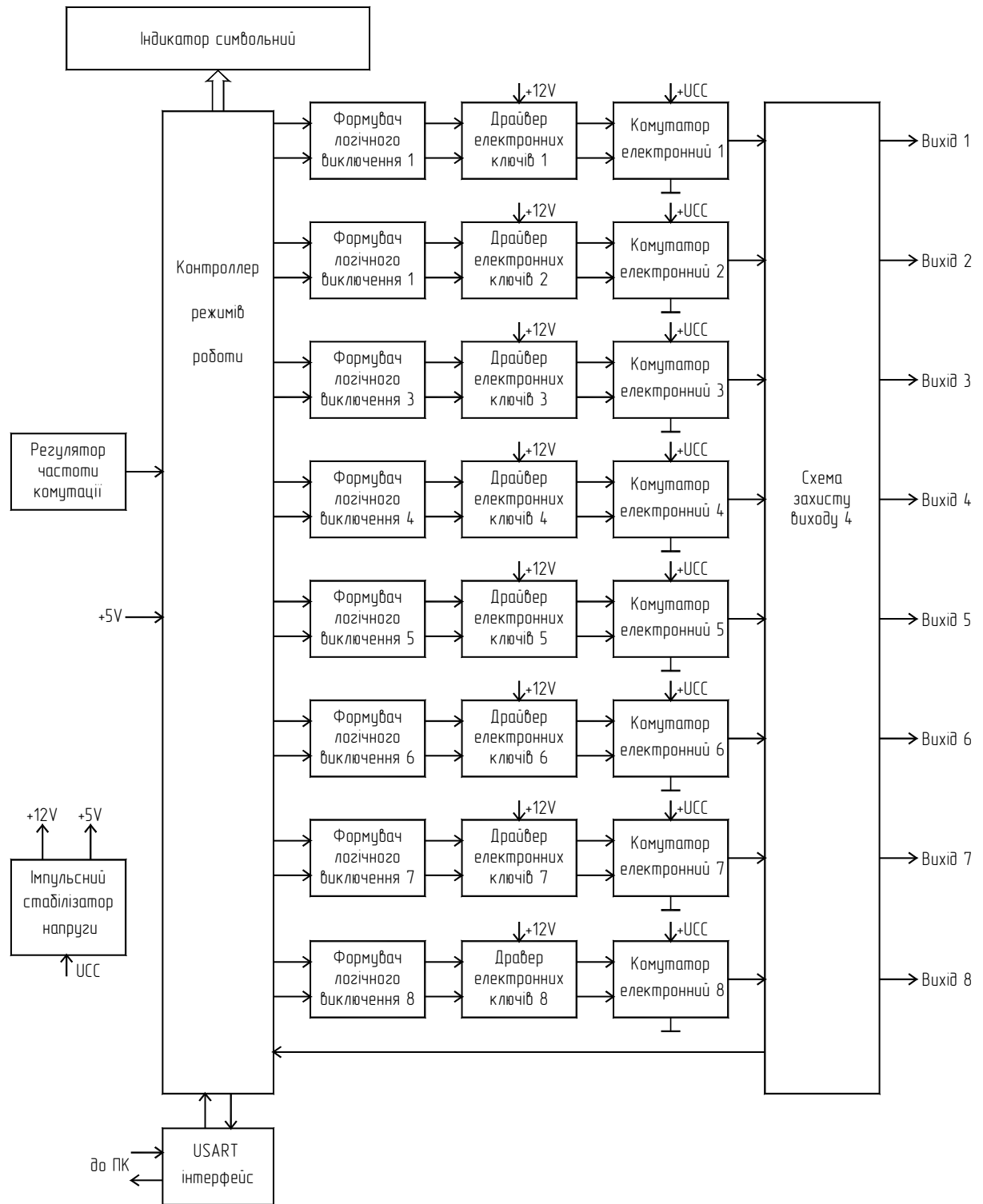


Рисунок 22 - Структурна схема контролера пропорційного керування кроковим двигуном

Формувач логічного виключення усуває можливість одночасного включення пари драйверів (верхнього та нижнього), що усуває небезпеку одночасного включення пари ключів і як наслідок виникнення наскрізних струмів електронного комутатора, що приводить до пошкодження силових ключів.

За допомогою регулятора частоти комутації здійснюється плавне регулювання швидкості обертання ротор у безперервному режимі роботи крокового двигуна.

Схема захисту виходу електронних комутаторів призначена для усунення впливу циркуляційних струмів в обмотках електричної машини в режимах інерційного ходу та миттєвої зупинки. Друга функція схеми захисту - вимірювання струмів, які проходять через нижні силові ключі електронних комутаторів та формування сигналів широтно-імпульсної модуляції сигналів заборони.

Програмування контролера та керування від персонального комп'ютера у інтерактивному режимі здійснюється через стандартний емулятор USB-USART. Відображення необхідної інформації здійснюється за допомогою символічного індикатора.

Для забезпечення режимів роботи по постійному струму окремих елементів схеми призначений імпульсний стабілізатор напруги. На його виході формуються напруги +12В для живлення драйверів вихідних комутаторів та +5В для живлення контролера режимів роботи та символічного індикатора.

### 3.1.2 Схема електрична принципова

Електрична схема контролера пропорційного керування кроковим двигуном представлена на кресленику КПТР022078.01.07ЕЗ. До складу контролера входить вісім незалежних каналів комутації напрямків струмів

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





витоком і затвором VT1. Діод VD2 виконує захисну функцію від зворотних напруг, які виникають під час комутаційних процесів.

Резистори R11 і R12 призначені для пониження високого вхідного опору драйвера з метою зменшення рівня наведених завад.

Сигнали керування драйверами вихідних ключів формуються на виході мікроконтролера DD2. Мікроконтролер послідовної дії має 32 незалежні виводи, які можуть бути налаштовані як входи так і виходи. У складі контролера аналогово-цифровий перетворювач, джерело опорної напруги, які використовуються для контролю струмів, які протікають через електронні комутатори.

Керування режимами роботи контролера здійснюється за допомогою чотирьох кнопок SB1...SB4. Для відтворення необхідної інформації використовується символний рідинно-кристалічний дисплей. Дисплей підключений до мікроконтролера у чотирьох бітному режимі з використанням тільки двох сигналів керування RS (Register Select) та En (Enable). Сигнал керування RS визначає в який з двох - регістр команд або регістр даних буде записуватись інформація. Сигнал керування En - є тактовим сигналом. За його фронтами здійснюються внутрішні операції у внутрішньому контролері дисплея.

Програмування мікроконтролера та комунікація з персональним комп'ютером здійснюється через USB-роз'язтя X5 за допомогою асинхронного трансівера, який входить до складу мікроконтролера.

Резистор R1 призначений для безпосереднього регулювання швидкості електричного двигуна, тобто частотою комутації струмів в обмотках статора.

Живлення окремих частин схеми здійснюється від джерела живлення, яке побудовано на основі імпульсного перетворювача напруги DD3 та лінійного стабілізатора DA9. Застосування імпульсного перетворювача напруги дозволяє значно підвищити ефективність джерела живлення -

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

коефіцієнт корисної дії та зменшити потужність розсіювання. Для невеликих струмів споживання достатньо лінійного стабілізатора напруги [10].

### 3.2 Електричні розрахунки елементів пристрою

На рисунку 26 представлено область безпечної роботи транзистора, де пов'язані напруга, яка прикладена між стоком та витоків транзистора ( $V_{DS}$ ), тривалість імпульсу струму та величина струму каналу транзистора ( $I_D$ ) [12,13].

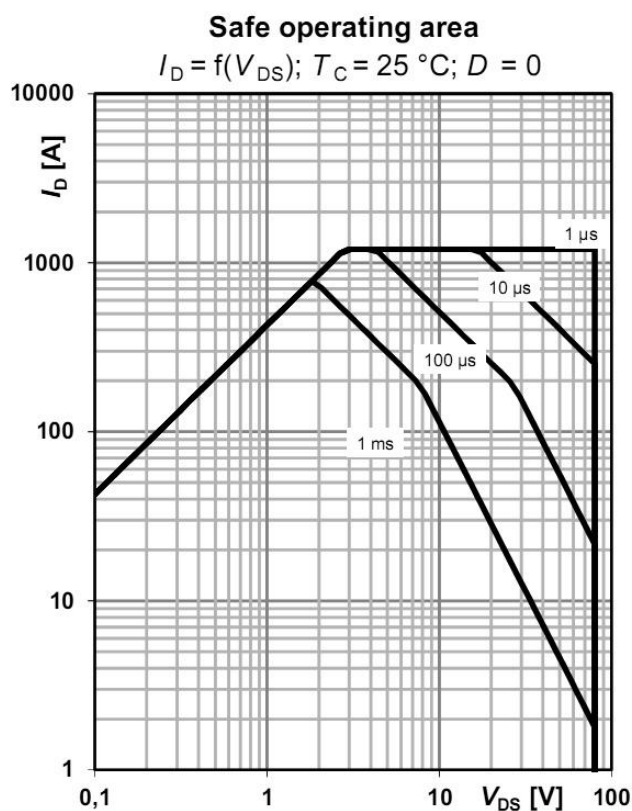


Рисунок 26 - Область безпечної роботи транзистора IPB06N03LA

З наведених графіків видно, що для максимальної напруги живлення 30В струм відкритого каналу транзистора не повинен перевищувати 10А протягом 1 мілісекунди.

На рисунку 27 представлено залежності внутрішнього опору транзистора відкритого каналу для різних струмів, які протікають через канал, та напруги керування між затвором і витоком польового транзистора.

З наведених графіків видно, що для зменшення впливу нелінійності залежності опору каналу транзистора від струму, який протікає через цей канал необхідно, щоб напруга між затвором та витоком була близько 10В. Таким чином для живлення драйверів IRS2186 вибрано напругу живлення 12В. Опір відкритого каналу польового транзистору у цьому випадку буде становити мізерні 5 мОм.

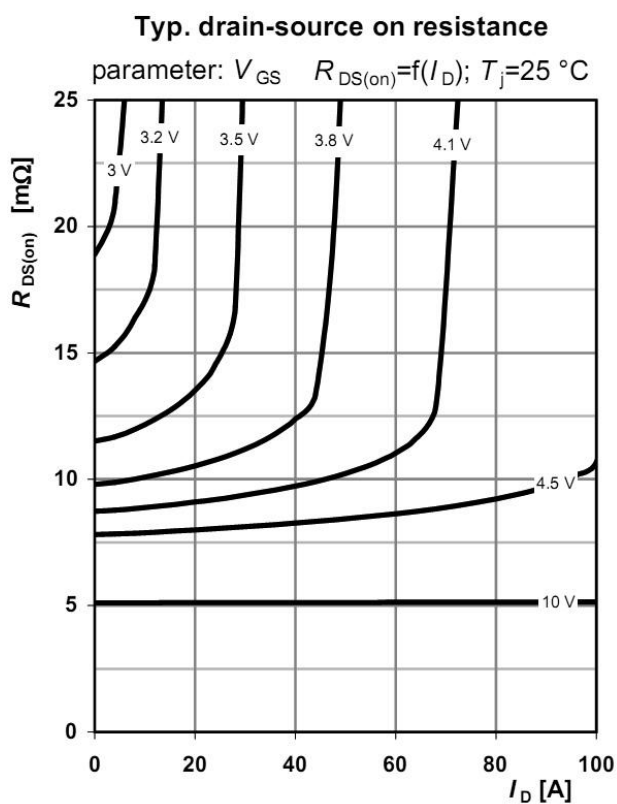


Рисунок 27 - Залежність опору відкритого каналу від струму та напруги між затвором і истоком IPB06N03LA

Потужність, яка буде виділятися на внутрішньому опорі транзистора при струмі 10А протягом 1 мс становитиме:

$$P_{DS} = I_{Dmax}^2 \cdot R_{DS} = 10^2 \cdot 0,005 = 0,5(Bm) \quad (1)$$

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $P_{DS}$  - потужність, яка виділяється на переході стік-виток, *Вт*;

$I_{Dmax}$  - максимальний струм стоку, *А*;

$R_{DS}$  - активний опір відкритого каналу транзистора, *Ом*.

Потужність, яка може бути розсіяна без додаткових засобів тепловідводу для корпусу типу ТО-220 становить 1Вт. Таким чином потужність яка буде виділятися на транзисторі під час проходження максимального струму не перевищує граничного значення (1).

Максимальна частота слідування імпульсів керування обмотками статора для двигуна ШД-5Д1МУ3 16000 імпульсів за секунду (Таблиця 3). Частота слідування імпульсів керування по кожній фазі буде становити:

$$F_{зб} = \frac{F_{макт.}}{N_{обм}} = \frac{16000}{6} = 2700(\text{Гц}), \quad (2)$$

де  $F_{зб}$  - частота збудження окремої обмотки, *Гц*;

$F_{макт.}$  - тактова частота переключення обмоток, *Гц*;

$N_{обм}$  - кількість обмоток, *шт.*

Тоді за (2) тривалість імпульсу струму обмотки:

$$t_{имп} = \frac{1}{F_{зб}} = \frac{1}{2700} = 400(\text{мксек}) \quad (3)$$

де  $t_{имп}$  - тривалість імпульсу струму окремої обмотки, *мксек*.

Кількість кроків на один оберт двигуна:

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{кр} = \frac{360}{\varphi_1} = \frac{360}{1,5} = 240(\text{кр/об}) \quad (4)$$

де  $n_{кр}$  - кількість кроків;

$\varphi_1$  - кут повороту ротора на один крок, *град/крок*.

Швидкість обертання ротора за (4):

$$V_p = \frac{F_{зб}}{n_{кр}} = \frac{2700}{240} = 12(\text{об/сек}) \quad (5)$$

$V_p$  - швидкість обертання ротор, *об/сек*.

Швидкість обертання ротора при частоті перемикання обмоток статора 16 кГц становить 720 обертів за хвилину.

За час коли транзистор відкритий для відповідної напруги живлення струм в обмотці окремої фази буде змінюватись по закону:

$$\frac{dI_{обм.}}{dt_{имп}} = \frac{U_{жс}}{L_{обм}}, \quad (6)$$

звідки максимальне значення струму:

$$I_{имп} = \frac{U_{жс} \cdot t_{имп}}{L_{обм}} = \frac{30 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 7,5(A) \quad (7)$$

де  $U_{жс}$  - напруга живлення, що прикладається до обмотки, *B*;

$L_{обм}$  - індуктивність окремої обмотки статора, *Гн*.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середньоквадратичне значення струму обмотки:

$$I_{им.сеп} = I_{им.} \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} = 5,1(A) \quad (8)$$

$D$  - коефіцієнт заповнення інтервалу імпульсу керування.

Таким чином імпульсне значення струму (8) за час коли транзистор відкритий протягом 1 мс для індуктивності обмотки статора 4 мГн становить 7,5 А і не перевищує припустимого значення.

Енергія яка необхідна для забезпечення заданої потужності двигуна:

$$A = \frac{P_{вих}}{\eta \cdot F_{обм}} \quad (9)$$

Енергія, яка запасасться в обмотках статора при проходженні електричного струму:

$$A = \frac{L_{обм} \cdot I_{им}^2}{2} \quad (10)$$

Електрична потужність в обмотках статора згідно (9) та (10):

$$P_{вих} = \frac{L \cdot I_{им}^2}{2} \cdot F_{зб} \cdot \eta = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 5,1^2}{2} \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 147(Bm) \quad (11)$$

де  $P_{вих}$  - потужність в обмотках статора, Вт;

$L_{обм}$  - індуктивність окремої обмотки, мГн;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії.

Отже, електрична потужність двигуна в режимі обертання ротора зі швидкістю 720 об/хв. становитиме близько 150Вт.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3 Конструкторські розрахунки

#### 3.3.1 Визначення габаритних розмірів плати контролера

При компоюванні плати контролера слід мати на увазі те, що плата контролера у поєднанні зі стандартним модулем індикації та елементами керування може використовуватись як окремий безкорпусний модуль. У такому випадку доцільно передбачити можливість встановлення модуля індикації на платі та додаткові елементи кріплення [10,17].

Органи керування – кнопки типу SWT зі штировими виводами встановлюються безпосередньо на плату. У будь-якому випадку доцільно провести попереднє компоювання плати контролера з метою визначення орієнтовних значень габаритних розмірів. Вони у подальшому повинні бути узгоджені з габаритними розмірами блоку пристрою керування.

Розміри плати контролера визначаються:

- установчою площею електрорадіоелементів (ЕРЕ), які входять до складу модуля;
- необхідністю додаткових елементів кріплення та охолодження окремих груп;
- коефіцієнтом заповнення з урахуванням типу елементів та типу монтажу;
- класом точності виготовлення печатної плати.

Необхідна площа поверхні плати для розміщення усіх груп компонентів може бути визначена як:

$$S_n = K_3 \cdot \sum_{i=1}^N S_i \cdot n_i, \quad (12)$$

де  $S_n$  – площа поверхні плати;

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$S_i$  – установча площа компоненту  $i$ -ого типорозміру;

$n_i$  – кількість компонентів  $i$ -ого типорозміру;

$K_3$  – коефіцієнт заповнення поверхні плати;

$N$  – кількість типорозмірів компонентів.

Таблиця 4 – Установчі розміри компонентів контролера

Тип корпусу EPE	Кільк. (шт.)	Установчі розміри L×b (мм)	Установча площа $S_i$ (мм <sup>2</sup> )	Загальна установча площа $S_{\Sigma}$ (мм <sup>2</sup> )
LCD WH1602L	1	122×44	5368,0	5368,0
Atmega16	1	11×11	121,0	121,0
Перемикач SWT-9-17	4	12,5×12,5	156,25	625,0
Транзистор IPB06N03LA (TO220)	16	25×15	375,0	6000
IRS2106, XL7005 (DIP8)	7	6,2×5,1	31,62	221,4
Резонатор кварцовий HC49U3H	1	10,6×4,6	48,76	48,8
Резистори 0805	44	2,1×1,3	2,73	120,0
Резистор підстроєчний WX14-12	1	7,6×6,6	50,16	50,2
Конденсатори керамічні 0805	26	2,1×1,3	2,73	71,0
Конденсатори EEEFK1E101XP	2	10×10	100	200,0
Діод 1N5418, стабілізатор L78L05	17	5×5	25	425,0
Діод 1N4148	8	4×2	8	64,0
Дросель CDRH74NO, SWPA5040S	3	7,5×7,5	56,25	168,75
Роз'язтя гвинтове DG350-5.0-10P-00A	1	6,8×35	238	238,0
Вилка PLS	10×1	2,5×2,5	6,25	62,5
Елементи кріплення	6	6×6	36	216,0
Загальна установочна площа компонентів				14091

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Установчі розміри окремих компонентів та загальна площа окремих груп компонентів представлено в таблиці 6.

Загальна установча площа компонентів, які розміщено на платі модуля контролера складає близько  $14091 \text{ мм}^2$ . Для печатних плат 2-ого класу точності та ручним встановленням компонентів коефіцієнт заповнення площі поверхні плати можливо обрати у межах від 2,0 до 2,5. Для печатних плат зі значним рівнем потужності розсіювання цей коефіцієнт доцільно обрати 2,5. Для коефіцієнту заповнення  $k_3 = 2,5$  площа плати, яка необхідна, становитиме:

$$S_n = S_{yn} \cdot k_3 = 14091 \cdot 2 = 28180 (\text{мм}^2). \quad (13)$$

Площа поверхні печатної плати з одностороннім встановленням компонентів буде становити близько  $30000 \text{ мм}^2$ . Розміри сторін плати в будь-якому разі будуть визначатися після компонування компонентів на платі. Також можливо розмістити компоненти з обох сторін плати, це дасть можливість зменшити геометричні розміри модуля.

### 3.3.2 Розрахунок надійності виробу

Розрахунок полягає у визначенні показників надійності виробу по відомим характеристикам надійності складових компонент і умов експлуатації [10,17,18]. Передбачається, що відмови елементів незалежні, а елементи та системи можуть знаходитись в одному з двох станів: дієздатному та недієздатному. Еквівалентна модель схеми пристрою складається з послідовно з'єднаних елементів, що визначає систему як нерезервовану.

Інтенсивність відмов елементів із врахуванням умов експлуатації:

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \alpha(k_n, T), \quad (14)$$

де  $\lambda_{0i}$  - номінальна інтенсивність відмов;

$k_1$  - коефіцієнт впливу вібрацій;

$k_2$  - коефіцієнт впливу ударних навантажень;

$k_3$  - коефіцієнт впливу вологості та температури;

$k_4$  - коефіцієнт впливу атмосферного повітряного тиску;

$\alpha(k_n, T)$  - коефіцієнт впливу температури поверхні елемента та електричного навантаження конкретного елемента.

Таблиця 5 – Інтенсивності відмов груп ЕРЕ плати контролера

Найменування ЕРЕ	$\lambda_{0i} \times 10^6$ 1/год	$\alpha(k_n, T)$	$k_1$	$k_3$	$k_4$	Кільк. ЕРЕ (шт.)	$\lambda_{\Sigma} \times 10^6$ 1/ч
Мікросхеми	0,02	1,3	1	2,5	1,0	15	0,98
Транзистори	0,06	1,2	1	2,5	1,0	16	2,9
Діоди	0,06	0,5	1	2,5	1,0	25	1,9
Конденсатори керамічні	0,01	0,2	1	2,5	1,3	26	0,17
Конденсатори електроліт.	0,01	0,5	1	2,5	1,5	2	0,04
Резистори змінні	0,04	0,6	1	2,5	1,3	2	0,2
Резистори	0,04	0,6	1	2,5	2,5	44	1,1
Дроселі індуктивні	0,2	1,2	1	2,5	2,5	3	4,5
Перемикачі кнопочні	0,4	1,0	1	2,5	2,5	4	10
Роз'язтя	0,15	1,0	1	1,0	1,3	40	7,8
Плата печатна	0,1	1,0	2	1,0	1,3	1	0,26
Пайка печат. монтажу	0,01	1,0	2	1,0	1,3	410	10,7
<b>Ітого:</b>							40,55

Виходячи з умов ТЗ, пристрій не підлягає впливу вібрацій. Таким чином коефіцієнт, який враховує механічні впливи у вигляді вібрацій

					КПТР022078.01.07ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			60

можливо прийняти  $k_1=1$ . Коефіцієнт впливу ударних навантажень приймаємо  $k_2=1$ .

Для вологості 90÷98% і температурі навколишнього середовища 30÷40°C, коефіцієнт жорсткості умов складає  $k_3=2,5$ .

Для атмосферного тиску 42÷52кПа коефіцієнт жорсткості умов коефіцієнт  $k_4=1,3$ .

Для температури 40°C і відповідному коефіцієнті навантаження електрорадіоелементів значення коефіцієнтів жорсткості умов  $\alpha(k_n, T)$  наведені в таблиці 5. Номінальні значення відмов  $\lambda_{0i} \times 10^6$  1/год відповідних ЕРЕ наведені в таблиці 5.

Можна вважати, що інтенсивність відмов джерела постійного струму живлення контролера крокового двигуна буде мати орієнтовно аналогічне значення [10]. Таким чином середній час напрацювання на відмову буде становити близько:

$$T_{\text{нр}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \lambda_{0j} N_j} = 1 / (40 \cdot 10^{-6}) = 25000(\text{год}) \quad (15)$$

що повністю задовольняє вимогам технічного завдання кваліфікаційного проєкту.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційному проєкті «Контролер пропорційного керування кроковим двигуном» представлено:

1. Загальна характеристика крокових двигунів, принцип роботи, основні характеристики та сфери застосування, переваги і недоліки. Розглянута будова сучасних типів крокових двигунів - зі змінним магнітним опором, на основі постійних магнітів, гібридних. Проаналізовані способи керування кроковими двигунами різних режимах роботи. Розглянуто переваги та недоліки схем керування струмом полярного, уніполярного, чотирьохобмоточного крокового двигуна та варіанти комутації підключення обмоток схеми захисту електронних ключів від перенавантаження її рециркуляційних струмів, також проаналізовано варіанти схем стабілізації струму обмоток.

2. Проведено аналіз завдання на дипломне проектування і розроблено основні пункти технічного завдання на універсальний контролер крокового двигуна з гнучкою логікою роботи. Визначені основні функції, які повинен підтримувати пристрій керування для забезпечення стабільної та безпечної роботи електричної машини такі як керування швидкістю обертання, підтримання крутного моменту при різних швидкостях обертання, можливість знаходження в режимі утримання ротора тривалий час при заданому зусиллі навантаження

3. Розглянуто типові аналоги контролерів керування кроковими двигунами на основі малих інтегральних схем загального призначення та великих інтегральних схем з програмованою логікою. Виявлено недоліки і переваги існуючих розробок і запропоновано власний підхід до реалізації контролера пропорційного керування різними типами крокових двигунів з будь-якою кількістю обмоток статора.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. На основі аналізу сучасних методів побудови пристроїв керування електричними машинами та аналізу функціональних можливостей спеціалізованих інтегральних компонентів розроблено електричну схему вісьмиканального контролера пропорційного керування кроковим двигуном з загальною потужністю до 200Вт. Вибір польових транзисторів з низьким опором каналу (одиниці міліом) в якості електронних комутаторів дозволив значно зменшити масо-габаритні параметри пристрою без застосування додаткових елементів забезпечення теплового режиму.

5. Оформлено електричну структурну та принципову схему виробу у вигляді креслення, представлено загальний опис елементів конструкції виробу, проведені електричні розрахунки параметрів керування кроковим двигуном потужності до 200Вт, а саме: вихідної потужності, струмів обмотки, напруги живлення обмотки, швидкості обертання ротора.

6. Проведено окремі конструкторські розрахунки, а саме визначено необхідну площу поверхні друкованої плати для розташування усіх елементів контролера із урахуванням трасування провідників. Проведено оціночні розрахунки надійності виробу за раптовими експлуатаційними відмовами, де показано, що середній час напрацювання на відмову складає близько 25000 годин, що за умови щоденного використання визначає середній час роботи у лабораторних умовах протягом 10 років.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шефер В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
2. Гнатов А.В. Аргун Щ.В. Трунова І.С. – Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник – Харків: ХНАДУ, 2016, 292с.
3. Takashi Kenio Stepping motors and their microprocessor control – Oxzford: Claredon Press, 1984 – 196 p.
4. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor. AN2974, rev. 1, 06.2005, Freescale Semiconductor, 2025, 16p.
5. Stepping Motors Fundamentals. AN907 Microchip Technology Inc. 2004, 22p.
6. DRV8825 Stepper Motor Controller IC. SLVSA73F – april 2010 – revisited july 2014, Texas Instruments, 2005, 36 p.
7. Кухарчук В.В. Бурбело М.Й. – Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Спеціальні електричні машини» для студентів напрямку «Електромеханіка» - Вінниця: ВНТУ, 2011, 37с.
8. Яцун, М.А. Електричні машини: навч. посібник/ М.А.Яцун. Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. – 400 с.
9. Зягірняк, М.В. Електричні машини: підручник/ М.В.Загірняк, Б.І.Невзлін. – 2- ге вид. переробл. і доп. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
10. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: Навч. посібник / І.В.Троцишин – Хмельницький: ХДУ. – 2004. – 488 с.
11. Коваленко І.О. Пушкар М.В. Програмне керування електромеханічними системами. Курс лекцій для студентів напряму підготовки "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" – Київ: НТУУ «КПІ», 2013 – 116 с.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

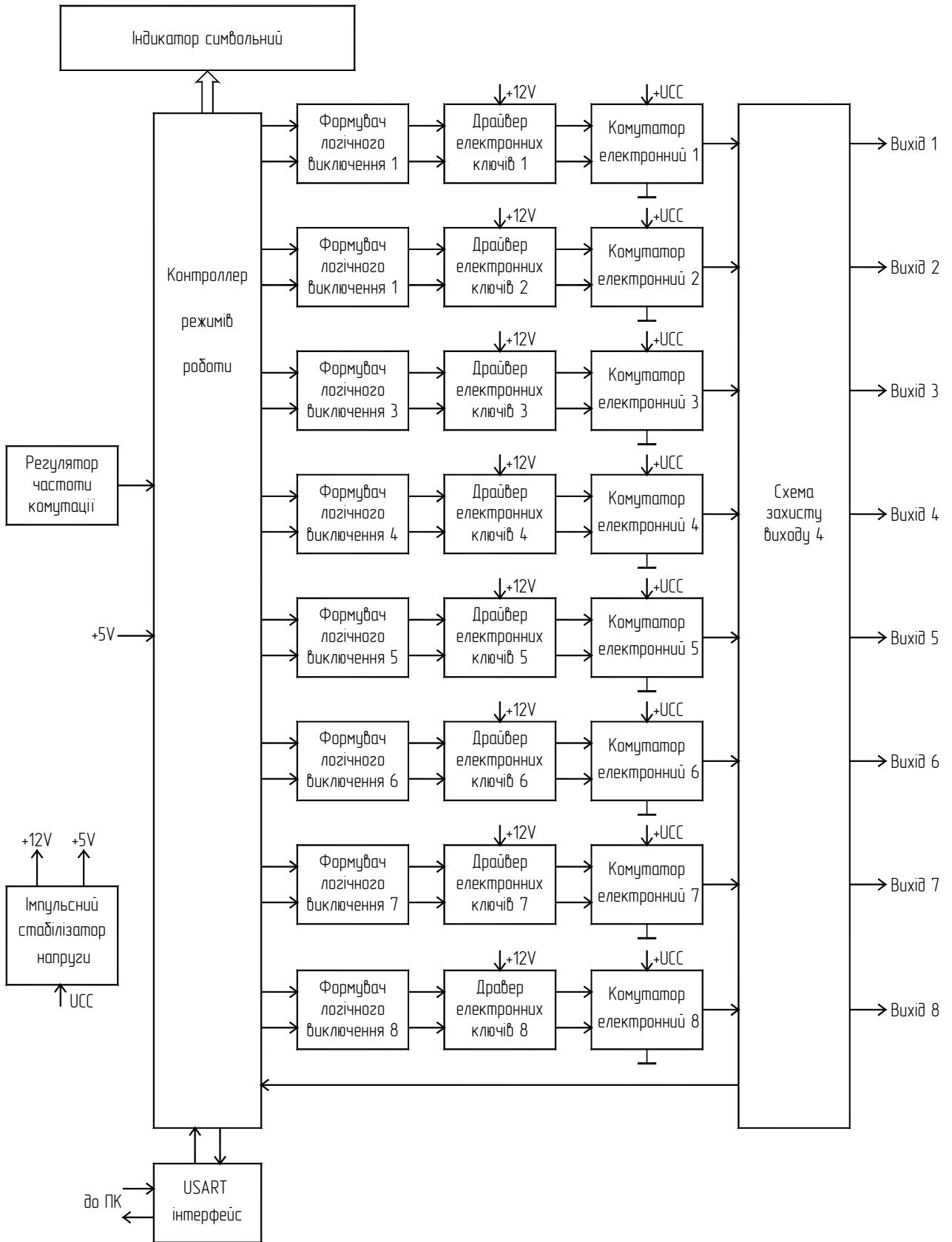
12. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. Application report. Texas Instruments: SLUA618A–March 2017–Revised October 2018, 48p.
13. General purposes power MOSFET. Published by Infineon Technologies. Austria: AG 9500 Villach, 2024, 13p.
14. Paul Emerald Non-Intrusive Hall-Effect Current Sensing Techniques. Product Information. USA, Allegro Micro Systems, 2022, 19p.
15. Швець Є.Я. Матеріали і компоненти електроніки: навч. посібник/ Є.Я.Швець, І.Ф.Червоний, Ю.В.Головко – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.
16. Yang, Yongheng, et al. "Design for reliability of power electronic systems." Power electronics handbook. Butterworth-Heinemann, 2018. 1423-1440.
17. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник. / І.І.Василенко, В.В.Широков, Ю.І.Василенко. – Львів: «Магнолія-2006», 2009. – 242 с.
18. Методичні вказівки щодо організації, проведення та підготовки звіту з переддипломної практики для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»/ уклад.:Підченко С.К., Огнєвий О.В., Таранчук А.А., Мішан В.В. / за заг. ред. С.К.Підченко. – Хмельницький: ХНУ, 2021. – 29с.

					КПТР022078.01.07ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

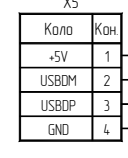
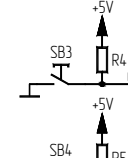
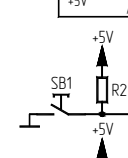
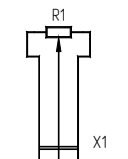
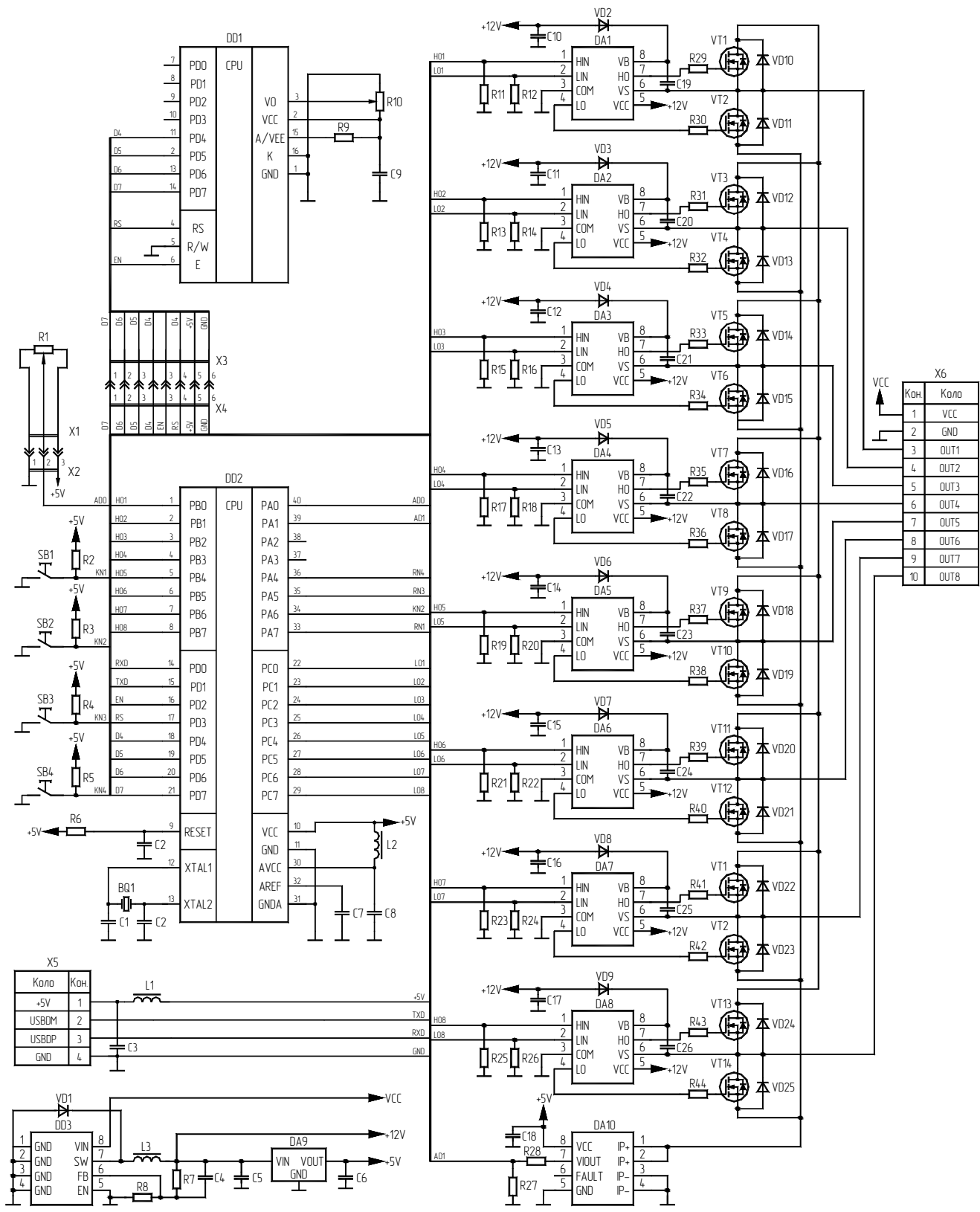
Поз. познач.	Найменування	Кільк.	Примітки
C1,C2	Конденсатор 0805-X7R-50V-18pF	2	
C3,C4	Конденсатор 0805-X7R-50V-0,1uF	2	
C5,C6	Конденсатор Panasonic EEEFK1E101XP	2	
C10...C18	Конденсатор 0805-X7R-50V-1uF	9	
C19...C26	Конденсатор 0805-X7R-50V-2,2uF	8	
DA1-DA8	MOSFET Driver IOR IRS2106S	8	
DA9	Стабілізатор напруги L78L05ABUTR	1	
DA10	Давач струму ACS715LLCTR-20A-T	1	
DD1	Індикатор LCD WINSTAR WH1602L - NGG - CT	1	
DD2	Мікроконтролер ATMEL ATMEGA 16A	1	
DD3	Стабілізатор імпульсний XL7005	1	
L1	Дросель індуктивний CDRH74NO-101MC	1	
L2	Дросель індуктивний CDRH74NO-101MC	1	
L3	Дросель індуктивний SWPA5040S101MT	1	
R1	Резистор змінний WX14-12-10kOm	1	
R2...R7	Резистор 0805-10kOm-5%	6	
R8	Резистор 0805-1kOm-5%	1	
R9	Резистор 0805-200 Om-5%	1	
R10	Резистор змінний 3296W-10K	1	
R11...R26	Резистор 0805-5kOm-5%	16	
R27	Резистор 0805-5.1kOm-5%	1	
R28	Резистор 0805-200 Om-5%	1	
R29...R44	Резистор 0805-10 Om-5%	16	

					КПТРО22078.01.07ПЕ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Контролер пропорційного керування кроковим двигуном Перелік елементів	Літер.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Михайловський		<i>[Підпис]</i>	1.06.26		У	1	2
Перевір.	Пивовар		<i>[Підпис]</i>	1.06.26				
Н.контр.	Стецюк		<i>[Підпис]</i>	1.06.26				
Затв.	Підченко		<i>[Підпис]</i>	1.06.26				
						ХНУ, ФІТ		

Поз. познач.	Найменування	Кільк.	Примітки
VD1	Діод імпульсний Vishay SS210	1	
VD2-VD9	Діод імпульсний Vishay 1N4148	8	
VD10-VD25	Діод імпульсний Vishay 1N5418	16	
VT1-VT16	Транзистор Power MOSFET IPB06N03LA	16	
SB1-SB4	Перемикач кнопочний SWT-9-17	4	
X1	Вилка PLS-3	1	
X2	Розетка PBS-3	1	
X3	Вилка PLS-8	1	
X4	Вилка PBS-8	1	
X5	Гніздо USBB-1F	1	
X6	Роз'язтя звинтове DG350-5.0-10P-00A	1	
Зм.	Арк.	N докум.	Підпис
			Дата
			Арк.
КПТРО22078.01.07ПЕ			2



КПТРО22078.01.07Е1						Лист	Маса	Масштаб
Вид	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата	Контролер пропорційного керування кроковим двигуном			9
Розроб	Проєктувальник				Схема електрична структурна			Арк.заб.1
Перевір	Підпис							
І констр.								
ІІ констр.	Специал.							
Замб.	Підпис							
							ХНУ, ФІТ	



Кол.	Коло
1	VCC
2	GND
3	OUT1
4	OUT2
5	OUT3
6	OUT4
7	OUT5
8	OUT6
9	OUT7
10	OUT8

КІПР0720780107ЕЗ					
Знак	Арк.	Н. введ.	Підпис	Дата	
Розроб.	К. Сидоренко				
Перевір.	Н. Сидор				
Ілюстр.					
Норматив	Стандарт				
Зам.	Н. Сидоренко				
Контролер пропорційного керування кроковим двигуном					
Схема електрична пристрою					
			Лист	Маса	Масштаб
			9		
			Архив	Архив 1	
ХНУ, ФІТ					

**Тема КВАЛІФІКАЦІЙНОГО проєкту бакалавра:**  
**«Контролер пропорційного керування кроковим двигуном»**

Автор проєкту:

ст. гр. ТР2-22-1 Михайловський Павло Володимирович.

Керівник проєкту:

канд. тех. наук, доцент Пивовар Олег Сергійович.

Пояснювальна записка: 66 сторінок, 27 рисунків, 7 таблиць,  
18 джерел посилання.

Графічна частина: 2 креслення, 8 презентаційних слайдів.

Метою кваліфікаційного проєкту є розробка варіанту універсального пристрою з програмованою логікою роботи, що дасть можливість використання його для дослідження властивостей і параметрів різних типів крокових двигунів та побудови лабораторних стендів різноманітного призначення на їх основі.

1

**Типи крокових двигунів**

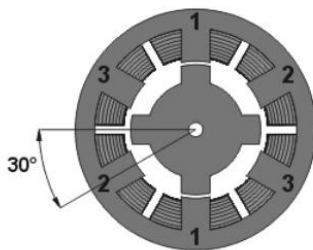


Рисунок 1 – Схема крокового двигуна зі змінним магнітним опором

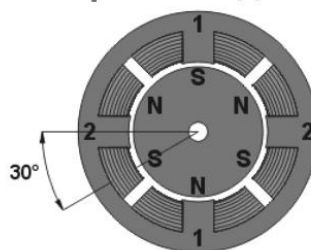


Рисунок 2 – Схема крокового двигуна постійними магнітами

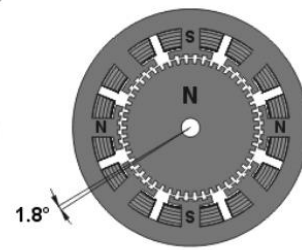


Рисунок 3 – Схема гібридного крокового двигуна

**Типи обмоток статора крокових двигунів**



Рисунок 4 - Біполярний

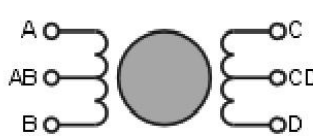


Рисунок 5 - Уніполярний



6 - Чотирьохобмоточний

2

## Діаграми різних способів керування кроковим двигуном

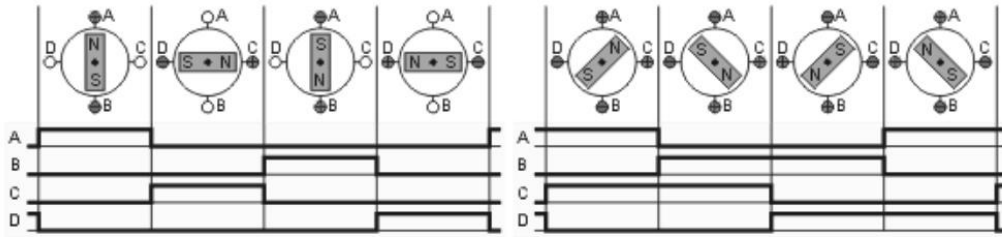


Рисунок 1 - Повнокроковий режим, включено одна фаза

Рисунок 2 - Повнокроковий режим, включено дві фази

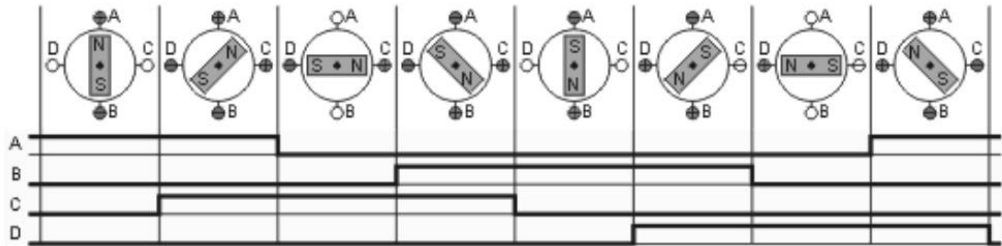


Рисунок 3 - Напівкроковий режим

3

## Особливості керування кроковими двигунами

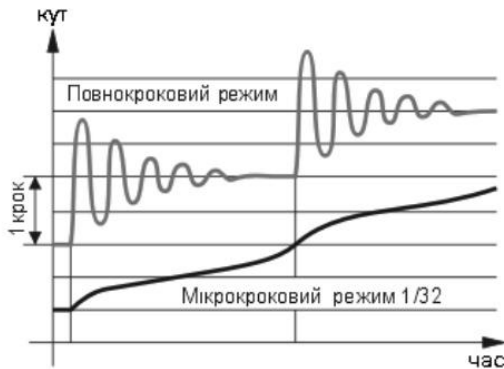


Рисунок 1 – Переміщення ротора у повнокроковому та мікрокроковому режимі

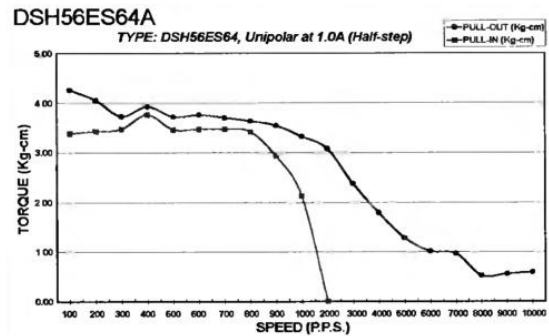


Рисунок 2 – Залежність крутного моменту від швидкості обертання ротора

## Керування струмом обмоток статора

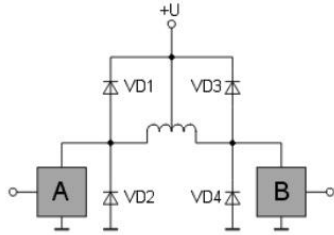


Рисунок 1 - Живлення обмоток уніполярного двигуна

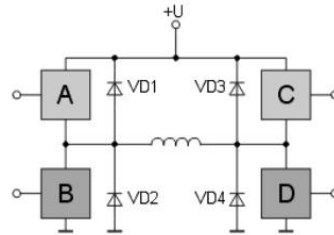


Рисунок 2 - Живлення обмоток біполярного двигуна

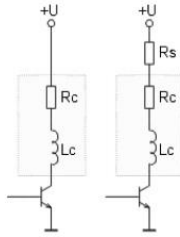


Рисунок 3 - Обмеження струму

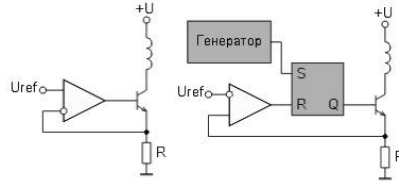


Рисунок 4 - Стабілізації струму

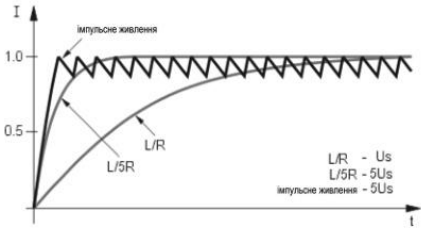


Рисунок 5 – Форма струму в обмотках при різних схемах живлення

5

## Аналоги і прототипи контролера пропорційного керування



Рисунок 1 – Кроковий двигун ШД-5Д1МУЗ

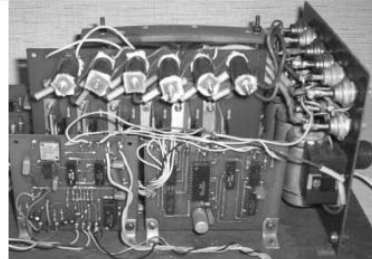


Рисунок 2 – Пристрій керування кроковим двигуном ШД-5Д1МУЗ

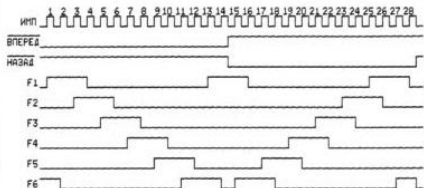


Рисунок 3 – Послідовність імпульсів керування ШД-5Д1МУЗ

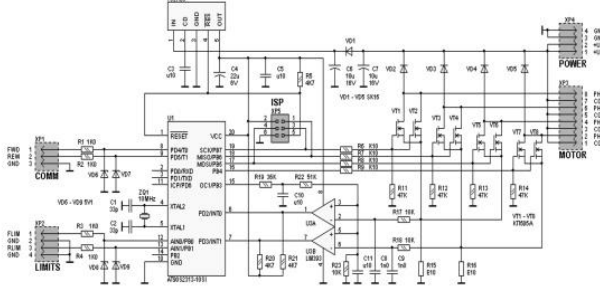


Рисунок 4 - Електрична схема контролера для керування уніполярним кроковим двигуном

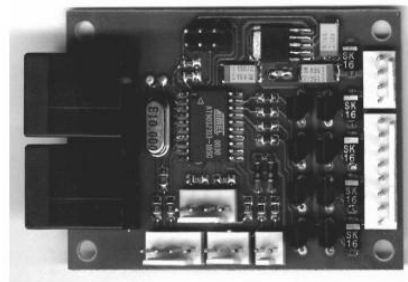
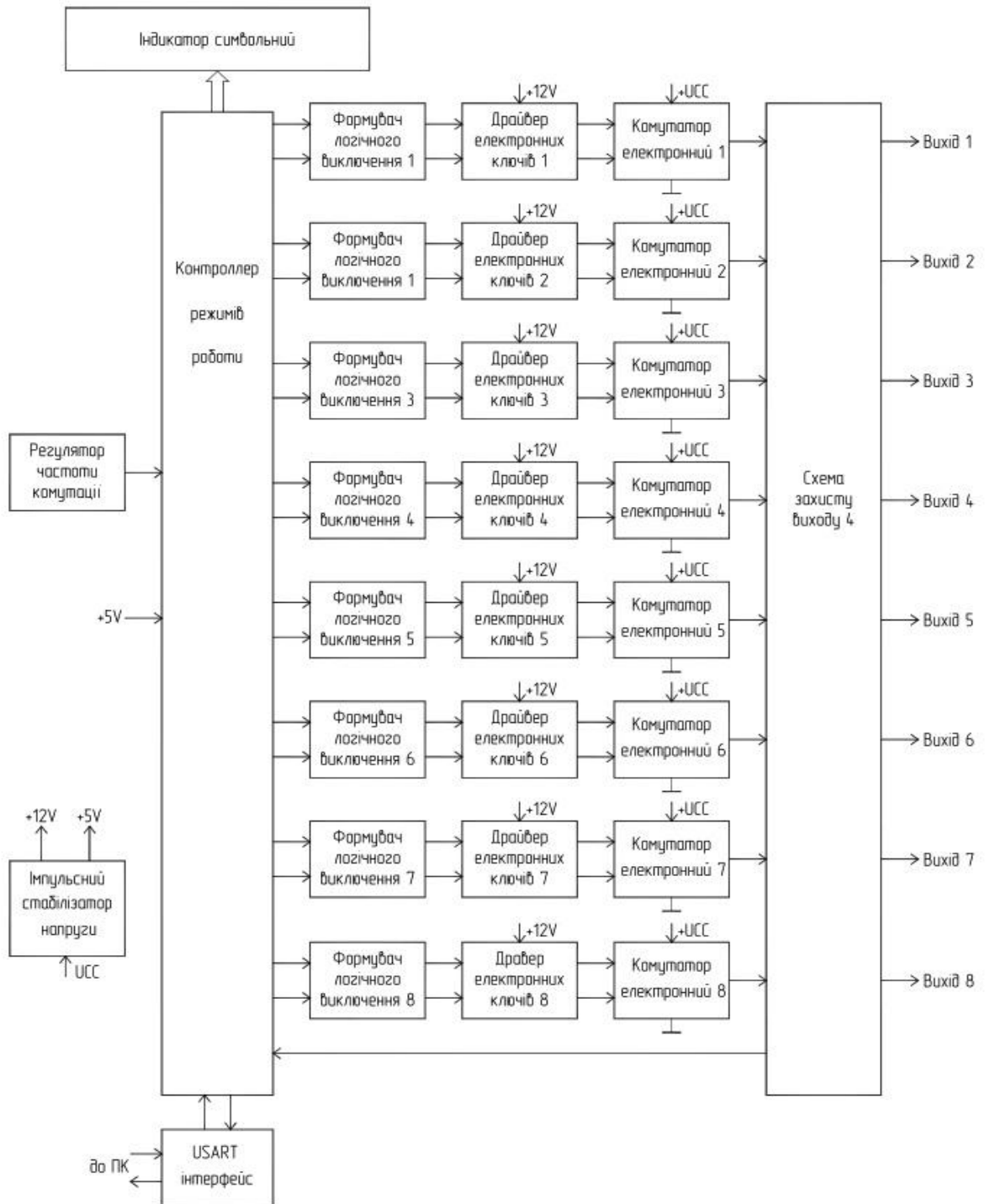


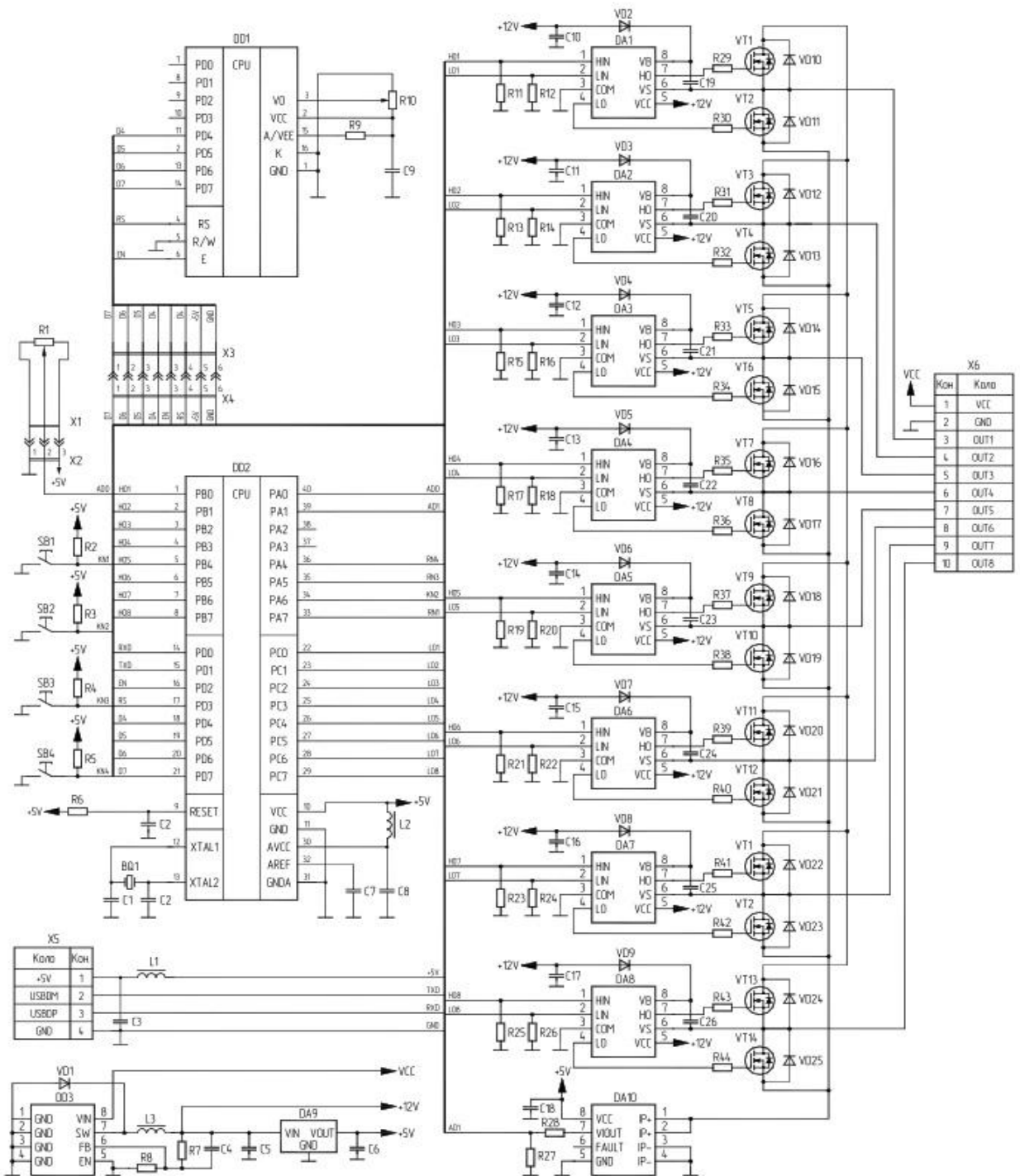
Рисунок 5 – Контролер для керування уніполярним кроковим двигуном

6

# Схема електрична структурна



# Схема електрична принципова



## Висновки

1. Проведено аналіз принципів роботи, характеристик, зон застосування, переваг і недоліків різних типів крокових двигунів: зі змінним магнітним опором, на основі постійних магнітів та гібридних. Подано можливі способи керування кроковими двигунами із різним включенням обмоток із схемами захисту ключових схем керування із варіантами стабілізації струму обмоток.
2. Проведено аналіз завдання на дипломне проектування і розроблено основні пункти технічного завдання на універсальний контролер крокового двигуна з гнучкою логікою роботи для забезпечення стабільної та безпечної роботи під час керування швидкістю обертання, підтримання крутного моменту та утримання ротора за умови певного зусилля навантаження.
3. Запропоновано власний підхід до реалізації контролера пропорційного керування різними типами крокових двигунів з будь-якою кількістю обмоток статора. Розроблено електричні схеми восьмиканального контролера пропорційного керування кроковим двигуном з загальною потужністю до 200Вт із низькоомними польовими транзисторами в якості комутаторів обмоток, що дозволило зменшити масо-габаритні параметри пристрою без застосування додаткових елементів забезпечення теплового режиму.
4. Проведені електричні розрахунки параметрів керування кроковим двигуном потужності до 200Вт, а саме: вихідної потужності, струмів обмотки, напруги живлення обмотки, швидкості обертання ротора, а також конструкторські розрахунки площі поверхні друкованої плати та надійності за раптовими відмовами.

**Дякую за увагу, доповідь закінчено!**

Завідувачу кафедри  
телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій (ТМІТ)  
Підченко С.К.  
здобувача вищої освіти  
студента 4 курсу, гр. ТР2-22-1  
Михайловський Павло Володимирович

### ЗАЯВА

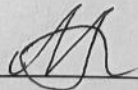
З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційного проекту до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

17.05.2026р

дата



підпис

Павло МИХАЙЛОВСЬКИЙ

**Anti-Plagiarism (http://ap.km.ua) v-16.718****Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%**Словники перевірки: UA, US, RU. **Помилки в документах: 8%**

ID: 271758 Назва: Контролер пропорційного керування кроковим двигуном Додано в БД: 2026-05-20 Автора: Михайловський Павло Володимирович Керівники: Пивовар Олег Сергійович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	65186	633	3231 (5%)	46 (7%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Павло МИХАЙЛОВСЬКИЙ TR2-22-1

Співавтор:

Назва: Контролер пропорційного керування кроковим двигуном

Науковий керівник: Олег ПИВОВАР к.т.н., доц.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:13.61%

Коефіцієнт подібності 2:3.22%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 248

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-18 21:24:07.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.


Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата

18.05.26

експерт

к.т.н. доц.  
Пивовар О.С.  


РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ  
Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Контролер пропорційного керування кроковим ДВИГУНОМ

Автор Михайловський Павло Володимирович, гр. ТР2-22-1

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: Пивовар Олег Сергійович к.т.н., доц.

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Результати перевірки на плагіат системою Antiplagiarism – 2%.

Результати перевірки на плагіат системою Strikeplagiarism – 13,6%.

Виявлені мінімальні запозичення є випадковими збігами або результатами обробки форм стандартних бланків та не є плагіатом.

Дата 1.06.26.

Завідувач кафедри ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Гарант освітньої програми



Віктор СТЕЦЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи



Олег ПИВОВАР  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

Направляється студент Михайловський Павло Володимирович на захист кваліфікаційної роботи  
(прізвище, ім'я, по батькові)

за спеціальністю 172 - Телекомунікації та радіотехніка

На тему: Контролер пропорційного керування кроковим двигуном

Кваліфікаційна робота, рецензія і довідка про перевірку на академічні запозичення додаються.

В.О. Декан факультету



Сергій Лисенко  
(ім'я, прізвище)

### ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Михайловський П.В. з 2022 по 2025 роки повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за:

національною шкалою: відмінно 13,04 %, добре 34,78 %, задовільно 52,17 %.

шкалою ЄКТС: А 13,04 %, В 21,74 %, С 13,04 %, D 26,09 %, Е 26,09 %.

Методист факультету

Тетяна Ковал  
(підпис)

Тетяна Ковал  
(ім'я, прізвище)

### ВИСНОВОК КЕРІВНИКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Михайловський П.В. під час роботи над кваліфікаційним проектом глибоко дослідив питання конструкції та керування кроковим двигунами середньої потужності, навів переконливі аргументи щодо запропонованих рішень, висувив старанні з оформлення, із розумінням ставився до порад керівника, відповідально підійшов до проведення розрахунків та надання графічного матеріалу.

Оцінка кваліфікаційної роботи відмінно

Керівник кваліфікаційної роботи

Олег ПИВОВАР  
(підпис)

Олег ПИВОВАР  
(ім'я, прізвище)

" 4 " червня 2026 р.

### ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кваліфікаційну роботу розглянуто. Студент Михайловський П.В. допускається до її захисту на екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Телекомунікацій, медіа та інтелектуальних технологій  
(назва)

Сергій ПІДЧЕНКО  
(підпис, ім'я, прізвище)

" 4 " червня 2026 р.

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційний проект студента групи ТР2-22-1

Михайловського Павла Володимировича


«Контролер пропорційного керування кроковим двигуном»

Кваліфікаційний проект бакалавра складається із текстової частини, що складається із вступу, 3 розділів, висновків з виконання проекту, списку використаних джерел та додаткових матеріалів у кінці звіту. Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 66 сторінок і є достатнім для кваліфікаційних проектів бакалаврів. Графічна частина представлена 2 кресленням загальним обсягом 2 аркуші формату А2 із необхідними переліками елементів. В додатках подані усі необхідні документи для захисту та підтвердження автентичності

Перевагами кваліфікаційного проекту є пропозиції щодо створення універсального пристрою керування кроковими двигунами з різною кількістю і будовою обмоток статора і реалізації мостової, напівмостової схем керування струмами обмоток при застосуванні широтно-імпульсної модуляції для підтримання крутного моменту в різних режимах роботи: кроковому, напівкроковому та режимі статичного утримання. Використана сучасна елементна база спеціального призначення з високим рівнем надійності і інтеграції. В якості керуючого пристрою використано мікроконтролер загального використання з програмованою логікою.

В цілому кваліфікаційний проект ст. гр.. ТР2-22-1 Михайловського Павла Володимировича “Контролер пропорційного керування кроковим двигуном” виконано на високому технічному рівні та може бути рекомендовано до впровадження як навчально-лабораторний засіб. Проект заслуговує оцінку “відмінно”.

Рецензент:

Мартинюк В.В., д.т.н., проф.  
проф. каф. АІТ та РХМ  
 1 червня 2026 р.