

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр  
Освітній рівень

Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна

Назва теми

КВРАКІТ.2019062.01.04.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

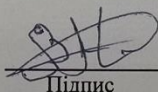
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

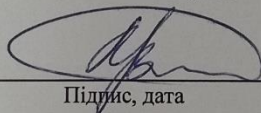
Виконав:

студент IV курсу, група АКІТс-19-1

  
Підпис

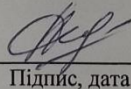
Вадим НАХІМЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

  
Підпис, дата


Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри автоматизації  
та комп'ютерно-інтегрованих  
технологій

  
Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«18» червня 2022 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма освітньо-професійна програма підготовки бакалавра

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри А.І.Т.У.

В.М.Мереминський

02.03.2022

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Нахімчук Вадим Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна

Керівник роботи МАРТИНЮК Валерій Володимирович

доктор техн. наук, професор

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

Затверджено наказом ректора університету від 01.03.2022р. № 18



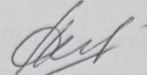
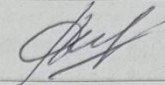
2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 01.06.2022

3. Вихідні дані до проекту завдання на виконання кваліфікаційної роботи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, Огляд методів розв'язання поставленої задачі, Розробка схемотехнічних рішень, Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення, висновки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) 12-15 презентаційних слайдів

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

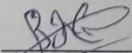
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Микола ФЕДУЛА к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Людмила КОРЕЦЬКА к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 02 03 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

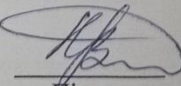
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Вибір та затвердження теми кваліфікаційної роботи; розробка завдання на кваліфікаційну роботу; складання календарного графіка виконання кваліфікаційної роботи	15.02.2022	виконано
2 Вивчення предметної області, в якій планується використання системи автоматизації; аналіз вимог до системи автоматизації	15.03.2022	виконано
3 Проектування та розробка загальної архітектури і структури системи автоматизації, інтерфейсу користувача; вибір засобів реалізації системи автоматизації	29.03.2022	виконано
4 Програмна реалізація та тестування системи автоматизації	12.04.2022	виконано
5 Написання тексту пояснювальної записки та розробка графічних матеріалів	19.04.2022	виконано
6 Остаточне коригування кваліфікаційної роботи з урахуванням зауважень керівника; оформлення кваліфікаційної роботи як документа відповідно до вимог	11.04.2022	виконано
7 Отримання супровідних документів (відгуку керівника, рецензії, довідки про перевірку на плагіат); нормоконтроль	30.05.2022	виконано
8 Підготовка до захисту та захист кваліфікаційної роботи	10.06.2022	виконано

Студент

  
Підпис

В.В. Нахімчук  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

В.В. Мартинюк  
Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна».

Автор роботи: Нахімчук Вадим Володимирович.

Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович

Пояснювальна записка: \_\_ с., \_\_ рис., \_ табл., \_ дод., \_\_ джерел.

Графічна частина: 15 презентаційних слайдів.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ,  
КРОКОВИЙ ДВИГУН, МІКРОКОНТРОЛЕРНЕ КЕРУВАННЯ.

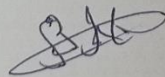
Метою роботи є дослідження методів та принципів побудови крокових двигунів та способів їхнього керування.

В роботі проведено дослідження крокових двигунів. Описані різні їх типи. Вказано на особливості їх конструкцій та способів керування.

Запропоновано схему для дослідження параметрів крокових двигунів. Схема дозволяє в автоматичному та ручному режимі досліджувати параметри крокового двигуна.

Розроблено алгоритм та програмне забезпечення макету для дослідження параметрів крокових двигунів.

Підпис студента



14.06.2022р.  
Дата

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	2
ВСТУП .....	3
1 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ З КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ.....	5
1.1 Контролер крокового двигуна .....	5
1.2 Двигуни зі змінним магнітним опором.....	9
1.3 Двигуни з постійними магнітами .....	10
1.4 Гібридні двигуни.....	12
1.5 Біполярні та уніполярні крокові двигуни.....	16
1.6 Порівняння біполярних чи уніполярних крокових двигунів .....	17
1.7 Висновки до першого розділу .....	41
2 РОЗРОБКА СХЕМНИХ РІШЕНЬ .....	42
2.1 Розробка структурної схеми пристрою .....	42
2.2 Вибір елементної бази .....	42
2.3 Схема електрична.....	47
2.4 Висновки до другого розділу .....	67
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....	68
3.1 Розробка алгоритму роботи пристрою .....	68
3.2 Висновки до третього розділу .....	82
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	84

					<b>КВРАКІТ.2019062.01.04.ПЗ</b>			
Зм	Лист	№ докum	Підпис	Дата	Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна	Літ	Лист	Листів
Розроб.	Нахімчук В.В.			18.06.22			2	
Перевір.	Мартинюк			18.06.22				
Н. Контр.	Корсуньєв С.А.			18.06.22				
Затв.	Мартинюк В.В.			18.06.22			ХНУ	

## ВСТУП

Останні роки відзначені масовим наповненням ринку всілякою автоматизованою апаратурою різного призначення та різної складності від пластикової платіжної картки до холодильника, автомобіля та найскладніших установок. Це стало можливим завдяки мікроконтролерам (МК). Мікроконтролери входять у всі сфери життєдіяльності людини, їхня насиченість у нашому оточенні зростає рік у рік.

Фірми виробляють мікроконтролери ATMEL, INTEL, ZILOG, MICROCHIP, АНГСТРЕМ, scenix, здається, можна продовжувати нескінченно. Кожна з перерахованих фірм крім АНГСТРЕМ має понад 100 видів різних за призначенням мікроконтролерів, а кожен мікроконтролер не менше 200 сторінок технічних описів та характеристик плюс до цього англійською мовою, крім АНГСТРЕМ. Виберіть свій девіз сучасного суспільства.

Засоби розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів у кожної фірми своє, а щодо мов програмування, звичайно, асемблер найстаріший, також програмуються мовами: C, PASCAL, JAVA, DELPHI, C++, +TURBO,+VISUAL.

На сьогоднішньому етапі розвитку інформаційних технологій все ширше впроваджуються у виробництво із системою автоматизованого управління. Поряд із такими важливими елементами, як первинні перетворювачі інформації та системи управління важливу роль відіграють виконавчі пристрої різного роду. Одним із видів таких пристроїв є електроприводи. Одним з підвидів електроприводом є кроковий привід. Крокові двигуни отримали широке поширення за рахунок простоти управління, високої точності позиціонування, великого діапазону швидкостей, низької вартості. У цьому

роботі описується пристрій управління кроковим двигуном, що є основою побудови лабораторного стенду для дослідження його характеристик.

					<i>КВРАКІТ.2019062.01.04.ПЗ</i>	
		<i>№ докум.</i>	<i>Піппис</i>			4

# 1 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ З КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ

## 1.1 Контролер крокового двигуна

Крокові двигуни вже давно і успішно застосовуються в найрізноманітніших пристроях. Їх можна зустріти у дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а також у різноманітному промисловому та спеціальному обладнанні. В даний час випускається безліч різних типів крокових двигунів на всі випадки життя. Однак правильно вибрати тип двигуна - це ще половина справи. Не менш важливо правильно вибрати схему драйвера та алгоритм його роботи, який часто визначається програмою мікроконтролера. Мета цієї статті – систематизувати відомості про пристрій крокових двигунів, способи управління ними, схеми драйверів та алгоритми. Як приклад наведено практичну реалізацію простого та дешевого драйвера крокового двигуна на основі мікроконтролера сімейства AVR

Що таке кроковий двигун, і навіщо він потрібний?

Кроковий двигун – це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси на дискретні механічні переміщення. Так, мабуть, можна дати чітке визначення. Напевно кожен бачив, як виглядає кроковий двигун зовні: він практично нічим не відрізняється від двигунів інших типів. Найчастіше це круглий корпус, вал, кілька виводів (рис. 1.1).

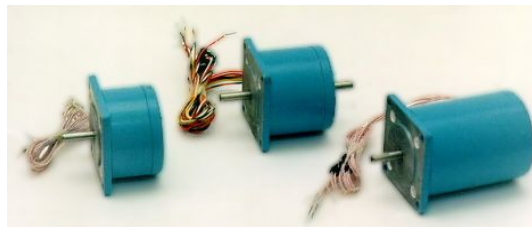


Рисунок 1.1 - Зовнішній вигляд крокових двигунів сімейства ДШІ-200.

Однак крокові двигуни володіють деякими унікальними властивостями, що робить їх винятково зручними для застосування або навіть незамінними.

Кут повороту ротора визначається числом імпульсів, які подані на двигун. Двигун забезпечує повний момент у режимі зупинки (якщо обмотки запитані) прецизійне позиціонування та повторюваність. Хороші крокові двигуни мають точність 3-5% від величини кроку. Ця помилка не накопичується від кроку до кроку. Можливість швидкого старту/зупинки/реверсування висока надійність, пов'язана з відсутністю щіток, термін служби крокового двигуна фактично визначається терміном служби підшипників; навантаження, приєднаного безпосередньо до валу двигуна без проміжного редуктора може бути перекрито досить великий діапазон швидкостей, швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів. Але не все так добре.

- кроковим двигуном властиве явище резонансу;
- можлива втрата контролю за становищем через роботу без зворотного зв'язку;
- споживання енергії не зменшується навіть без навантаження;
- утруднена робота на високих швидкостях;
- невисока питома потужність;
- щодо складна схема управління.

Крокові двигуни належать до класу безколекторних двигунів постійного струму. Як і будь-які безколекторні двигуни, вони мають високу надійність та великий термін служби, що дозволяє використовувати їх у критичних, наприклад, індустріальних застосуваннях. Порівняно зі звичайними двигунами постійного струму, крокові двигуни вимагають значно складніших схем управління, які повинні виконувати всі комутації обмоток під час роботи двигуна. Крім того, сам кроковий двигун – дорогий пристрій, тому там, де точне позиціонування не потрібне, звичайні колекторні двигуни мають помітну

перевагу. Задля справедливості слід зазначити, що останнім часом для управління колекторними двигунами все частіше застосовують контролери, які за складністю практично не поступаються контролерам крокових двигунів.

Однією з головних переваг крокових двигунів є можливість здійснювати точне позиціонування та регулювання швидкості без датчика зворотного зв'язку. Це дуже важливо, тому що такі датчики можуть коштувати набагато більше за сам двигун. Однак це підходить тільки для систем, які працюють при малому прискоренні та відносно постійному навантаженні. У той самий час системи зі зворотним зв'язком здатні працювати з великими прискореннями і навіть при змінному характері навантаження. Якщо навантаження крокового двигуна перевищить його момент, інформація про положення ротора втрачається і система вимагає базування за допомогою, наприклад, кінцевого вимикача або іншого датчика. Системи зі зворотним зв'язком не мають такого недоліку.

При проектуванні конкретних систем доводиться вибирати між сервомотором і кроковим двигуном. Коли потрібно прецизійне позиціонування і точне управління швидкістю, а необхідний момент і швидкість не виходять за допустимі межі, кроковий двигун є найбільш економічним рішенням. Як і для звичайних двигунів, для підвищення моменту може бути використаний знижувальний редуктор. Однак, для крокових двигунів редуктор не завжди підходить. На відміну від колекторних двигунів, у яких момент зростає зі збільшенням швидкості, кроковий двигун має більший момент на низьких швидкостях. До того ж, крокові двигуни мають набагато меншу максимальну швидкість у порівнянні з колекторними двигунами, що обмежує максимальне передатне число і, відповідно, збільшення моменту за допомогою редуктора. Готові крокові двигуни з редукторами хоч і існують, але є екзотикою. Ще одним фактом, що обмежує застосування редуктора, є властивий йому люфт. Можливість отримання

низької частоти обертання часто є причиною того, що розробники, будучи неспроможними спроектувати редуктор, застосовують крокові двигуни невиправдано часто. У той же час колекторний двигун має більш високу питому потужність, низьку вартість, просту схему управління, і разом з одноступінчастим черв'ячним редуктором він здатний забезпечити той же діапазон швидкостей, що кроковий двигун. До того ж, забезпечується значно більший момент. Приводи на основі колекторних двигунів дуже часто застосовуються в техніці військового призначення, а це побічно говорить про хороші параметри та високу надійність таких приводів. Та й у сучасній побутовій техніці, автомобілях, промислового устаткуванні колекторні двигуни поширені досить сильно. Тим не менш, для крокових двигунів є своя, хоч і досить вузька, сфера застосування, де вони незамінні.

#### Види крокових двигунів

Існують три основні типи крокових двигунів:

- двигуни зі змінним магнітним опором
- двигуни з постійними магнітами
- гібридні двигуни

Визначити тип двигуна можна навіть на дотик: при обертанні валу знеструмленого двигуна з постійними магнітами (або гібридного) відчувається змінний опір обертанню, двигун обертається ніби клацаннями. У той же час вал знеструмленого двигуна зі змінним магнітним опором обертається вільно. Гібридні двигуни є подальшим удосконаленням двигунів з постійними магнітами та за способом управління нічим від них не відрізняються. Визначити тип двигуна можна за конфігурацією обмоток. Двигуни зі змінним магнітним опором зазвичай мають три (рідше чотири) обмотки з одним загальним висновком. Двигуни з постійними магнітами найчастіше мають дві

незалежні обмотки. Ці обмотки можуть мати відведення від середини. Іноді двигуни з постійними магнітами мають 4 окремі обмотки.

У кроковому двигуні момент, що обертає, створюється магнітними потоками статора і ротора, які відповідним чином орієнтовані один щодо одного. Статор виготовлений із матеріалу з високою магнітною проникністю та має кілька полюсів. Полюс можна визначити як деяку область намагніченого тіла, де магнітне поле сконцентроване. Полюси мають як статор, і ротор. Для зменшення втрат на вихрові струми магнітопроводи зібрані з окремих пластин, подібно до сердечника трансформатора. Обертний момент пропорційний величині магнітного поля, яка пропорційна струму в обмотці та кількості витків. Таким чином момент залежить від параметрів обмоток. Якщо хоча б одна обмотка крокового двигуна запитана, ротор набуває певного положення. Він буде перебувати в цьому положенні доти, доки зовнішній прикладений момент не перевищить певного значення, званого моментом утримання. Після цього ротор повернеться і намагатиметься прийняти одне з наступних положень рівноваги.

## 1.2 Двигуни зі змінним магнітним опором

Крокові двигуни зі змінним магнітним опором мають кілька полюсів на статорі та ротор зубчастої форми з магнітом'якого матеріалу (рис. 1.2). Намагніченість ротора відсутня. Для простоти малюнку ротор має 4 зубця, а статор має 6 полюсів. Двигун має три незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора. Такий двигун має крок 30 град.



чергуються, мають прямолінійну форму і розташовані паралельно осі двигуна. Завдяки намагніченості ротора в таких двигунах забезпечується більший магнітний потік і, як наслідок, більший момент, ніж двигуни зі змінним магнітним опором.

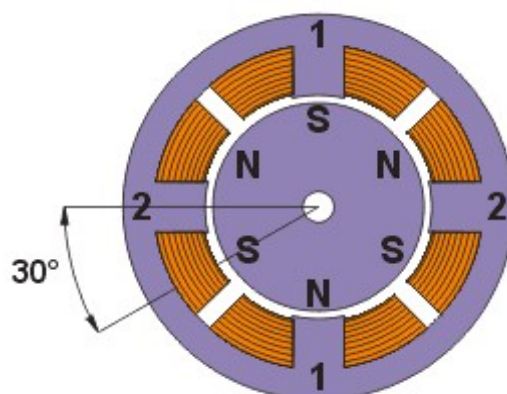


Рисунок 1.3 - Двигун із постійними магнітами.

Показаний на малюнку двигун має 3 пари полюсів ротора та 2 пари полюсів статора. Двигун має дві незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора. Такий двигун, як і розглянутий раніше двигун зі змінним магнітним опором, має величину кроку 30 град. При включенні струму в одній з катушок, ротор прагне зайняти таке положення, коли різномінні полюси ротора і статора знаходяться один навпроти одного. Для безперервного обертання потрібно включати фази поперемінно. Насправді двигуни з постійними магнітами зазвичай мають 48 – 24 кроки на оборот (кут кроку 7.5 – 15 град).

Розріз реального крокового двигуна з постійними магнітами показаний на рис. 1.4.

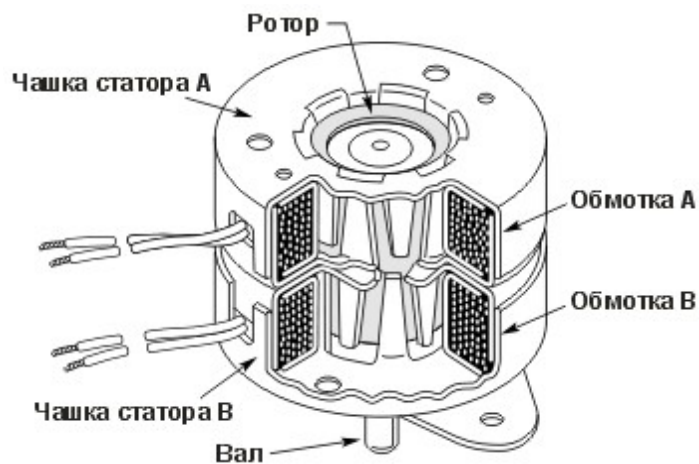


Рисунок 1.4 - Розріз крокового двигуна із постійними магнітами.

Для здешевлення конструкції двигуна магнітопровід статора виконаний у вигляді штампованої склянки. Усередині є полюсні наконечники у вигляді ламелей. Обмотки фаз розміщені на двох різних магнітопроводах, які встановлені одна на одній. Ротор є циліндричний багатополюсний постійний магніт.

Двигуни з постійними магнітами схильні до впливу зворотної ЕРС з боку ротора, яка обмежує максимальну швидкість. Для роботи на високих швидкостях використовуються двигуни із змінним магнітним опором.

#### 1.4 Гібридні двигуни

Гібридні двигуни є дорожчими, ніж двигуни з постійними магнітами, зате вони забезпечують меншу величину кроку, більший момент та більшу швидкість. Типове число кроків оборот для гібридних двигунів становить від 100 до 400 (кут кроку  $3.6 - 0.9$  град.). Гібридні двигуни поєднують у собі найкращі риси двигунів із змінним магнітним опором та двигунів із





полюсних наконечників на половину кроку зубів. Тому існує інший магнітний ланцюг, який містить мінімальні повітряні зазори і, як наслідок, має мінімальний магнітний опір. По цьому ланцюгу замикається інша частина потоку (на малюнку показана штриховою білою лінією), яка створює момент. Частина ланцюга лежить у площині, перпендикулярній до малюнка, тому не показана. У цій же площині утворюють магнітний потік котушки статора. У гібридному двигуні цей потік частково замикається полюсними наконечниками ротора і постійний магніт його «бачить» слабо. Тому на відміну від двигунів постійного струму, магніт гібридного двигуна неможливо розмагнітити за жодної величини струму обмоток. Величина зазору між зубцями ротора та статора дуже невелика – типово 0.1 мм. Це вимагає високої точності при складанні, тому кроковий двигун не варто розбирати для задоволення цікавості, інакше на цьому його термін служби може закінчитися. Щоб магнітний потік не замикався через вал, що проходить усередині магніту, його виготовляють із немагнітних марок сталі. Вони зазвичай мають підвищену крихкість, тому з валом, особливо малого діаметра, слід поводитися з обережністю. Для отримання великих моментів необхідно збільшувати поле, створюване статором, так і поле постійного магніту. При цьому потрібен більший діаметр ротора, що погіршує відношення моменту, що крутить, до моменту інерції. Тому потужні крокові двигуни іноді конструктивно виконують з декількох секцій у вигляді етажерки. Крутний момент і момент інерції збільшуються пропорційно до кількості секцій, а їхнє відношення не погіршується. Існують інші конструкції крокових двигунів. Наприклад, двигуни з дисковим намагніченим ротором. Такі двигуни мають малий момент інерції ротора, що часом важливо. Більшість сучасних крокових двигунів є гібридними. По суті, гібридний двигун є двигуном з постійними магнітами, але з великим числом полюсів. За способом управління такі двигуни однакові, далі розглядатимуться лише такі двигуни. Найчастіше



двигун може мати 5 або 6 висновків (рис. 1.7б). Іноді уніполярні двигуни мають роздільні 4 обмотки, тому їх помилково називають 4-х фазними двигунами. Кожна обмотка має окремі висновки, тому всього 8 висновків (рис. 1.7в). При відповідному з'єднанні обмоток такий двигун можна використовувати як уніполярний або біполярний. Уніполярний двигун з двома обмотками та відводами теж можна використовувати в біполярному режимі, якщо залишити залишки непідключеними. У будь-якому випадку струм обмоток слід вибирати так, щоб не перевищити максимальної потужності, що розсіюється.

#### 1.6 Порівняння біполярних чи уніполярних крокових двигунів

Якщо порівнювати між собою біполярний та уніполярний двигуни, то біполярний має більш високу питому потужність. При тих самих розмірах біполярні двигуни забезпечують більший момент.

Момент, створюваний кроковим двигуном, пропорційний величині магнітного поля, створюваного статора обмотками. Шлях підвищення магнітного поля – це збільшення струму чи кількості витків обмоток. Природним обмеженням у разі підвищення струму обмоток є небезпека насичення залізного сердечника. Однак на практиці це обмеження діє рідко. Набагато істотнішим є обмеження нагрівання двигуна внаслідок омичних втрат в обмотках. Саме цей факт і демонструє одну з переваг біполярних двигунів. В уніполярному двигуні у кожний момент часу використовується лише половина обмоток. Інша половина просто займає місце у вікні сердечника, що змушує робити обмотки дротом меншого діаметра. У той самий час у біполярному двигуні працюють всі обмотки, тобто. їх використання оптимальне. У такому двигуні перетин окремих обмоток вдвічі більший, а

омічний опір – відповідно вдвічі менше. Це дозволяє збільшити струм у корінь із двох разів при тих же втратах, що дає вигреш у моменті приблизно 40%. Якщо підвищеного моменту не потрібно, уніполярний двигун дозволяє зменшити габарити або просто працювати з меншими втратами. На практиці все ж таки часто застосовують уніполярні двигуни, тому що вони вимагають значно більш простих схем управління обмотками. Це важливо, якщо драйвери виконані на дискретних компонентах. В даний час існують спеціалізовані мікросхеми драйверів для біполярних двигунів, з використанням яких драйвер виходить не складніше, ніж для уніполярного двигуна. Наприклад, це мікросхеми L293E, L298N або L6202 фірми SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фірми Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фірми JRC, A3957 фірми Allegro, LMD18T24 5

Існує кілька способів керування фазами крокового двигуна.

Перший спосіб забезпечується поперемінної комутації фаз, при цьому вони не перекриваються, одночасно включена тільки одна фаза (рис 1.8а). Цей спосіб називають "one phase on" full step або wave drive mode. Крапки рівноваги ротора для кожного кроку збігаються з «природними» точками рівноваги ротора у незапитаного двигуна. Недоліком цього способу управління 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 - управління фазами з перекриттям: дві фази включені в один і той же час. Його називають "two-phase-on" full step або просто full step mode. При цьому способі керування ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора (рис. 1.8б) і забезпечується приблизно на 40% більший момент, ніж у випадку включеної фази. Цей спосіб управління забезпечує такий самий кут кроку, як і перший спосіб, але положення точок рівноваги ротора зміщено на півкроку.

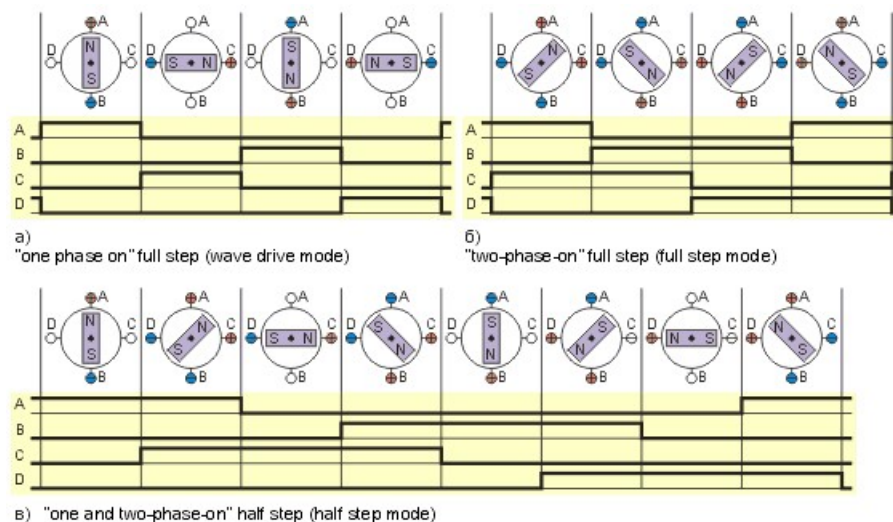


Рисунок 1.8 - Різні методи управління фазами крокового двигуна.

Третій спосіб є комбінацією перших двох і називається напівкроковим режимом, "one and two-phase-on" half step або просто half step mode, коли двигун робить крок у половину основного. Цей метод управління досить поширений, тому що двигун з меншим кроком коштує дорожче і дуже привабливо отримати від 100-крокового двигуна 200 кроків на оборот. Кожен другий крок запитана лише одна фаза, а в інших випадках запитано дві (рис. 1.8в). В результаті кутове переміщення ротора становить половину кута кроку для перших двох способів керування. Крім зменшення розміру кроку, цей спосіб управління дозволяє частково позбутися явища резонансу. Напівкроковий режим зазвичай не дозволяє отримати повний момент, хоча найбільш досконалі драйвери реалізують модифікований напівкроковий режим, в якому двигун забезпечує практично повний момент, при цьому потужність, що розсіюється, не перевищує номінальної. Ще один спосіб управління називається мікрокроковим режимом або micro stepping mode. При цьому способі управління струм у фазах потрібно міняти невеликими кроками, забезпечуючи таким чином дроблення половинного кроку ще менші мікрокроки. Коли одночасно включені дві фази, але їх струми не рівні,

положення рівноваги ротора лежатиме не в середині кроку, а в іншому місці, що визначається співвідношенням струмів фаз. Змінюючи це співвідношення, можна забезпечити кілька мікрокроків всередині одного кроку. Крім збільшення роздільної здатності, мікрокроковий режим має інші переваги, які будуть описані нижче. Разом з тим, для реалізації мікрокрокового режиму потрібні значно складніші драйвери, що дозволяють задавати струм в обмотках з необхідною дискретністю. Напівкроковий режим є окремим випадком мікрокрокового режиму, але він не вимагає формування ступінчастого струму живлення котушок, тому часто реалізується.

У повнокроковому режимі з двома включеними фазами положення точок рівноваги ротора зміщені на півкроку. Слід зазначити, що це положення ротор приймає під час роботи двигуна, але становище ротора неспроможна зберігатися постійним після вимкнення струму обмоток. Тому при включенні та вимкненні живлення двигуна ротор зміщуватиметься на півкроку. Для того, щоб він не зміщувався під час зупинки, необхідно подавати в обмотки струм утримання. Те саме справедливо і для напівкрокового та мікрокрокового режимів. Слід зазначити, що якщо у вимкненому стані ротор двигуна повертався, то при включенні живлення можливе зміщення ротора і більшу, ніж половина кроку величину.

Основним принципом роботи крокового двигуна є створення магнітного поля, що обертається, яке змушує ротор повертатися. Магнітне поле, що обертається, створюється статором, обмотки якого відповідним чином запитуються. Для двигуна, у якого запитана одна обмотка, залежність моменту від кута повороту ротора щодо точки рівноваги є приблизно синусоїдальною. Ця залежність для двообмотувального двигуна, який має  $N$  кроків на оборот (кут кроку в радіанах  $S = (2 \cdot \pi) / N$ ), показано на рис. 1.9.



кутової залежності моменту. Для наведених вище формул  $\Phi$  є механічним кутом повороту ротора, а електричний кут двигуна, що має 4 кроки на періоді кривої моменту, дорівнює  $((\pi/2)/S)*\Phi$  або  $(N/4)*\Phi$ , де  $N$  – число кроків на оборот. Електричний кут фактично визначає кут повороту магнітного поля статора і дозволяє будувати теорію незалежно кількості кроків на оборот для конкретного двигуна.

Якщо запитати одночасно дві обмотки двигуна, то момент дорівнює сумі моментів, що забезпечуються обмотками окремо (рис. 1.10).

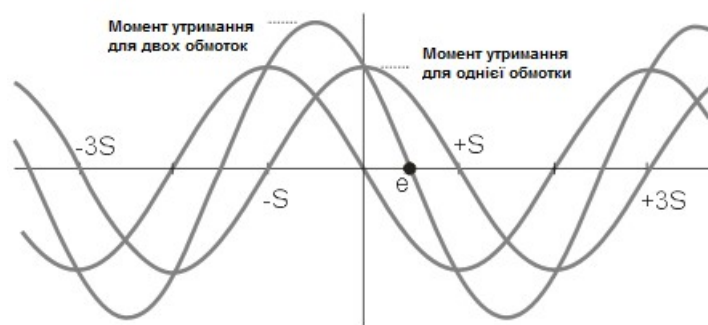


Рисунок 1.10 - Залежність моменту від кута повороту ротора для двох обмоток.

При цьому якщо струми в обмотках однакові, то точка максимуму моменту буде зміщена на половину кроку. На пів кроку зміститься і точка рівноваги ротора (точка  $e$  на малюнку). Цей факт і покладено основою реалізації півкрокового режиму. Пікове значення моменту (момент утримання) при цьому буде в корінь із двох разів більше, ніж при одній запитаній обмотці.

$$Th2 = 2 \cdot 0.5 * Th1,$$

де  $Th2$  – момент утримання при двох запитаних обмотках,  $Th1$  – момент утримання при одній запитаній обмотці.

Саме цей момент звичайно вказується в характеристиках крокового двигуна.

Величина та напрямок магнітного поля показані на векторній діаграмі (рис. 1.11).

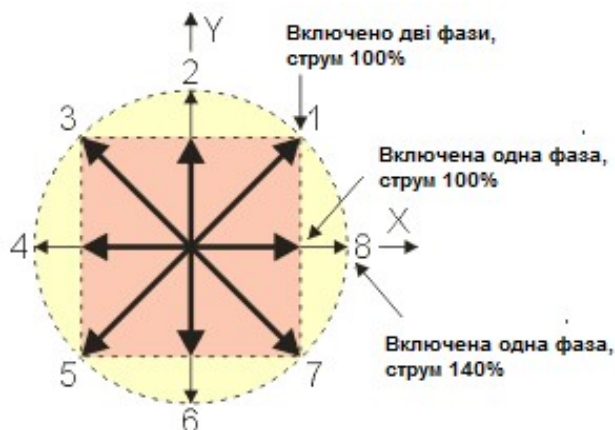


Рисунок 1.11 - Величина та напрямок магнітного поля для різних режимів живлення фаз.

Осі X і Y збігаються з напрямком магнітного поля, створюваного обмотками першої та другої фази двигуна. Коли двигун працює з однією включеною фазою, ротор може займати положення 1, 3, 5, 7. Якщо включені дві фази, то ротор може займати положення 2, 4, 6, 8. До того ж, в цьому режимі більше моменту, оскільки він пропорційний довжині вектора малюнку. Обидва ці методи управління забезпечують повний крок, але положення рівноваги ротора зміщені на півкроку. Якщо скомбінувати ці два методи і подати на обмотки відповідні послідовності імпульсів, то можна змусити ротор послідовно займати положення 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, що відповідає половинному кроку.

Порівняно з повнокроковим режимом, напівкроковий режим має такі переваги:

більш висока роздільна здатність без застосування більш дорогих двигунів - менші проблеми з явищем резонансу. Резонанс призводить лише до часткової втрати моменту, що зазвичай не заважає нормальній роботі приводу. Недоліком напівкрокового режиму є значне коливання моменту від кроку до кроку. У тих положеннях ротора, коли запитана одна фаза, момент становить приблизно 70% від повного коли запитані дві фази. Ці коливання можуть стати причиною підвищених вібрацій і шуму, хоча вони все одно залишаються меншими, ніж у повнокроковому режимі.

Способом усунення коливань моменту є підняття моменту положеннях з однією включеною фазою і забезпечення таким чином однакового моменту у всіх положеннях ротора. Це може бути досягнуто шляхом збільшення струму в цих положеннях рівня приблизно 141% від номінального. Деякі драйвери, такі як PBL 3717/2 та PBL 3770A фірми Ericsson мають логічні входи для зміни величини струму. Потрібно відзначити, що величина 141% є теоретичною, тому в додатках, що вимагають високої точності підтримки моменту, ця величина повинна бути підібрана експериментально для конкретної швидкості і конкретного двигуна. Оскільки струм піднімається тільки в ті моменти, коли включена одна фаза, потужність, що розсіюється, дорівнює потужності в повнокроковому режимі при струмі 100% від номінального. Однак таке збільшення струму вимагає вищої напруги живлення, що не завжди можливо. Є й інший підхід. Для усунення коливань моменту під час роботи двигуна в напівкроковому режимі можна знижувати струм у моменти, коли включені дві фази. Для отримання постійного моменту цей струм має становити 70.7% номінального. Таким чином, реалізує напівкроковий режим, наприклад, мікросхема драйвера A3955 фірми Allegro.

Для напівкрокового режиму дуже важливим є перехід до стану з однією вимкненою фазою. Щоб змусити ротор прийняти відповідне положення, струм у відключеній фазі повинен бути зменшений до нуля якнайшвидше.

Тривалість спаду струму залежить від напруги на обмотці в той час, коли вона втрачає свою енергію. Замикаючи в цей час обмотку на джерело живлення, яке представляє максимальну напругу, що є в системі, забезпечується максимально швидкий спад струму. Для отримання швидкого спаду струму живлення обмоток двигуна Н-мостом всі транзистори повинні закриватися, при цьому обмотка через діоди виявляється підключеною до джерела живлення. Швидкість спаду струму значно зменшиться, якщо один транзистор мосту залишити відкритим та закоротити обмотку на транзистор та діод. Для збільшення швидкості спаду струму при управлінні уніполярними двигунами придушення викидів ЕРС самоіндукції краще здійснювати не діодами, а варисторами або комбінацією діодів та стабілітрона, які обмежать викид на більшому, але безпечному для транзисторів рівні.

Мікрокроковий режим забезпечується шляхом одержання поля статора, що обертається більш плавно, ніж у повно-або напівкроковому режимах. В результаті забезпечуються менші вібрації та практично безшумна робота аж до нульової частоти. До того ж, менший кут кроку здатний забезпечити більш точне позиціонування. Існує багато різних мікрокрокових режимів, з величиною кроку від  $1/3$  повного кроку до  $1/32$  і навіть менше. Кроковий двигун є синхронним електродвигуном. Це означає, що положення рівноваги нерухомого ротора збігається із напрямком магнітного поля статора. При повороті поля статора ротор теж повертається, прагнучи зайняти нове положення рівноваги.

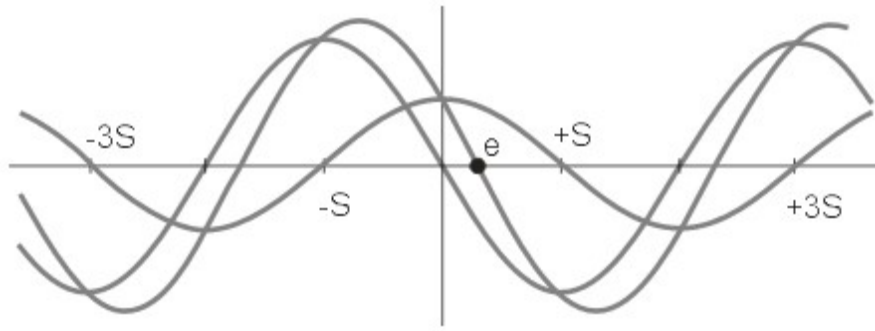


Рисунок 1.12 - Залежність моменту від кута повороту ротора у разі різних значень струму фаз.

Щоб отримати потрібний напрямок магнітного поля, необхідно вибрати не тільки правильний напрямок струмів у котушках, але й правильне співвідношення цих струмів.

Якщо одночасно запитано дві обмотки двигуна, але струми в цих обмотках не рівні (рис. 1.12), то результуючий момент буде

$$T_h = (a^2 + b^2) 0.5,$$

а точка рівноваги ротора зміститься до точки

$$x = (S/(\pi/2)) \arctan(b/a),$$

де  $a$  і  $b$  – момент, створюваний першої та другої фазою відповідно,  $T_h$  – результуючий момент утримання,  $x$  – положення рівноваги ротора у радіанах,  $S$  – кут кроку у радіанах.

Зміщення точки рівноваги ротора свідчить, що ротор можна зафіксувати у будь-якій довільній позиції. Для цього потрібно лише правильно встановити відношення струмів у фазах. Саме цей факт використовується при реалізації мікрокрокового режиму. Ще раз слід зазначити, що наведені вище формули

правильні лише тому випадку, якщо залежність моменту від кута повороту ротора синусоїдальна і якщо жодна частина магнітного ланцюга двигуна не насичується.

У межі кроковий двигун може працювати як синхронний електродвигун в режимі безперервного обертання. Для цього струми його фаз мають бути синусоїдальними, зрушеними один щодо одного на 90 град.

Результатом використання мікрокрокового режиму є більш плавне обертання ротора на низьких частотах. На частотах у 2 – 3 рази вище за власну резонансну частоту ротора та навантаження, мікрокроковий режим дає незначні переваги в порівнянні з напів- або повнокроковим режимами. Причиною цього є фільтруюча дія інерції ротора та навантаження. Система з кроковим двигуном працює подібно до фільтру нижніх частот. У мікрокроковому режимі можна здійснювати лише розгін та гальмування, а основний час працювати у повнокроковому режимі. До того ж, для досягнення високих швидкостей у мікрокроковому режимі потрібна дуже висока частота повторення мікрокроків, яку не завжди може забезпечити керуючий мікроконтролер. Для запобігання перехідним процесам і втрати кроків, перемикання режимів роботи двигуна (з мікрокрокового режиму в повнокроковий і т.п.) необхідно проводити в ті моменти, коли ротор знаходиться в положенні, що відповідає одній включеній фазі. Деякі мікросхеми драйверів мікрокрокового режиму мають спеціальний сигнал, який інформує про таке положення ротора. Наприклад, це драйвер A3955 фірми Allegro.

У багатьох додатках, де потрібні малі відносні переміщення і висока роздільна здатність, мікрокроковий режим здатний замінити механічний редуктор. Часто простота системи є вирішальним фактором, навіть якщо при цьому доведеться застосувати двигун більших габаритів. Незважаючи на те, що драйвер, що забезпечує мікрокроковий режим, набагато складніший за

звичайний драйвер, все одно система може виявитися більш простою і дешевою, ніж кроковий двигун, плюс редуктор. Сучасні мікроконтролери іноді мають вбудовані ЦАПи, які можна використовувати для реалізації мікрокрокового режиму замість спеціальних контролерів. Це дозволяє зробити практично однаковою вартість обладнання для повнокрокового та мікрокрокового режимів.

Іноді мікрокроковий режим використовується для збільшення точності величини кроку понад заявлену виробником двигуна. У цьому використовується номінальне число кроків. Для підвищення точності використовується корекція положення ротора у точках рівноваги. Для цього спочатку знімають характеристику конкретного двигуна, а потім, змінюючи співвідношення струмів у фазах, коригують положення ротора індивідуально для кожного кроку. Такий метод вимагає попереднього калібрування та додаткових ресурсів керуючого мікроконтролера. Крім того, потрібен датчик початкового положення ротора для синхронізації положення з таблицею коригуючих коефіцієнтів.

На практиці при здійсненні кожного кроку ротор не відразу зупиняється в новому положенні рівноваги, а здійснює коливання навколо положення рівноваги. Час встановлення залежить від параметрів навантаження і від схеми драйвера. У багатьох програмах такі коливання є небажаними. Позбутися цього явища можна шляхом використання мікрокрокового режиму. На рис. 1.13 показані переміщення ротора при роботі в повнокроковому та мікрокроковому режимах.

Видно, що у повнокроковому режимі спостерігаються викиди та коливання, тоді як у мікрокроковому режимі їх немає. Однак і в цьому режимі графік ротора відрізняється від прямої лінії. Ця похибка пояснюється похибкою геометрії деталей двигуна і може бути зменшена шляхом калібрування і подальшої компенсації шляхом коригування струмів фаз.

Насправді існують деякі фактори, що обмежують точність роботи приводу в мікрокроковому режимі. Деякі з них належать до драйвера, а деякі безпосередньо до двигуна.

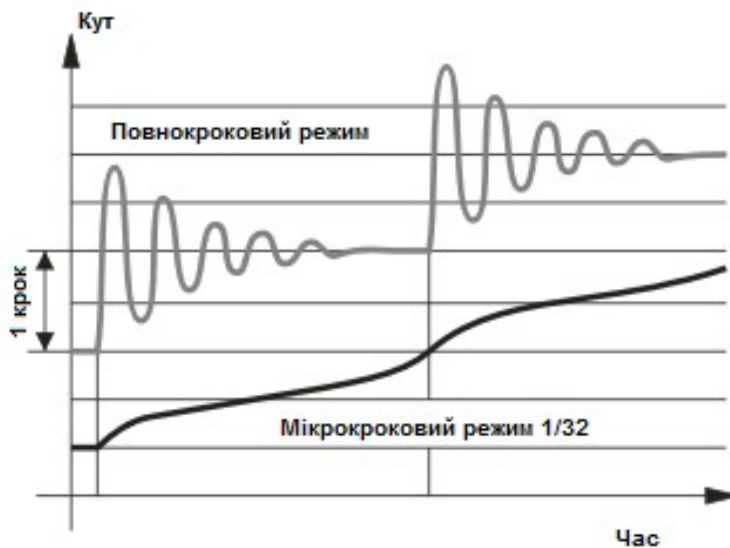


Рисунок 1.13 - Переміщення ротора у повнокроковому та мікрокроковому режимах.

Зазвичай виробники крокових двигунів вказують на такий параметр, як точність кроку. Точність кроку вказується для положень рівноваги ротора за двох включених фаз, струми яких рівні. Це відповідає повнокроковому режиму з перекриттям фаз. Для мікрокрокового режиму, коли струми фаз не дорівнюють, жодних даних зазвичай не наводиться.

Ідеальний кроковий двигун при живленні фаз синусоїдальним та косинусоїдальним струмом повинен обертатися з постійною швидкістю. У реального двигуна в такому режимі спостерігатимуться деякі коливання швидкості. Пов'язано це з нестабільністю повітряного зазору між полюсами ротора та статора, наявністю магнітної гістерези, що призводить до похибок величини та напрямки магнітного поля тощо. Тому положення рівноваги та

момент мають деякі відхилення. Ці відхилення залежать від похибки форми зубців ротора та статора та від застосованого матеріалу магнітопроводів. Конструкція деяких двигунів оптимізована для найкращої точності у повнокроковому режимі та максимального моменту утримання. Спеціальна форма зубців ротора та статора спроектована так, щоб у положенні рівноваги для повнокрокового режиму магнітний потік сильно зростає. Це призводить до погіршення точності в мікрокроковому режимі. Найкращі результати дозволяють отримати двигуни, у яких момент утримання в знеструмленому стані менший. Відхилення можна розділити на два види: відхилення величини магнітного поля, що призводять до відхилень моменту утримання в мікрокроковому режимі та відхилення напрямку магнітного поля, що призводять до відхилень положення рівноваги. Відхилення моменту утримання мікрокроковому режимі зазвичай становлять 10 – 30% від максимального моменту. Треба сказати, що у повнокроковому режимі момент утримання може коливатися на 10 – 20 % внаслідок спотворень геометрії ротора і статора. Якщо виміряти положення рівноваги ротора при обертанні двигуна і проти годинникової стрілки, то вийдуть кілька різних результатів. Цей гістерезис пов'язаний насамперед із магнітною гістерезисом матеріалу сердечника, хоча свій внесок робить і тертя. Магнітний гістерезис призводить до того, що магнітний потік залежить не тільки від струму обмоток, а й від його попереднього значення. Похибка, створена гістерезисом може дорівнювати кільком мікрокрокам. Тому в високоточних додатках під час руху в одному з напрямків потрібно проходити за бажану позицію, а потім повертатися назад, щоб підхід до потрібної позиції завжди здійснювався в одному напрямку. Цілком природно, будь-яке бажане збільшення роздільної здатності наштовхується на якісь фізичні обмеження. Не варто вважати, що точність позиціонування для 7.2 град. двигуна в мікрокроковому режимі не поступається точності 1.8 град. двигуна.

Перешкодою є такі фізичні обмеження:

- наростання моменту в залежності від кута повороту у 7.2 градусного двигуна вчетверо більш полого, ніж у справжнього 1.8-градусного двигуна. Внаслідок дії моменту тертя або моменту інерції навантаження точність позиціонування вже буде гіршою;

- як буде показано нижче, якщо в системі є тертя, то внаслідок появи мертвих зон точність позиціонування буде обмежена

- більшість комерційних двигунів не мають прецизійної конструкцією і залежність між моментом і кутом повороту ротора не є точно синусоїдальною. Внаслідок цього залежність між фазою синусоїдального струму живлення та кутом повороту валу буде нелінійною. В результаті ротор двигуна точно проходить положення кожного кроку і півкроку, а між цими положеннями будуть спостерігатися досить значні відхилення.

Ці проблеми найяскравіше виражені для двигунів з великою кількістю полюсів. Існують двигуни, ще на етапі розробки, оптимізовані для роботи в мікрокроковому режимі. Полюси ротора та статора таких двигунів менш виражені завдяки скошеній формі зубців.

Ще одне джерело похибок позиціонування – це помилка квантування ЦАП, з допомогою якого формуються струми фаз. Справа в тому, що струм повинен формуватися за синусоїдальним законом, тому для мінімізації похибки лінійний ЦАП повинен мати підвищену розрядність. Існують спеціалізовані драйвери з вбудованим нелінійним ЦАПом, який дозволяє одразу отримувати рахунки функції  $\sin$ . Прикладом може служити драйвер A3955 фірми Allegro, який має вбудований 3-розрядний ЦАП, який забезпечує наступні значення струму фаз: 100%, 92.4%, 83.1%, 70.7%, 55.5%, 38.2%, 19.5%, 0%. Це дозволяє працювати в мікрокроковому режимі з величиною кроку 1/8, при цьому похибка установки фаз струму не перевищує 2%. Крім того, цей драйвер має можливість керувати швидкістю спаду струму обмоток

двигуна під час роботи, що дозволяє зробити "тонке підстроювання" драйвера під конкретний двигун для отримання найменшої похибки позиціонування.

Навіть якщо ЦАП точно сформував синусоїдальну опорну напругу, його потрібно посилити і перетворити на синусоїдальний струм обмоток. Багато драйверів мають значну нелінійність поблизу нульового значення струму, що спричиняє значні спотворення форми і, як наслідок, значні помилки позиціонування. Якщо використовуються високоякісні драйвери, наприклад PVM3960 та PBL3771 фірми Ericsson, похибка, пов'язана з драйвером, зникаюче мала в порівнянні з похибкою двигуна.

Іноді контролери крокових двигунів дозволяють коригувати форму вихідного сигналу шляхом додавання або віднімання синуса його третьої гармоніки. Однак таке підстроювання має проводитися індивідуально під конкретний двигун, характеристики якого повинні бути виміряні.

Через ці обмеження мікрокроковий режим використовується в основному для забезпечення плавного обертання (особливо на дуже низьких швидкостях), для усунення шуму та явища резонансу. Мікрокроковий режим також здатний зменшити час встановлення механічної системи, так як, на відміну від повнокрокового режиму, відсутні викиди та осциляції. Однак у більшості випадків для звичайних двигунів не можна гарантувати точного позиціонування в мікрокроковому режимі.

Синусоїдальний струм фаз може бути забезпечений застосуванням спеціальних драйверів. Деякі з них, наприклад A3955, A3957 фірми Allegro, вже містять ЦАП і вимагають мікроконтролера тільки цифрових кодів. Інші, такі як L6506, L298 фірми SGS-Thomson, вимагають зовнішніх опорних напруг синусоїдальної форми, які повинен формувати мікроконтролер за допомогою ЦАПів. Потрібно сказати, що дуже велика кількість дискретів синуса не призводить до підвищення точності позиціонування, оскільки починає домінувати помилка, пов'язана з неідеальністю геометрії полюсів

двигуна. Тим більше, в цьому випадку відліки повинні слідувати з великою частотою, що є проблемою при їхньому програмному формуванні. При роботі на високих швидкостях роздільну здатність ЦАПів можна зменшити. Більше того, при дуже великих швидкостях взагалі рекомендується працювати у звичайному повнокроковому режимі, оскільки управління гармонійним сигналом втрачає переваги. Відбувається це з тієї причини, що обмотки двигуна є індуктивністю, відповідно будь-яка конкретна схема драйвера з конкретною напругою живлення забезпечує цілком певну максимальну швидкість наростання струму. Тому при підвищенні частоти форма струму починає відхилятися від синусоїдальної і дуже великих частотах стає трикутною.

Залежність моменту від швидкості, вплив навантаження

Момент, створюваний кроковим двигуном, залежить від кількох факторів:

- швидкості
- струму в обмотках
- схеми драйвера

На рис. 1.14а показано залежність моменту від кута повороту ротора.

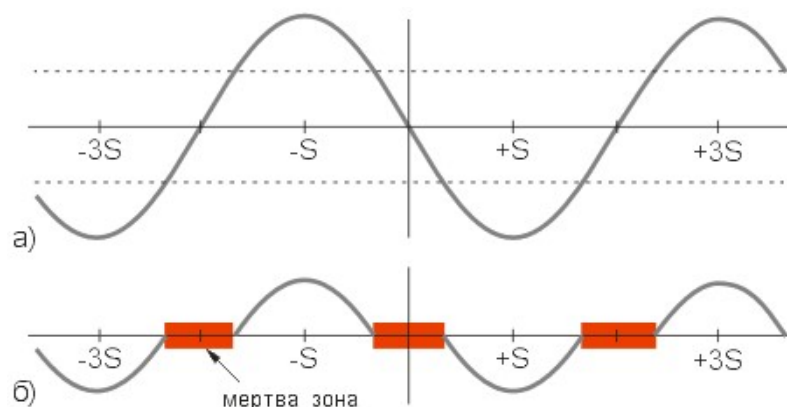


Рисунок 1.14 - Виникнення мертвих зон внаслідок дії тертя.

У ідеального крокового двигуна ця синусоїдальна залежність. Точки S є положеннями рівноваги ротора для ненавантаженого двигуна та відповідають декільком послідовним крокам. Якщо до валу двигуна прикласти зовнішній момент, менший за момент утримання, то кутове положення ротора зміниться на деякий кут  $\Phi$ .

$$\Phi = (N/(2*\pi)) * \sin(T_a/T_h),$$

де  $\Phi$  - кутове зміщення, N - кількість кроків двигуна на оборот,  $T_a$  - зовнішній момент,  $T_h$  - момент утримання.

Кутове усунення  $\Phi$  є помилкою позиціонування навантаженого двигуна. Якщо до валу двигуна прикласти момент, що перевищує момент утримання, під дією цього моменту вал прогорнеться. У такому режимі положення ротора є неконтрольованим. На практиці завжди є прикладений до двигуна зовнішній момент, хоча б тому, що двигуну доводиться долати тертя. Сили тертя можуть бути розділені на дві категорії: статичне тертя або тертя спокою, для подолання якого потрібен постійний момент і динамічне тертя або в'язке тертя, яке залежить від швидкості. Розглянемо статичне тертя. Припустимо, що для його подолання потрібен момент наполовину від пікового. На рис. 1.14а штриховими лініями показано момент тертя. Таким чином, для обертання ротора залишається лише момент, що лежить на графіку за межами штрихових ліній. Звідси випливають два висновки: тертя знижує момент на валу двигуна і з'являються мертві зони навколо кожного положення рівноваги ротора (рис. 1.14б):

$$d = 2 ( S / (\pi/2) ) \arcsin(T_f/T_h) = ( S / (\pi/4) ) \arcsin(T_f / T_h),$$

де  $d$  – ширина мертвої зони у радіанах,  $S$  – кут кроку у радіанах,  $T_f$  – момент тертя,  $T_h$  – момент утримання.

Мертві зони обмежують точність позиціонування. Наприклад, наявність статичного тертя половину від пікового моменту двигуна з кроком 90 град. викличе наявність мертвих зон 60 град. Це означає, що крок двигуна може коливатися від 30 до 150 град., Залежно від того, в якій точці мертвої зони зупиниться ротор після чергового кроку.

Наявність мертвих зон є дуже важливою для мікрокрокового режиму. Якщо, наприклад, є мертві зони величиною  $d$ , то мікрокрок завбільшки менше  $d$  взагалі не зрушить ротор з місця. Тому для систем з використанням мікрокроків дуже важливо мінімізувати тертя спокою.

Коли двигун працює під навантаженням, завжди існує деяке зрушення між кутовим положенням ротора та орієнтацією магнітного поля статора. Особливо несприятливою є ситуація, коли двигун починає гальмування та момент навантаження реверсується. Слід зазначити, що запізнення чи випередження належить лише до положенню, але з швидкості. У будь-якому випадку, якщо синхронність роботи двигуна не втрачена, це запізнювання або випередження не може перевищувати двох повних кроків. Це дуже приємний факт.

Щоразу, коли кроковий двигун здійснює крок, ротор повертається на  $S$  радіан. При цьому мінімальний момент має місце, коли ротор знаходиться рівно між сусідніми положеннями рівноваги (рис. 1.15).

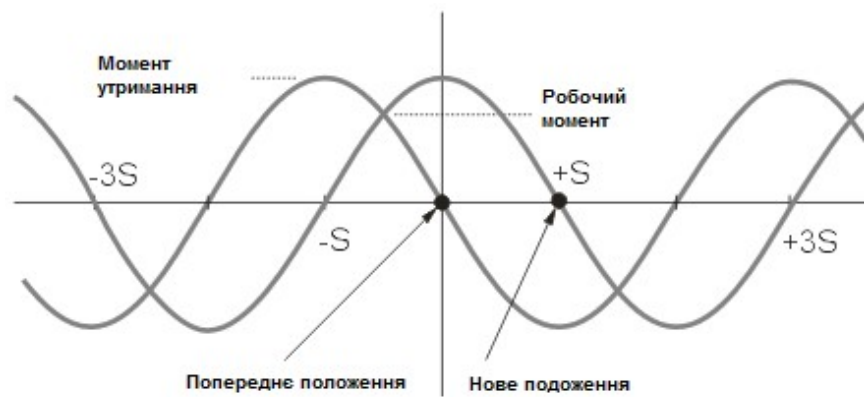


Рисунок 1.15 - Момент утримання та робочий момент крокового двигуна.

Цей момент називають робочим моментом, він означає, який максимальний момент може долати двигун при обертанні з малою швидкістю. При синусоїдальній залежності моменту від кута повороту ротора цей момент  $T_r = T_h / (20.5)$ . Якщо двигун робить крок із двома запитаними обмотками, то робочий момент дорівнює моменту утримання однієї запитаної обмотки.

Параметри приводу на основі крокового двигуна залежать від характеристик навантаження. Крім тертя, реальне навантаження має інерцію. Інерція перешкоджає зміні швидкості. Інерційне навантаження вимагає від двигуна великих моментів на розгоні та гальмуванні, обмежуючи таким чином максимальне прискорення. З іншого боку, збільшення інерційності навантаження збільшує стабільність швидкості.

Такий параметр крокового двигуна, як залежність моменту від швидкості є найважливішим при виборі типу двигуна, виборі методу керування фазами та виборі схеми драйвера. При конструюванні високошвидкісних драйверів крокових двигунів потрібно враховувати, що обмотки двигуна є індуктивністю. Ця індуктивність визначає час наростання та спаду струму. Тому якщо до обмотки додається напруга прямокутної форми, форма струму не буде прямокутною. При низьких швидкостях (рис. 1.16а) час наростання та спаду струму не здатний сильно вплинути на момент,



напругою генератори чи програмируемые дільники частоти. Для генерації тактової частоти зручно використовувати апаратний таймер, який є у складі практично будь-якого мікроконтролера. Коли двигун обертається з постійною швидкістю, достатньо завантажити у таймер постійне значення періоду повторення кроків (тривалість кроку). Якщо двигун розганяється або гальмується, цей період змінюється з кожним новим кроком. При розгоні або гальмуванні з постійним прискоренням частота повторення кроків повинна змінюватись лінійно, відповідно значення періоду, яке необхідно завантажувати в таймер, має змінюватися за гіперболічним законом.

Для найбільш загального випадку необхідно знати залежність тривалості кроку від поточної швидкості. Кількість кроків, що здійснює двигун при розгоні за час  $t$  дорівнює:

$$N = 1/2At^2 + Vt,$$

де  $N$  - число кроків,  $t$  - час,  $V$  - швидкість, виражена в кроках в одиницю часу,  $A$  - прискорення, виражене в кроках, поділених тимчасово в квадраті.

Для одного кроку  $N = 1$ , тоді тривалість кроку

$$t_1 = T = (-V + (V^2 + 2A)^{0.5}) / A$$

В результаті здійснення кроку швидкість стає рівною

$$V_{\text{new}} = (V^2 + 2A)^{0.5}$$

Обчислення за наведеними формулами є досить трудомісткими і вимагають значних витрат процесорного часу. У той же час вони дозволяють

змінювати значення прискорення в довільний момент. Розрахунки можна спростити, якщо вимагати сталості прискорення під час розгону та гальмування. І тут можна записати залежність тривалості кроку від часу розгону:  $V = V_0 + At$ , де  $V$  – поточна швидкість,  $V_0$  – початкова швидкість (мінімальна швидкість, з якою починається розгін),  $A$  – прискорення;  $1/T = 1/T_0 + At$ , де  $T$  – тривалість кроку,  $T_0$  – початкова тривалість кроку,  $t$  – поточний час;

$$\text{Звідки } T = T_0 / (1 + T_0 A t)$$

Обчислення за цією формулою здійснити значно простіше, проте для того, щоб змінити значення прискорення потрібно зупинити двигун.

Кроковим двигунам властивий небажаний ефект, який називають резонансом. Ефект проявляється у вигляді раптового падіння моменту на деяких швидкостях. Це може призвести до пропуску кроків та втрати синхронності. Ефект виявляється у тому випадку, якщо частота кроків збігається з власною резонансною частотою ротора двигуна.

Коли двигун здійснює крок, ротор не відразу встановлюється в нову позицію, а згасає коливання. Річ у тім, що систему ротор – магнітне поле – статор можна як пружинний маятник, частота коливань якого залежить від моменту інерції ротора (плюс навантаження) і величини магнітного поля. Зважаючи на складну конфігурацію магнітного поля, резонансна частота ротора залежить від амплітуди коливань. При зменшенні амплітуди частота зростає, наближаючись до малоамплітудної частоти, котра більш просто обчислюється кількісно. Ця частота залежить від кута кроку та від відношення моменту утримання до моменту інерції ротора. Більший момент утримання та менший момент інерції призводять до збільшення резонансної частоти.

Резонансна частота обчислюється за такою формулою:

$$F_0 = (N * T_H / (J_R + J_L))^{0.5} / 4 * \pi i,$$

де  $F_0$  - резонансна частота,  $N$  - число повних кроків на оборот,  $T_H$  - момент утримання для використовуваного способу управління та струму фаз,  $J_R$  - момент інерції ротора,  $J_L$  - момент інерції навантаження.

Слід зазначити, що резонансну частоту визначає момент інерції власне ротора двигуна плюс момент інерції навантаження, підключеної до валу двигуна. Тому резонансна частота ротора ненавантаженого двигуна, яка іноді наводиться серед параметрів, має маленьку практичну цінність, оскільки будь-яке навантаження, приєднане до двигуна, змінить цю частоту. Насправді ефект резонансу призводить до труднощів під час роботи на частоті, близька до резонансної. Момент на частоті резонансу дорівнює нулю і без спеціальних заходів кроковий двигун не може при розгоні пройти резонансну частоту. У будь-якому випадку, явище резонансу здатне суттєво погіршити точнісні характеристики приводу.

У системах із низьким демпфуванням існує небезпека втрати кроків або підвищення шуму, коли двигун працює поблизу резонансної частоти. У деяких випадках проблеми можуть виникати на гармоніках частоти основного резонансу.

Коли використовується не мікрокроковий режим, основною причиною появи коливань є уривчасте обертання ротора. При здійсненні кроку ротору поштовхом повідомляється певна енергія. Цей поштовх збуджує вагання. Енергія, що повідомляється ротору в напівкроковому режимі, становить близько 30% енергії повного кроку. Тож у півкроковому режимі амплітуда коливань значно менше. У мікрокроковому режимі з кроком 1/32 основного кожного мікрокроку повідомляється всього близько 0.1% від енергії повного кроку. Тому в мікрокроковому режимі явище резонансу практично непомітне.

Для боротьби з резонансом можна використовувати різноманітні методи. Наприклад, застосування еластичних матеріалів під час виконання механічних муфт зв'язку з навантаженням. Еластичний матеріал сприяє поглинанню енергії в резонансній системі, що призводить до загасання паразитних коливань. Іншим способом є застосування в'язкого тертя. Випускаються спеціальні демпфери, де всередині порожнистого циліндра, заповненого в'язким кремнійорганічним мастилом, може обертатися металевий диск. При обертанні цієї системи із прискоренням диск відчуває в'язке тертя, що ефективно демпфує систему. Існують електричні методи боротьби із резонансом. Робіт, що коливається, призводить до виникнення в обмотках статора ЕРС. Якщо закортити обмотки, які на цьому етапі не використовуються, це призведе до демпфування резонансу. І, нарешті, існують методи боротьби з резонансом лише на рівні алгоритму роботи драйвера. Наприклад, можна використовувати той факт, що при роботі з двома включеними фазами резонансна частота приблизно на 20% вище, ніж з однією фазою включеною. Якщо резонансна частота точно відома, її можна проходити, змінюючи режим роботи. Якщо це можливо, при старті та зупинці потрібно використовувати частоти вище резонансної. Збільшення моменту інерції системи ротор-навантаження зменшує резонансну частоту. Однак найефективнішим заходом для боротьби з резонансом є застосування мікрокрокового режиму.

### 1.7 Висновки до першого розділу

Описана конструкція крокових двигунів. Наведено принципи регулювання і керування крокових двигунів. Показані їх переваги і недоліки у порівнянні із іншими видами двигунів.



, таймер та багато іншого необхідного для електронного годинника та таймерів. У цій роботі у навчальних цілях цей пристрій буде розроблено на мікроконтролері фірми ATMEL .

ATtiny 2313 - низькоспоживаючий 8-бітний КМОП мікроконтролер з AVR RISC архітектури. Виконуючи команди за один цикл, ATtiny 2313 досягає продуктивності 1 MIPS при частоті генератора 1 МГц, що задає, що дозволяє розробнику оптимізувати відношення споживання до продуктивності.

AVR ядро об'єднує багату систему команд та 32 робочі регістри загального призначення. Всі 32 регістри безпосередньо пов'язані з арифметико-логічним пристроєм (АЛУ), що дозволяє отримати доступ до двох незалежних регістрів при виконанні однієї команди. В результаті ця архітектура дозволяє забезпечити в десятки разів більшу продуктивність, ніж стандартна CISC архітектура.

ATtiny 2313 має наступні характеристики: 2 КБ програмованої в системі Flash пам'ять програми, 128 байт EEPROM пам'ять даних, 128 байт SRAM (статична ОЗУ), 18 ліній введення - виведення загального застосування, 32 робочих регістру загального призначення, однопровідний інтерфейс для вбудованого відладу гнучких таймера/лічильника зі схемами порівняння, внутрішні та зовнішні джерела переривання, послідовний програмований USART , універсальний послідовний інтерфейс з детектором стартової умови, програмований сторожовий таймер із вбудованим генератором та три програмно ініціалізовані режими зниженого споживання. У режимі Idle зупиняється ядро, але ОЗУ, таймери/лічильники та система переривань продовжують працювати. У режимі Power - down регістри зберігають своє значення, але генератор зупиняється блокуючи всі функції приладу до наступного переривання або апаратного скидання. У Standby режимі генератор працює, в той час як решта приладу не діє. Це дозволяє швидко

запустити мікропроцесор, зберігаючи при цьому в режимі бездіяльності потужність.

Прилад виготовлений за високощільною енергонезалежною технологією виготовлення пам'яті компанії Atmel . Вбудована ISP Flash дозволяє перепрограмувати пам'ять програми в системі через послідовний інтерфейс SPI або звичайним програматором енергонезалежної пам'яті. Об'єднавши в одному кристалі 8-бітне RISC ядро з пам'яттю, що самопрограмується в системі Flash , ATtiny 2313 став потужним мікроконтролером, який дає велику гнучкість розробника мікропроцесорних систем.

ATtiny 2313 підтримується різними програмними засобами та інтегрованими засобами розробки, такими як компілятори C , макроасемблери, програмні відладники/симулятори, внутрішньосхемні емулятори та ознайомчі набори.

Щоб максимально прискорити роботу та уможливити паралельне виконання кількох операцій, мікроконтролери AVR використовують Гарвардську архітектуру.

Така архітектура передбачає окрему пам'ять та окрему шину адреси як для програми, так і для даних.

Також у пристрої буде використаний цифро-літерний індикатор з висотою цифр 7,5 мм із семи сегментів з децимальною точкою АЛС324А, його графічне зображення наведено на рис. 2.4.

Схема електрична принципова побудована із допомогою програмного забезпечення Proteus 8. За її допомогою є можливість розробки схеми, а також моделювання її роботи.



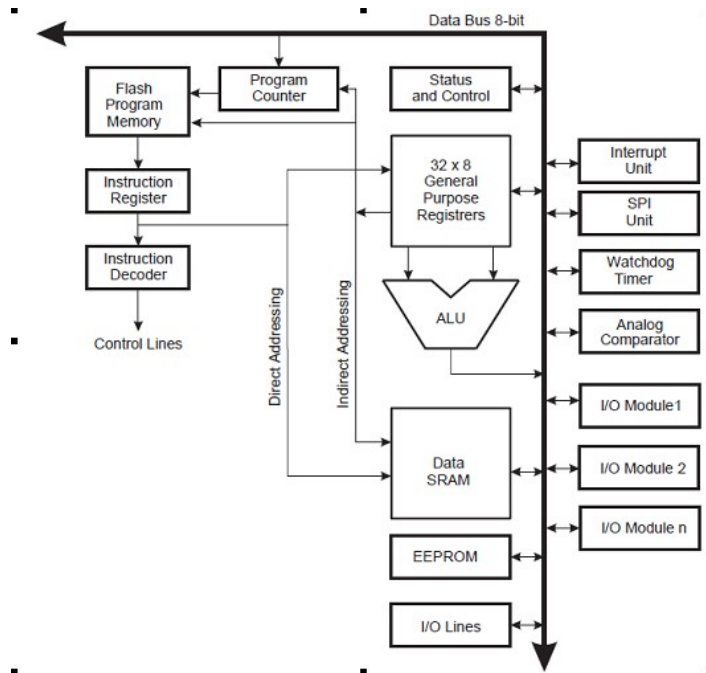


Рисунок 2.3 - Блок-схема архітектури AVR

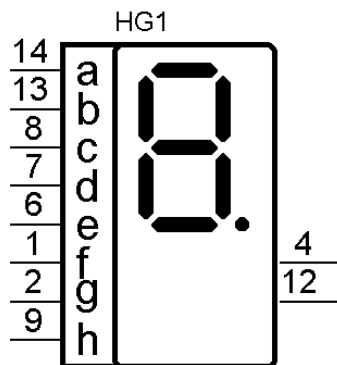


Рисунок 2.4 - АЛІС324А

Напрямок обертання залежить від того, яка фаза випереджає. Швидкість визначається частотою проходження імпульсів. У напівкровоковому режимі дещо складніше і потрібно вже мінімум 4 сигнали. Всі сигнали керування кроковим двигуном можна сформувати програмно, проте це викличе велике завантаження мікроконтролера.

## 2.3 Схема електрична

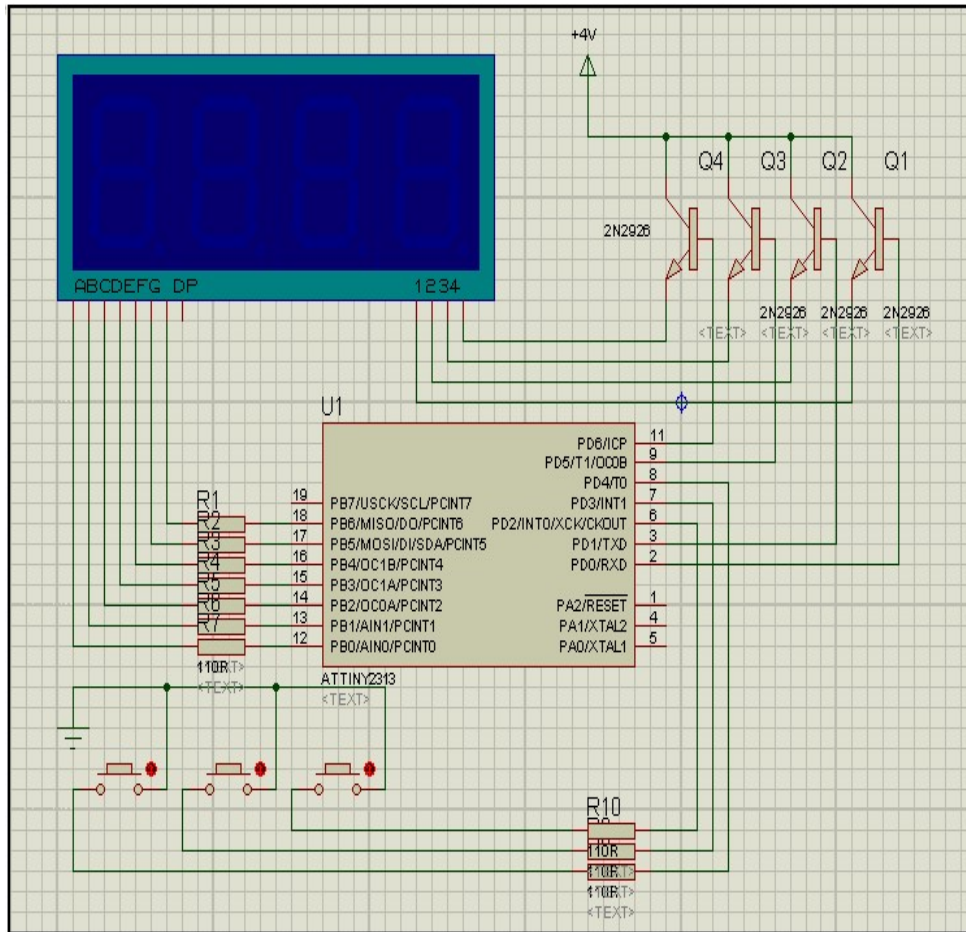


Рисунок 2.5 – Схема електрична принципова

Тому найчастіше застосовують спеціальні мікросхеми драйверів крокового двигуна, які зменшують кількість необхідних процесора динамічних сигналів. Типово ці мікросхеми вимагають тактову частоту, яка є частотою повторення кроків та статичний сигнал, який задає напрямок. Іноді ще є сигнал увімкнення напівкрокового режиму. Для мікросхем драйверів, які працюють у мікрокроковому режимі, потрібна більша кількість сигналів. Поширеним є випадок, коли необхідні послідовності сигналів управління фазами формуються з допомогою однієї мікросхеми, а необхідні струми фаз забезпечує інша мікросхема. Хоча останнім часом з'являється все більше

драйверів, що реалізують усі функції в одній мікросхемі. Потужність, що вимагається від драйвера, залежить від розмірів двигуна і становить частки вата для маленьких двигунів і до 10-20 ватів для великих двигунів. Максимальний рівень розсіюваної потужності обмежений нагріванням двигуна. Максимальна робоча температура зазвичай вказується виробником, але можна вважати, що нормальною є температура корпусу 90 градусів. Тому при конструюванні пристроїв з кроковими двигунами, які безперервно працюють на максимальному струмі, необхідно вживати заходів, що виключають торкання корпусу двигуна обслуговуючим персоналом. В окремих випадках можливе застосування радіатора, що охолоджує. Іноді це дозволяє застосувати двигун менших розмірів та досягти кращого відношення потужність/вартість. Для даного розміру крокового двигуна місце обмотками, обмежене. Тому дуже важливо сконструювати драйвер так, щоб даних параметрів обмоток забезпечити найкращу ефективність.

Схема драйвера повинна виконувати три основні завдання:

- мати можливість включати та вимикати струм в обмотках, а також змінювати його напрямок
- підтримувати задане значення струму
- забезпечувати якнайшвидше наростання і спад струму для хороших швидкісних характеристик

Способи зміни напрямку струму

При роботі крокового двигуна потрібна зміна напрямку магнітного поля незалежно кожної фази. Зміна напрямку магнітного поля може бути виконано у різний спосіб. В уніполярних двигунах обмотки мають відведення від середини або є дві окремі обмотки для кожної фази. Напрямок магнітного поля змінюється шляхом перемикання половинок обмоток або цілих обмоток. У цьому випадку потрібні лише два простих ключі А та В для кожної фази (рис. 2.6).



спадати без залучення нескінченної різниці потенціалів. При підключенні обмотки до джерела живлення струм наростатиме з деякою швидкістю, а при відключенні обмотки відбудеться викид напруги. Цей викид здатний пошкодити ключі, як використовуються біполярні або польові транзистори. Для обмеження цього викиду встановлюють захисні ланцюжки. На схемах рис. 2.6 та 2.7 ці ланцюжки утворені діодами, значно рідше застосовують конденсатори або їх комбінацію з діодами. Застосування конденсаторів викликає виникнення електричного резонансу, що може спричинити збільшення моменту на певній швидкості. На рис. 2.6 знадобилося 4 діода з тієї причини, що половинки обмоток уніполярного двигуна розташовані на загальному сердечнику і пов'язані між собою. Вони працюють як автотрансформатор та викиди виникають на висновках обох обмоток. Якщо в якості ключів застосовані МОП-транзистори, то достатньо двох зовнішніх діодів, так як у них всередині вже є діоди. В інтегральних мікросхемах, що містять потужні вихідні каскади з відкритим колектором, також є такі діоди. Крім того, деякі мікросхеми, такі як ULN2003, ULN2803 і подібні мають всередині обидва захисні діоди для кожного транзистора. Потрібно зазначити, що у разі застосування швидкодіючих ключів потрібні порівняні по швидкодії діоди. У разі застосування повільних діодів потрібне їх шунтування невеликими конденсаторами.

Стабілізація струму. Для регулювання моменту необхідно регулювати силу струму в обмотках. У будь-якому випадку, струм повинен бути обмежений, щоб не перевищити потужність, що розсіюється, на омічному опорі обмоток. Більше того, у напівкроковому режимі ще потрібно в певні моменти забезпечувати нульове значення струму в обмотках, а в мікрокроковому режимі взагалі потрібне завдання різних значень струму. Для кожного двигуна виробником вказується номінальна робоча напруга обмоток. Тому найпростіший спосіб живлення обмоток – це використання джерела

постійної напруги. У цьому випадку струм обмежений омичним опором обмоток та напругою джерела живлення (рис. 2.8а), тому такий спосіб живлення називають  $L/R$ -живленням. Струм в обмотці наростає за експонентним законом зі швидкістю, що визначається індуктивністю, активним опором обмотки і прикладеним напругою. При підвищенні частоти струм не досягає номінального значення і падає момент. Тому такий спосіб живлення придатний лише при роботі на малих швидкостях і використовується на практиці лише для малопотужних двигунів.

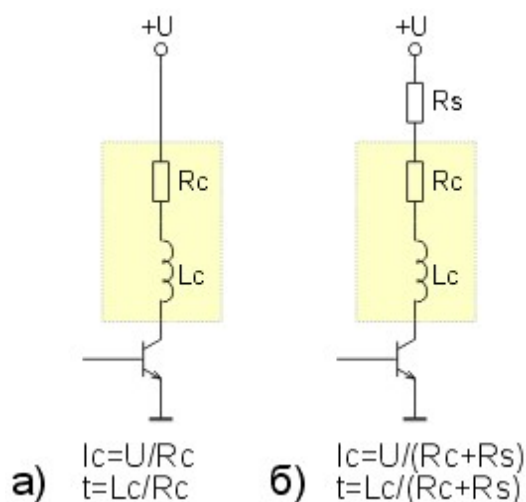


Рисунок 2.8 - Живлення обмотки номінальною напругою (а) та використання обмежувального резистора (б).

При роботі на великих швидкостях потрібно збільшувати швидкість наростання струму в обмотках, що можливо шляхом підвищення напруги джерела живлення. При цьому максимальний струм обмотки повинен бути обмеженим за допомогою додаткового резистора. Наприклад, якщо використовується напруга живлення в 5 разів більша за номінальну, то потрібен такий додатковий резистор, щоб загальний опір становив  $5R$ , де  $R$  – омичний опір обмотки ( $L/5R$ -живлення). Цей спосіб живлення забезпечує більш швидке наростання струму і, як наслідок, більший момент (рис. 20б).

Однак він має істотний недолік: на резистори розсіюється додаткова потужність. Великі габарити потужних резисторів, необхідність відведення тепла і підвищена необхідна потужність джерела живлення – все це робить такий метод неефективним і обмежує його застосування невеликими двигунами потужністю 1 – 2 вати. Потрібно сказати, що до початку 80-х років минулого століття параметри крокових двигунів, що наводяться виробниками, належали саме до такого способу живлення. Ще швидше наростання струму можна отримати, якщо використовувати для живлення двигуна генератор струму. Наростання струму відбуватиметься лінійно, це дозволить швидше досягати номінального значення струму. Тим більше, що пара потужних резисторів може коштувати дорожче, ніж пара потужних транзисторів разом із радіаторами. Але, як і в попередньому випадку, генератор струму розсіюватиме додаткову потужність, що робить цю схему живлення неефективною. Існує ще одне рішення, що забезпечує високу швидкість наростання струму та низьку потужність втрат. Засновано воно на застосуванні двох джерел живлення.

На початку кожного кроку короткочасно обмотки підключаються до високовольтного джерела, яке забезпечує швидке наростання струму (рис. 2.9). Потім напруга живлення обмоток зменшується (час  $t_1$  на рис. 2.9). Недоліком цього методу є необхідність двох ключів, двох джерел живлення та складнішої схеми управління. У системах, де такі джерела вже є, метод може бути досить дешевим. Ще однією складністю є неможливість визначення моменту часу  $t_1$  для загального випадку. Для двигуна з меншою індуктивністю обмоток швидкість наростання струму вище і при фіксованому  $t_1$  середній струм може виявитися вище номінального, що може призвести до перегріву двигуна. Ще одним методом стабілізації струму в обмотках двигуна є ключове (широотно-імпульсне) регулювання.

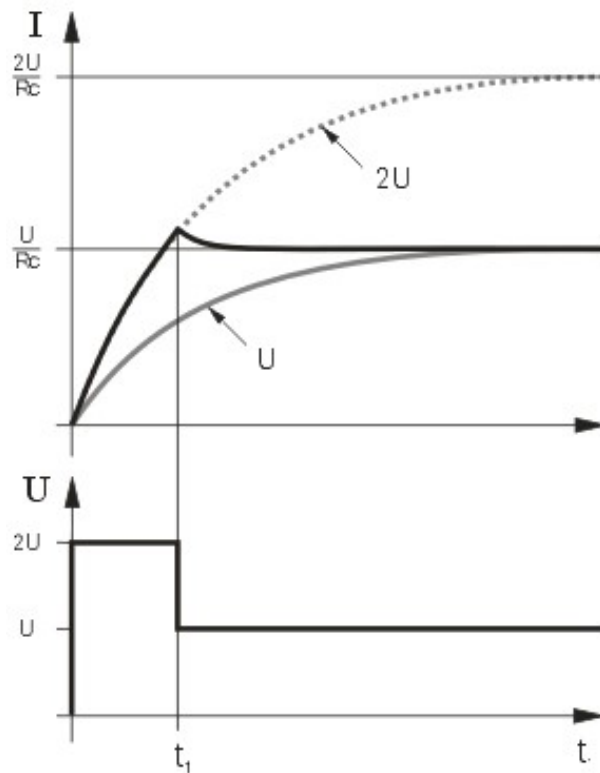


Рисунок 2.9 - Живлення обмотки двигуна ступінчастою напругою

Сучасні драйвери крокових двигунів використовують цей метод. Ключовий стабілізатор забезпечує високу швидкість наростання струму в обмотках разом із простотою його регулювання та дуже низькими втратами. Ще однією перевагою схеми з ключовою стабілізацією струму є те, що вона підтримує момент двигуна постійним, незалежно від коливань напруги живлення. Це дозволяє використовувати прості та дешеві нестабілізовані джерела живлення.

Для забезпечення високої швидкості наростання струму використовують напругу джерела живлення, що в кілька разів перевищує номінальну. Шляхом регулювання шпаруватості імпульсів, середня напруга та струм підтримуються на номінальному для обмотки рівні. Підтримка здійснюється внаслідок дії зворотного зв'язку. Послідовно з обмоткою включається резистор датчик датчика  $R$  (рис. 2.10а). Падіння напруги на цьому резисторі

пропорційно струму в обмотці. Коли струм досягає встановленого значення, ключ вимикається, що призводить до падіння струму. Коли струм спадає до нижнього порогу, ключ знову вмикається. Цей процес періодично повторюється, підтримуючи середнє значення струму постійним.

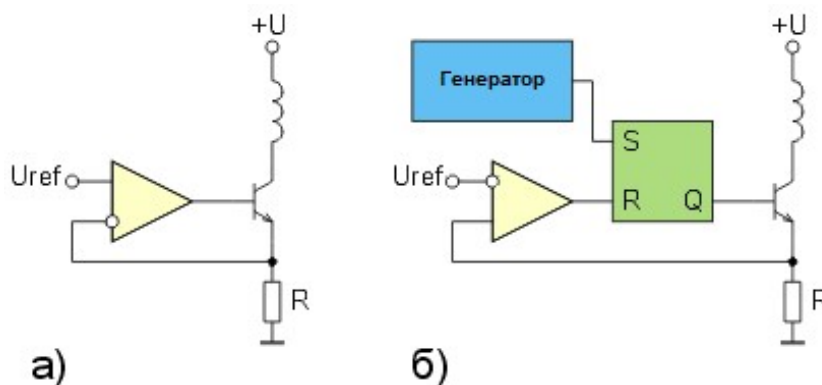


Рисунок 2.10 - Різні схеми ключової стабілізації струму.

Керуючи величиною  $U_{ref}$  можна регулювати струм фази, наприклад, збільшувати його при розгоні та гальмуванні та знижувати при роботі на постійній швидкості. Можна також задавати його за допомогою ЦАП у формі синусоїди, реалізуючи таким чином мікрокроковий режим. Такий спосіб управління ключовим транзистором забезпечує постійну величину пульсацій струму в обмотці, що визначається гістерезисом компаратора. Однак частота перемикань залежатиме від швидкості зміни струму в обмотці, зокрема від її індуктивності та від напруги живлення. Крім того, дві такі схеми, що живлять різні фази двигуна, не можуть бути засинхронізовані, що може спричинити додаткові перешкоди.

Від зазначених недоліків вільна схема із постійною частотою перемикання (рис. 2.11б). Ключовим транзистором управляє тригер, який встановлюється спеціальним генератором. Коли тригер встановлюється, ключовий транзистор відкривається і струм фази починає зростати. Разом з ним зростає падіння напруги на датчику струму. Коли воно досягає опорної

напруги, компаратор перемикається, скидаючи тригер. Ключовий транзистор при цьому вимикається, і струм фази починає спадати доти, поки тригер не буде знову встановлений генератором. Така схема забезпечує постійну частоту комутації, однак величина пульсацій струму не буде постійною. Частота генератора зазвичай вибирається не менше 20кГц, щоб двигун не створював чутного звуку. У той же час занадто висока частота перемикань може спричинити підвищені втрати в осерді двигуна і втрати на перемиканнях транзисторів. Хоча втрати в сердечнику з підвищенням частоти зростають не так швидко через зменшення амплітуди пульсацій струму зі зростанням частоти. Пульсації близько 10% середнього значення струму зазвичай не викликають проблем із втратами. Подібна схема реалізована всередині мікросхеми L297 фірми SGS-Thomson, застосування якої мінімізує кількість зовнішніх компонентів. Ключове регулювання реалізують інші спеціалізовані мікросхеми.

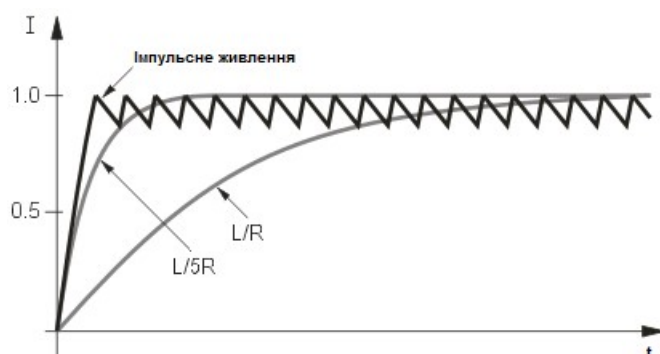


Рисунок 2.11 - Форма струму в обмотках двигуна для різних способів живлення.

На рис. 2.11 показана форма струму в обмотках двигуна для трьох способів живлення. Найкращим у сенсі моменту є ключовий метод. До того ж, він забезпечує високий ККД і дозволяє просто регулювати величину струму.

Швидкий та повільний спад струму. На рис. 2.8 були показані конфігурації ключів Н-мосту для включення різних напрямків струму в обмотці. Для вимикання струму можна вимкнути всі ключі Н-моста або залишити один ключ увімкненим (рис. 2.12). Ці дві ситуації різняться за швидкістю спаду струму в обмотці. Після відключення індуктивності від джерела живлення струм не може миттєво припинитися. Виникає ЕРС самоіндукції, що має протилежне джерелу живлення напрямком. При використанні транзисторів як ключі необхідно використовувати шунтуючі діоди, щоб забезпечити провідність в обидві сторони. Швидкість зміни струму в індуктивності пропорційна доданій напруги. Це справедливо як наростання струму, так його спаду. Тільки першому випадку джерелом енергії є джерело живлення, тоді як у другому сама індуктивність віддає запасену енергію. Цей процес може відбуватися за різних умов.

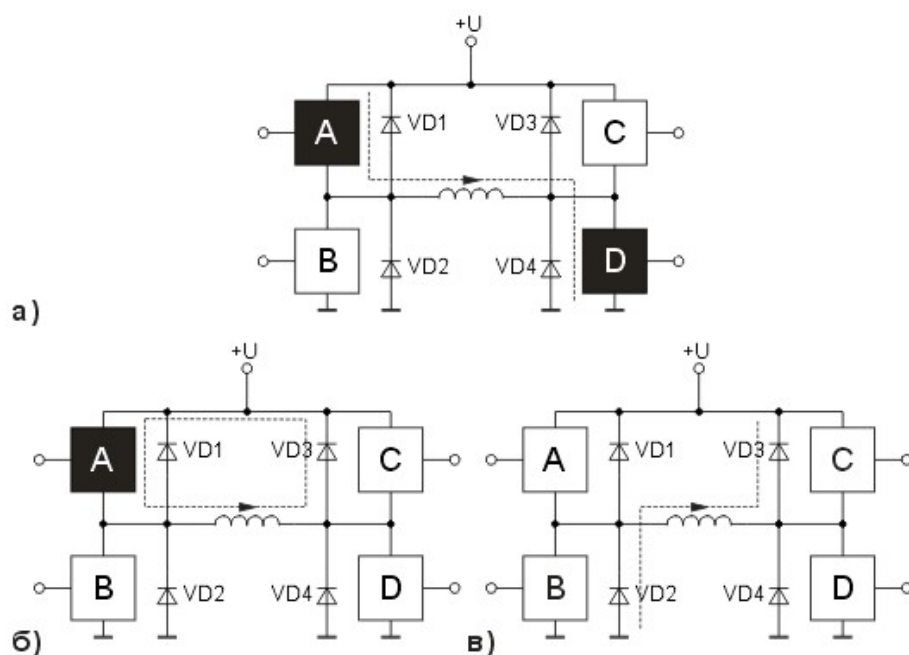


Рисунок 2.12 - Повільний та швидкий спад струму.

На рис. 2.12а показано стан ключів Н-мосту, коли обмотка увімкнена. Увімкнені ключі А і D, напрямок струму показано стрілкою. На рис. 2.12б обмотка вимкнена, але ключ А увімкнено. ЕРС самоіндукції коротшає через цей ключ і діод VD3. У цей час на висновках обмотки буде невелика напруга, яка дорівнює прямому падінню на діоді плюс падіння на ключі (напруга насичення транзистора). Так як напруга на висновках обмотки мало, малою буде швидкість зміни струму. Відповідно малою буде швидкість спадання магнітного поля. А це значить, ще деякий час статор двигуна створюватиме магнітне поле, якого в цей час не повинно бути. На ротор, що обертається, це поле надаватиме гальмуючий вплив. При високих швидкостях роботи двигуна цей ефект може серйозно перешкодити нормальній роботі двигуна. Швидке спадання струму при вимкненні є дуже важливим для високошвидкісних контролерів, що працюють у напівкроковому режимі.

Можливий інший спосіб відключення струму обмотки, коли розмикаються всі ключі Н-моста (рис 2.12в). При цьому ЕРС самоіндукції коротшає через діоди VD2, VD3 на джерело живлення. Це означає, що під час спаду струму на обмотці буде напруга, що дорівнює сумі напруги джерела живлення та прямого падіння на двох діодах. У порівнянні з першим випадком, це значно більша напруга. Відповідно, швидшим буде спад струму та магнітного поля. Таке рішення, що використовує напругу джерела живлення для прискорення спаду струму, є найпростішим, але не єдиним. Потрібно сказати, що у ряді випадків на джерелі живлення можуть виникнути викиди, для придушення яких знадобляться особливі демферні ланцюжки. Байдуже, яким способом забезпечується на обмотці підвищена напруга під час спаду струму. Для цього можна застосувати стабілітрони або варістори. Однак на цих елементах розсіюватиметься додаткова потужність, яка в першому випадку віддавалася назад у джерело живлення.

Для уніполярного двигуна ситуація складніша. Справа в тому, що половинки обмотки або дві окремі обмотки однієї фази сильно пов'язані між собою. В результаті цього зв'язку на транзисторі, що закривається, матимуть місце викиди підвищеної амплітуди. Тому транзистори мають бути захищені спеціальними ланцюжками. Ці ланцюги для забезпечення швидкого спаду струму повинні забезпечувати досить високу напругу обмеження. Найчастіше застосовуються діоди разом зі стабілітронами або варістори. Один із способів схемотехнічної реалізації показаний на рис. 2.13.

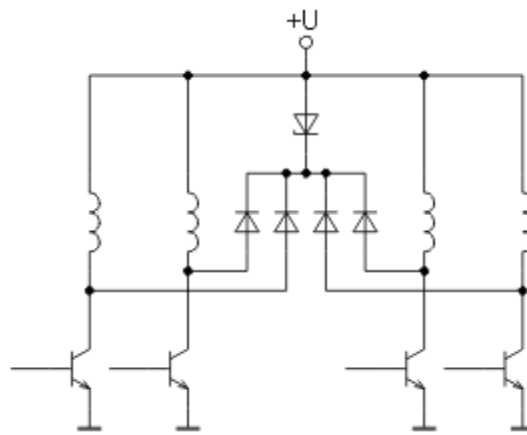


Рисунок 2.13 - Приклад реалізації швидкого спаду струму уніполярного двигуна

При ключовому регулюванні величина пульсацій струму залежить від швидкості спаду. Тут можливі різні варіанти. Якщо забезпечити закорочення обмотки діодом, буде реалізовано повільний спад струму. Це призводить до зменшення амплітуди пульсацій струму, що є бажаним, особливо при роботі двигуна в мікрокроковому режимі. Для цього рівня пульсацій повільний спад струму дозволяє працювати на нижчих частотах ШІМ, що зменшує нагрівання двигуна. З цих причин повільний спад струму широко використовується. Однак існує кілька причин, з яких повільне наростання струму не завжди є оптимальним: по-перше, через негативну зворотну ЕРС, через малу напругу на







компонентах або спеціалізованої мікросхеми. Досить популярною мікросхемою, що реалізує ШІМ-стабілізацію струму, є L297 фірми SGS-Thomson. Разом з мікросхемою мостового драйвера L293 або L298 вони утворюють закінчену систему управління крокового двигуна (рис. 2.16).

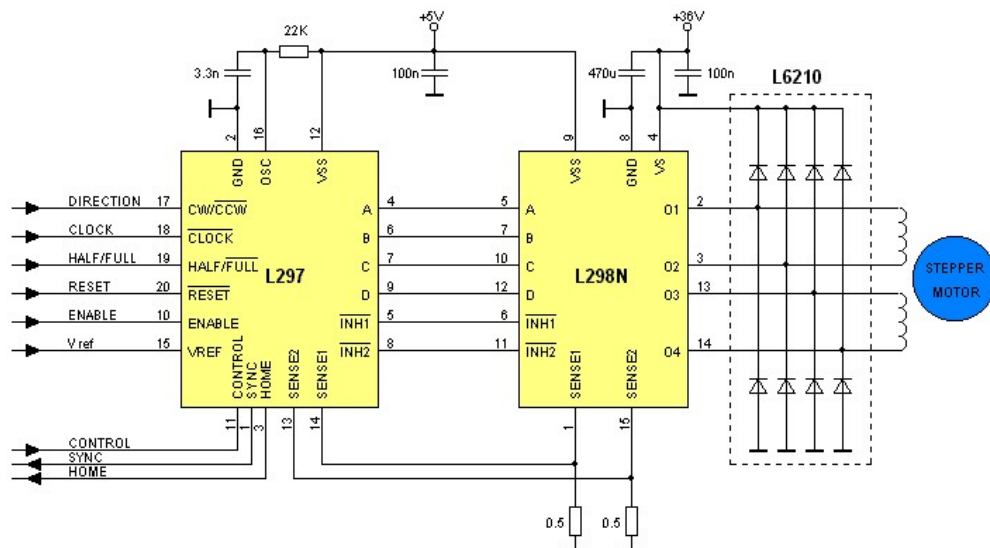


Рисунок 2.16 - Типова схема включення мікросхем L297 та L298N

Мікросхема L297 сильно розвантажує керуючий мікроконтролер, тому що від нього вимагається тільки тактова частота CLOCK (частота повторення кроків) і кілька статичних сигналів: DIRECTION – напрямок (сигнал внутрішньо синхронізований, перемикає можна в будь-який момент), HALF/FULL – напівкроковий/повноваговий режим, RESET – встановлює фази у вихідний стан (ABCD = 0101), ENABLE – дозвіл роботи мікросхеми, V ref – опорна напруга, яка визначає пікову величину струму при ШІМ-регулюванні. З іншого боку, є кілька додаткових сигналів. Сигнал CONTROL визначає режим роботи ШІМ-регулятора. При його низькому рівні ШІМ-регулювання відбувається за виходами INH1, INH2, а за високого – за виходами ABCD. SYNC – вихід внутрішнього тактового генератора ШІМ. Він служить для синхронізації роботи кількох мікросхем. Також може бути використаний як вхід при тактуванні зовнішнього генератора. HOME - сигнал початкового

положення (ABCD = 0101). Він використовується для синхронізації перемикачів режимів HALF/FULL. Залежно від моменту переходу в повнокроковий режим мікросхема може працювати в режимі з однією включеною фазою або двома включеними фазами. Ключове регулювання реалізують і багато інших мікросхем. Деякі мікросхеми мають ті чи інші особливості, наприклад драйвер LMD18T245 фірми National Semiconductor не вимагає застосування зовнішнього датчика струму, так як він реалізований всередині на основі одного осередку ключового МОП-транзистора. Деякі мікросхеми призначені спеціально для роботи в мікрокроковому режимі. Прикладом може бути мікросхема A3955 фірми Allegro. Вона має вбудований 3-бітний нелінійний ЦАП для завдання змінюється за синусоїдальним законом струму фази.

Вибір типу драйвера. Максимальний момент і потужність, яку може забезпечити на валу кроковий двигун, залежить від розмірів двигуна, умов охолодження, режиму роботи (відносини робота/пауза), від параметрів обмоток двигуна та від типу драйвера, що застосовується. Тип драйвера, що застосовується, сильно впливає на потужність на валу двигуна. При одній і тій же потужності, що розсіюється, драйвер з імпульсною стабілізацією струму забезпечує вигоду в моменті на деяких швидкостях до 5 - 6 разів, в порівнянні з живленням обмоток номінальною напругою. При цьому також розширюється діапазон допустимих швидкостей. Технологія приводів з урахуванням крокових двигунів постійно розвивається. Розвиток спрямовано отримання найбільшого моменту на валу при мінімальних габаритах двигуна, широких швидкісних можливостей, високого ККД і поліпшеної точності. Важливою ланкою цієї технології є застосування мікрокрокового режиму. Насправді важливим є час розробки приводу з урахуванням крокового двигуна. Розробка спеціалізованої конструкції для кожного конкретного випадку потребує значних витрат часу. З цього погляду краще застосовувати

універсальні схеми управління на основі PWM стабілізації струму, незважаючи на їх більш високу вартість.

Практичний приклад контролера крокового двигуна на основі мікроконтролера сімейства AVR

Незважаючи на те, що в даний час існує велика кількість спеціалізованих мікросхем для керування кроковими двигунами, в окремих випадках можна обійтися без них. Коли не висувається дуже жорстких вимог, контролер можна реалізувати повністю програмно. При цьому вартість такого контролера виходить дуже низькою.

Пропонований контролер призначений для управління уніполярним кроковим двигуном із середнім струмом кожної обмотки до 2.5А. Контролер може використовуватися з поширеними кроковими двигунами типу ДШ-200-1, -2, -3. Його також можна використовувати і для управління менш потужними двигунами, наприклад, тими, що застосовувалися для позиціонування головок в 5-дюймових дисководах. При цьому схему можна спростити, відмовившись від паралельного включення ключових транзисторів і ключової стабілізації струму, так як для малопотужних двигунів досить простого L/R-живлення.

Основою пристрою (рис. 2.17) є мікроконтролер U1 типу AT90S2313 фірми Atmel. Сигнали управління обмотками двигуна формуються на портах PB4 – PB7 програмно. Для комутації обмоток використовуються по два включені паралельно польові транзистори типу КП505А, всього 8 транзисторів (VT1 – VT8).

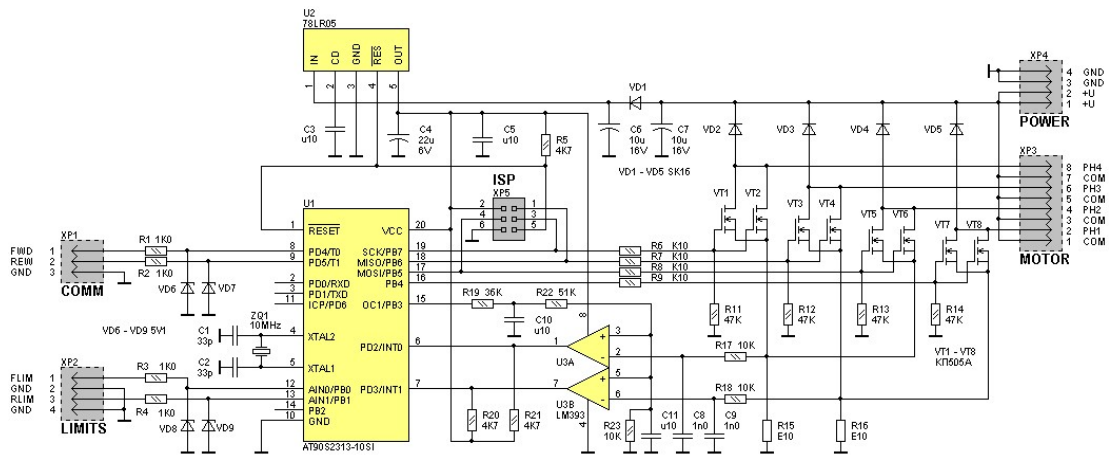


Рисунок 2.17 - Принципова схема контролера крокового двигуна.

Ці транзистори мають корпус TO-92 і можуть комутувати струм до 1.4А, опір каналу становить близько 0.3 ома. Для того, щоб транзистори залишалися закритими під час дії сигналу "скидання" мікроконтролера (порти в цей час знаходяться у високоімпедансному стані), між затворами та витокami включені резистори R11 - R14. Для обмеження струму перезаряджання ємності затворів встановлені резистори R6 – R9. Цей контролер не претендує на високі швидкісні характеристики, тому цілком влаштовує повільний спад струму фаз, що забезпечується шунтуванням обмоток двигуна діодами VD2 – VD5. Для підключення крокового двигуна є 8-контактний роз'єм XP3, який дозволяє підключити двигун, що має два окремі виводи від кожної обмотки (як, наприклад, ДШП-200). Для двигунів з внутрішнім з'єднанням обмоток один або два загальні контакти роз'єму залишаться вільними. Необхідно відзначити, що контролер може бути використаний для керування двигуном з великим середнім струмом фаз. Для цього тільки необхідно замінити транзистори VT1 – VT8 та діоди VD2 – VD5 потужнішими. Причому у разі паралельне включення транзисторів можна використовувати. Найбільш підходящими є МОП-транзистори, керовані логічним рівнем. Наприклад, це КП723Г, КП727В та інші. Стабілізація струму здійснюється за допомогою

ШІМ, яка також реалізована програмно. Для цього використовуються два датчики струму R15 та R16. Сигнали, зняті з датчиків струму, через ФНЧ R17C8 та R18C9 надходять на входи компараторів U3A та U3B. ФНЧ запобігають помилковим спрацьовуванням компараторів внаслідок дії перешкод. На другий вхід кожного компаратора має бути подана опорна напруга, яка визначає піковий струм в обмотках двигуна. Ця напруга формується мікроконтролером за допомогою вбудованого таймера, що працює в режимі 8-бітної ШІМ. Для фільтрації сигналу ШІМ використовується дволанка ФНЧ R19C10R22C11. Одночасно резистори R19, R22 і R23 утворюють дільник, який визначає масштаб регулювання струмів фаз. В даному випадку максимальний піковий струм, що відповідає коду 255, обраний 5.11А, що відповідає напрузі 0.511В на датчиках струму. Враховуючи той факт, що постійна складова на виході ШІМ змінюється від 0 до 5В, необхідний коефіцієнт розподілу дорівнює приблизно 9.7. Виходи компараторів підключені до входів переривань мікроконтролера INT0 та INT1. Для керування роботою двигуна є два логічні входи: FWD (вперед) і REW (назад), підключені до гнізда XP1. При подачі НИЗЬКОГО логічного рівня однією з цих входів, двигун починає обертатися на заданій мінімальній швидкості, поступово розганяється із заданим постійним прискоренням. Розгін завершується, коли двигун досягає заданій робочій швидкості. Якщо подається команда зміни напрямку обертання, двигун з тим самим прискоренням гальмується, потім реверсується та знову розганяється. Крім командних входів, є два входи кінцевих вимикачів, підключених до гнізда XP2. Кінцевий вимикач вважається таким, що спрацював, якщо на відповідному вході присутній НИЗЬКИЙ логічний рівень. При цьому обертання у цьому напрямку заборонено. При спрацьовуванні кінцевого вимикача під час обертання двигуна він переходить до гальмування із заданим прискоренням, а потім зупиняється. Командні входи та входи кінцевих

вимикачів захищені від перенапруг ланцюжками R1VD6, R2VD7, R3VD8 та R4VD9, що складаються з резистора та стабілітрона. Живлення мікроконтролера формується за допомогою мікросхеми стабілізатора 78LR05, яка одночасно виконує функції монітора живлення. При зниженні напруги живлення нижче встановленого порога ця мікросхема формує для контролера сигнал «скидання». Живлення на стабілізатор подається через діод VD1, який разом із конденсатором С6 зменшує пульсації, викликані комутаціями щодо потужного навантаження, яким є кроковий двигун. Живлення на плату подається через 4-контактне роз'єм ХР4, контакти якого задубльовані.

#### 2.4 Висновки до другого розділу

Наведено розробку структурної схеми пристрою вимірювання параметрів крокових двигунів. Структурна схема складається із необхідних блоків, що забезпечують виконання усіх заявлених параметрів.

Наведене обґрунтування технічних рішень побудови схеми електричної принципової. Запропоновані різні варіанти схемних рішень по керуванню кроковими двигунами і вимірюванню їх параметрів.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 3.1 Розробка алгоритму роботи пристрою

Версія програми дозволяє здійснювати розгін та гальмування двигуна з постійним прискоренням, а також обертання на постійній швидкості у повнокроковому або напівкроковому режимі. Ця програма містить весь необхідний набір функцій та може бути використана як базова для написання спеціалізованих програм. Тому має сенс розглянути її структуру докладніше. Головним завданням програми є формування імпульсних послідовностей для 4 обмоток двигуна. Оскільки для цих послідовностей часові співвідношення є критичними, формування виконується в обробнику переривання таймера 0. Можна сказати, основну роботу програма виконує саме в цьому обробнику. Блок-схема про робітника наведена на рис. 3.1.

Безперечно, було б зручніше використовувати таймер 1, оскільки він 16-розрядний і здатний викликати періодичні переривання збігу з автоматичним обнуленням. Однак він зайнятий формуванням за допомогою ШІМ опорної напруги компараторів. Тому доводиться перезавантажувати таймер 0 у перериванні, що вимагає деякого коригування завантажуваної величини і викликає деякий джиттер, який, проте, практично не заважає. Як основна часова база обраний інтервал 25мкс, який і формується таймером. З такою дискретністю можуть формуватися тимчасові послідовності фаз, такий період має і ШІМ стабілізації струму у фазах двигуна. Для формування періоду повторення кроків використовується програмний 16-розрядний таймер STCNT. На відміну від таймера 0, його завантажувальна величина не є константою, оскільки саме вона визначає швидкість обертання двигуна. Таким чином, перемикання фаз відбувається лише при переповненні програмного таймера.

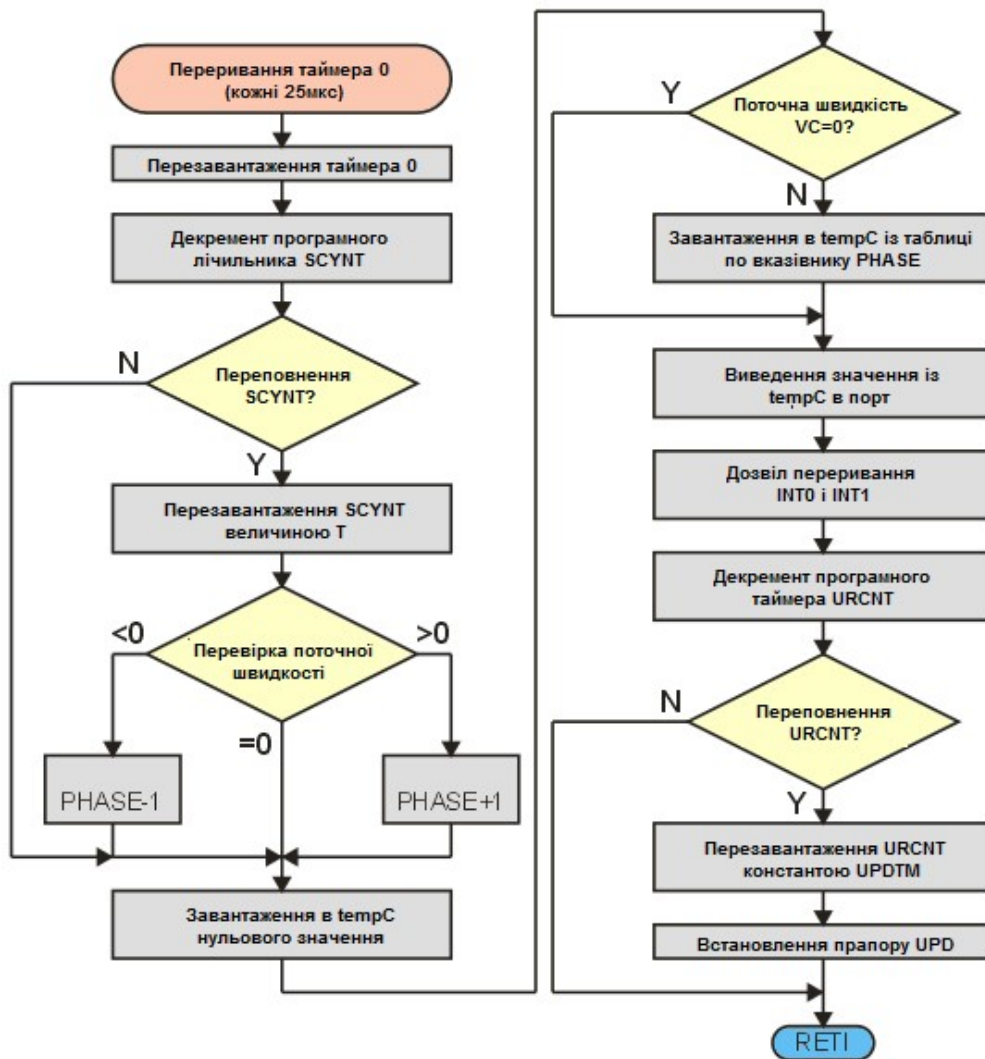


Рисунок 3.1 - Блок-схема обробника переривання таймера 0.

Послідовність чергування фаз задана таблично. У пам'яті програм мікроконтролера є три різних таблиці: для повнокрокового режиму без перекриття фаз, повнокрокового з перекриттям і напівкрокового режиму. Усі таблиці мають однакову довжину 8 байт. Потрібна таблиця на початку роботи завантажується в ОЗУ, що дозволяє найпростіше переходити між різними режимами роботи двигуна. Вибірка значень з таблиці відбувається за допомогою покажчика PHASE, тому перемикання напрямку обертання двигуна також здійснюється дуже просто: для обертання вперед потрібно

інкрементувати показчик, а для обертання назад декрементувати. Найголовніша змінна в програмі - це 24-бітна знакова змінна VC, яка містить значення поточної швидкості. Знак цієї змінної визначає напрямок обертання, а значення – частоту проходження кроків. Нульове значення цієї змінної свідчить, що двигун зупинено. Програма у разі виключає струм всіх фаз, хоча у багатьох додатках у цій ситуації потрібно залишити включеними поточні фази і лише трохи зменшити їх струм, забезпечивши цим утримання становища двигуна. За потреби таку зміну логіки роботи програми зробити дуже просто. Отже, у разі переповнення програмного таймера STCNT відбувається аналіз значення змінної VC, у разі позитивного значення показчик PHASE інкрементується, а разі негативного – декрементується. Потім таблиці вибирається чергова комбінація фаз, яка виводиться в порт. У разі нульового значення VC показчик PHASE не змінюється, і порт виводяться всі нульові значення.

Величина T, якою слід завантажувати таймер STCNT однозначно пов'язана зі значенням змінної VC. Однак переведення частоти в період займає досить багато часу, тому ці обчислення виробляються в основній програмі, і не на кожному кроці, а набагато рідше. Взагалі, ці обчислення потрібно періодично проводити лише під час розгону чи гальмування. В інших випадках швидкість, і, відповідно, період повторення кроків не змінюються. Для здійснення ШІМ-стабілізації струму фази повинні періодично включатися, а потім, досягаючи струмом заданого рівня, вимикатися. Періодичне включення проводиться у перериванні таймера 0, навіть у разі відсутності переповнення програмного таймера STCNT порт виводиться поточна комбінація фаз. Відбувається це з періодом 25мкс (що відповідає частоті ШІМ 40кГц). Вимкненням фаз управляють компаратори, виходи яких підключені до входів переривання INT0 та INT1. Переривання дозволяються після того, як струм фаз включається і забороняються відразу після

перемикування компараторів. Це виключає їхню повторну обробку. У обробниках переривань відбувається лише відключення відповідних фаз (рис. 3.2).

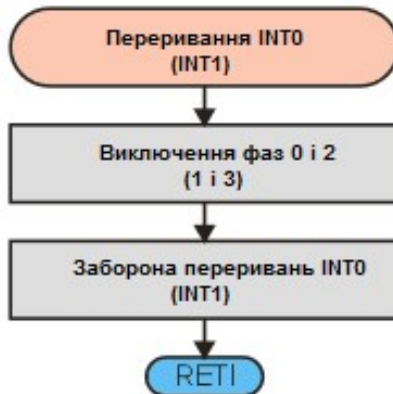


Рисунок 3.2 - Блок-схема обробника переривань INT0 та INT1

Процеси, що відбуваються при ШІМ-стабілізації струму, показано на рис. 3.3. Особливо слід зазначити, що струм датчика струму має уривчастий характер навіть у тому випадку, якщо струм обмотки не переривається. Це пов'язано з тим, що під час спаду струму його шлях не проходить через датчі до струму (а проходить через діод).

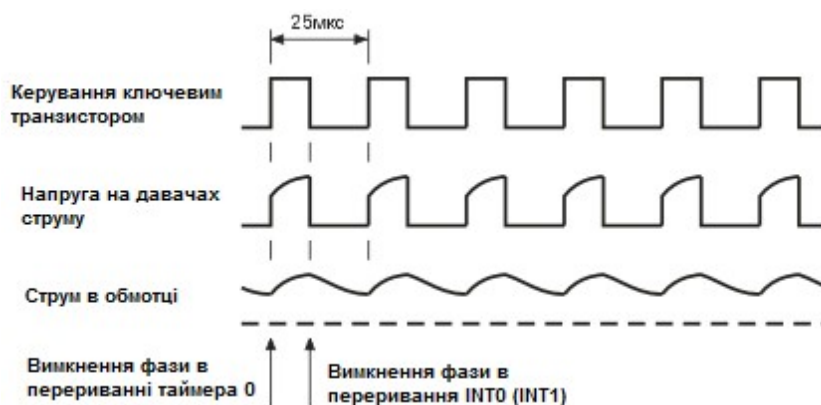


Рисунок 3.3 - Процес ШІМ-стабілізації струму

Потрібно сказати, що аналогова частина системи ШИМ-стабілізації струму фаз двигуна є досить "капризною". Справа в тому, що сигнал, який знімається з датчика струму, містить велику кількість перешкод. Перешкоди виникають в основному в моменти комутації обмоток двигуна, причому як "свої", так і "чужої" фази. Для правильної роботи схеми потрібне коректне розведення друкованої плати, особливо це стосується земляних провідників. Можливо, доведеться підібрати номінали ФНЧ на вході компаратора, або навіть ввести в компаратор невеликий гістерезис. Як зазначалося вище, під час управління малопотужними двигунами від ШИМ-стабілізації струму можна відмовитися, застосувавши звичайну L/R-схему живлення обмоток. Для виключення ШИМ-стабілізації досить просто не підключати входи INT0 та INT1 мікроконтролера, природно, при цьому можна взагалі не встановлювати компаратор та датчики струму. У цій програмі періодичність обчислення нових значень швидкості та періоду обрана рівною 15.625мс. Таке значення вибрано не випадково. Цей інтервал становить  $1/64$ с, а головне, він містить цілу кількість періодів переповнення таймера 0 (25мкс). Зручно, якщо значення швидкості та прискорення задаються у природних одиницях, тобто. у кроках у секунду та у кроках, поділених на секунду у квадраті. Для того, щоб мати можливість у цілісній арифметиці обчислювати миттєву швидкість 64 рази на секунду, потрібно перейти до внутрішнього уявлення швидкості, збільшеного в 64 рази. Множення та розподіл на 64 зводиться до звичайних зрушень і тому потребує дуже мало часу. Задану періодичність обчислень забезпечує ще один програмний таймер UR CNT, який декрементується у перериванні таймера 0 (раз на 25мкс). Цей таймер завжди завантажується постійною величиною, що забезпечує постійний період його переповнень, що дорівнює 15.625мс. При переповненні цього таймера встановлюється бітовий прапор UPD, який сигналізує основній програмі, що «пора-обновити значення швидкості і періоду». Основна програма (рис. 3.4) виконує обчислення

миттєвих значень швидкості та періоду проходження кроків, забезпечуючи необхідну криву розгону. У разі розгін і гальмування здійснюються з постійним прискоренням, тому швидкість змінюється лінійно. Період при цьому змінюється за гіперболічним законом, і його обчислення - основна робота програми.

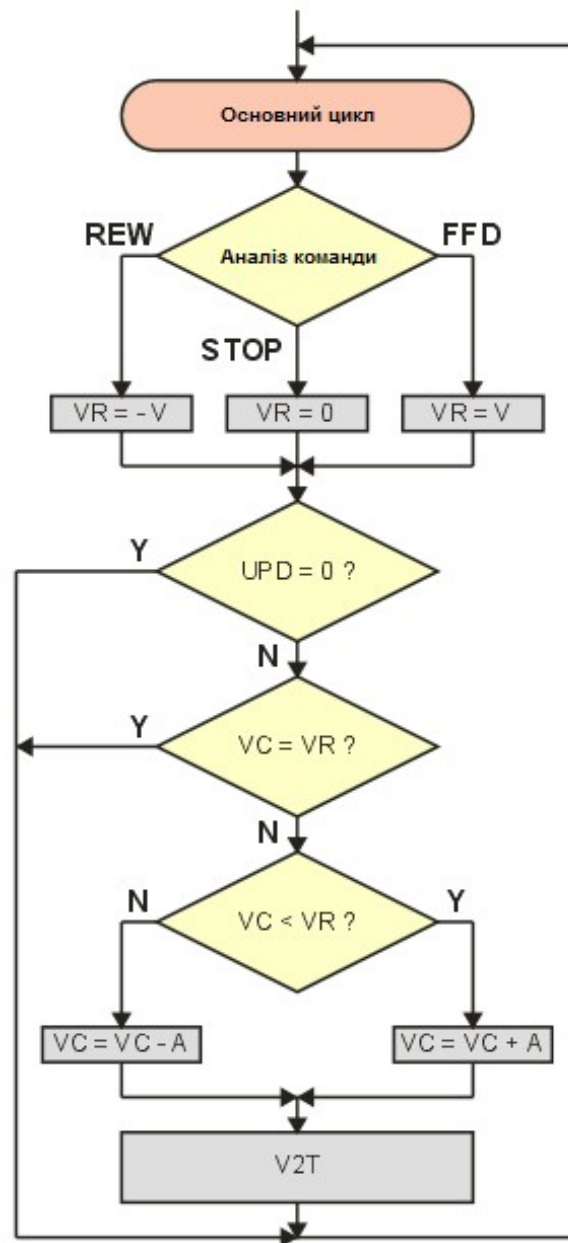


Рисунок 3.4 - Блок-схема основного циклу програми







її результат.

Послідовність виконання програми може бути змінена командами умовного та безумовного переходу, а також командою виклику підпрограми, де використовується безпосередня адресація.

Більшість інструкцій AVR є одним 16-розрядним словом. Кожна адреса пам'яті програми містить 16-бітову інструкцію або половину 32-розрядної інструкції.

При виконанні процедури обробки переривання або підпрограми поточне значення лічильника команд (PC) зберігається у стеку.

Стек фактично розміщено в одному адресному просторі з пам'яттю даних SRAM (ОЗУ) і, отже, розмір стека обмежений лише розміром SRAM і тим, яку частину SRAM використовує решта програми.

Програма користувача обов'язково повинна ініціалізувати покажчик стека (SP) відразу після скидання (перед тим, як буде виконана підпрограма або буде викликано переривання). Покажчик стека (SP) має свою конкретну адресу у просторі регістрів вводу-виводу. До даних ОЗУ (SRAM) можна отримати доступ, використовуючи пам'ять різних способів адресації, підтриманих архітектурою AVR.

Адресний простір всіх видів пам'яті в архітектурі AVR є регулярним лінійним. Гнучкий модуль переривань має ряд реєстраторів управління в адресному просторі регістрів вводу-виводу та додатковий прапор глобального дозволу переривань у регістрі статусу.

Кожен вид переривання має окремий вектор у таблиці векторів переривань. Переривання мають пріоритет відповідно до їхнього положення в таблиці векторів переривань. Чим нижча адреса вектора переривання, тим вищий пріоритет

Простір регістрів вводу-виводу містить 64 адреси для регістрів керування периферійними пристроями, регістрів керування режимами роботи



Продовження таблиці 3.1 – Опис виводів

Port В (PB7..PB0)	<p>Порт В - восьмирозрядний двонаправлений порт введення-виведення.</p> <p>Кожна лінія порту має можливість підключення внутрішнього навантажувального резистора. Підключення резистора здійснюється програмним шляхом лише в тому випадку, якщо цей конкретний висновок знаходиться в режимі введення. Коли резистор підключений, він створює вихідний струм, що закінчується, для зовнішніх пристроїв, що формують низький логічний рівень. Вихідний буфер кожної лінії порту А має симетричний каскад із високою здатністю навантаження. Після системного скидання всі висновки порту переходять у високоімпендансний стан (режим введення без навантажувального резистора) навіть у тому випадку, якщо системний генератор не працює. Всі висновки порту, крім своїх основних функцій, мають також і альтернативні.</p>
Port D (PD6..PD0)	<p>Порт D - семирозрядний двонаправлений порт введення-виводу.</p> <p>Кожна з ліній порту має можливість підключення внутрішнього навантажувального резистора. Підключення резистора здійснюється програмним шляхом тільки в тому випадку, якщо цей конкретний висновок знаходиться в режимі введення. Коли резистор підключений, він створює вихідний струм, що закінчується, для зовнішніх пристроїв, що формують низький логічний рівень. Вихідний буфер кожної лінії порту А має симетричний каскад із високою здатністю навантаження. Після системного скидання всі висновки порту D переходять у високоімпендансний стан (режим введення без резистора навантаження) навіть у тому випадку, якщо системний генератор не працює. Усі висновки порту D, крім своїх основних функцій, мають також та альтернативні.</p>







## ВИСНОВКИ

В роботі проведено дослідження крокових двигунів. Описані різні їх типи. Вказано на особливості їх конструкцій та способів керування.

Запропоновано схему для дослідження параметрів крокових двигунів. Схема дозволяє в автоматичному та ручному режимі досліджувати параметри крокового двигуна.

Розроблено алгоритм та програмне забезпечення макету для дослідження параметрів крокових двигунів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайчен-ко. - Київ : Освіта України, 2010. - 159 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.
2. Акопов, А. С. Імітаційне моделювання: підручник і практикум для академічного бакалаврату / А. С. Акопов. - К. : "Корнійчук", 2017. – 136с.
3. Виговський В. С. Автоматизація керування живильними насосами енергоблоку потужністю 200 МВт / В. С. Виговський, Ю. С. Грищук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2015. – № 13 (1122). – С. 20–31.
4. Гуржій А. М. Електротехніка та основи електроніки : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Гуржій, С. К. Мещанінов, А. Т. Нельга, В. М. Співак. - Київ : Літера ЛТД, 2020. - 288 с.
5. Довідникова книга з електроенергетики: навчальний посібник/ П.В. Волох, М.П. Цоколенко, Л.В. Ревенко, В.А. Грічаненко та ін. –К. : Аграрна освіта, 2014. – 506 с.
6. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.
7. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко,В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
8. Електропостачання агропромислового комплексу: підруч. / Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М.–К. :Аграрнаосвіта, 2011. – 448с.

9. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах: Підручник / ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О. та ін. – К.: ЦУЛ, 2011. – 832 с. – (МОН України. НТУ “ХП”)

10. Ісікова, Н. П. Проектування інформаційних систем [Текст] : навч. посіб. / Н. П. Ісікова, Т. В. Решетняк. — Краматорськ : ДДМА, 2020. — 111 с.

11. Кветний Р. Н. Методи фільтрації текстурованих зображень у задачах розпізнавання та класифікації / Р. Н. Кветний, О. Ю. Софіна. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – 119 с.

12. Комп'ютери та комп'ютерні технології : навч. посіб. Ч. 1. Програмування в математичному пакеті MathCAD / В.П. Лисенко. І.М. Болбот. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 229 с.

13. Сегеда, М. С. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії [Текст] : навч. посіб. / М. С. Сегеда, М. Й. Олійник, О. Б. Дудурич. — Львів : Львівська політехніка, 2019. — 204с.

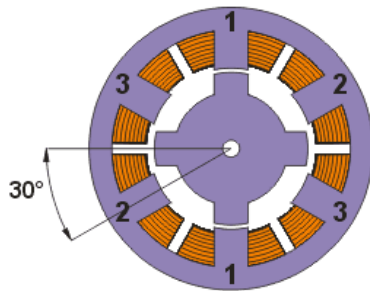
14. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі: навчальний посібник / Коновалюк О.В., Кіяшко В.М., Колісник М.В. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 404 с.

# Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна

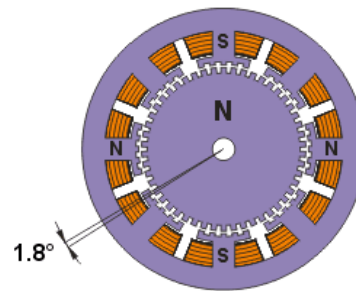
Студент: Вадим НАХІМЧУК

Керівник: Валерій МАРТИНЮК, д.т.н., проф.

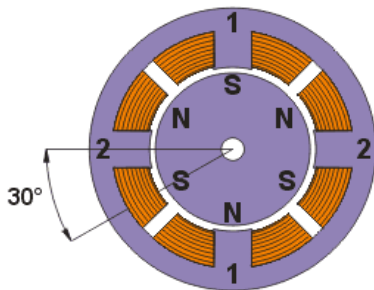
## ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ



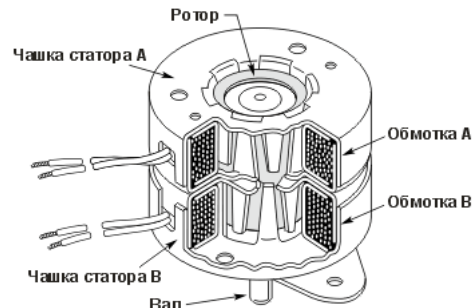
Двигун із змінним магнітним опором



Гібридний двигун

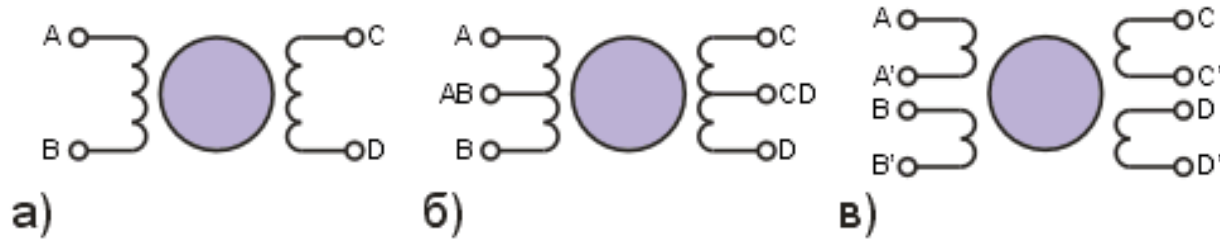


Двигун із постійними магнітами

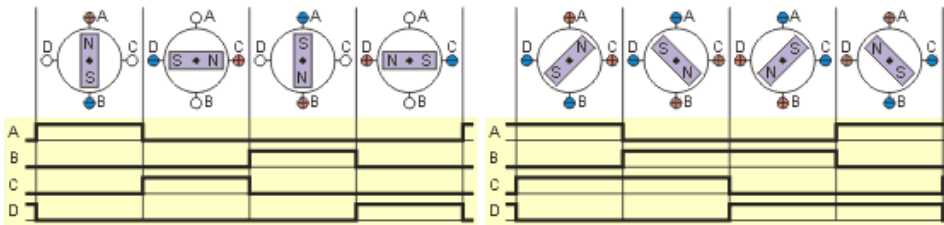


Розріз крокового двигуна із постійними магнітами

# ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ



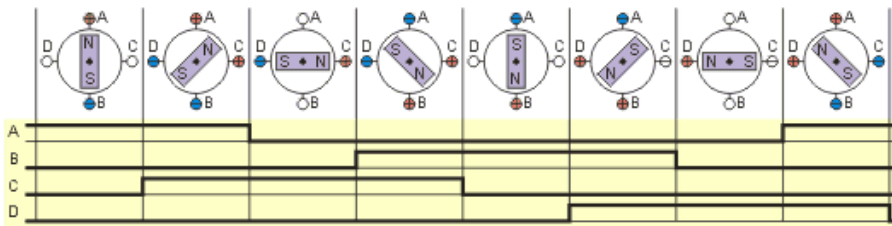
Біполярний двигун (а), уніполярний (б) та чотириобмотувальний (в)



а) "one phase on" full step (wave drive mode)

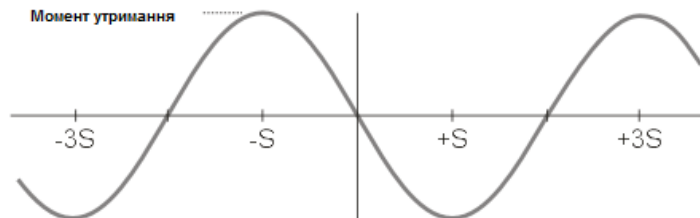
б) "two-phase on" full step (full step mode)

Різні методи управління фазами крокового двигуна

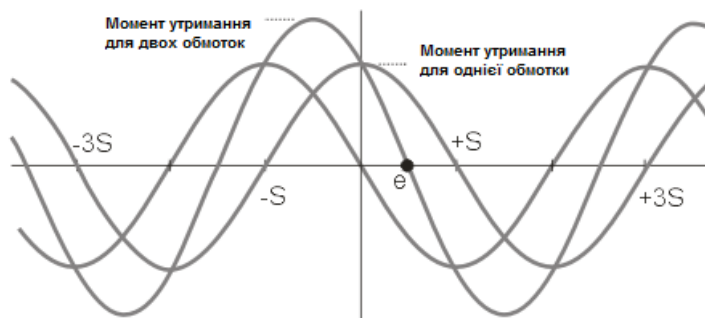


в) "one and two-phase on" half step (half step mode)

# ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ

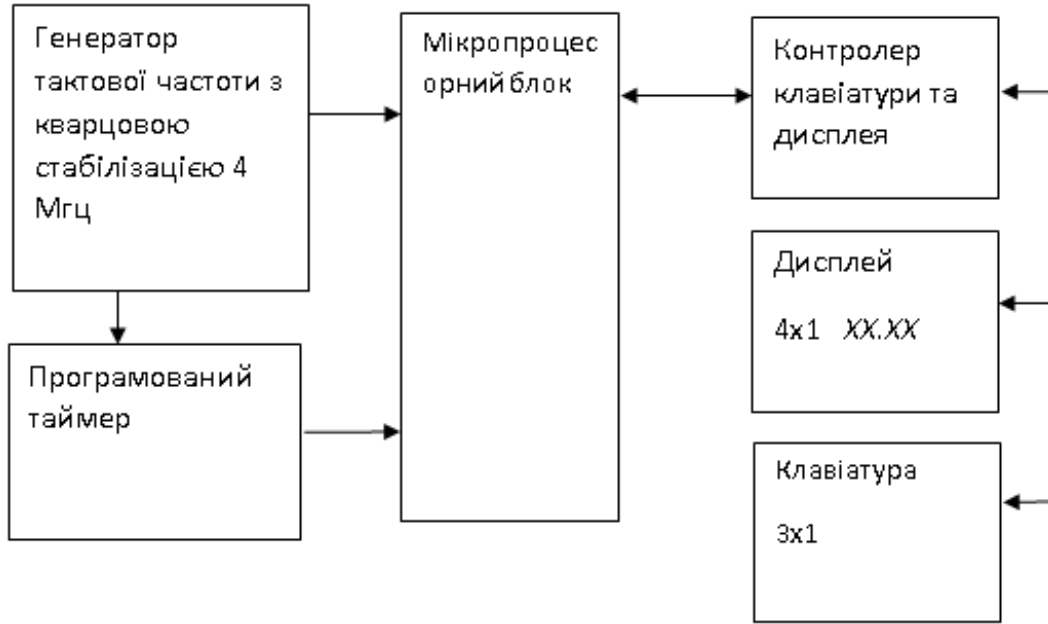


Залежність моменту від кута повороту ротора однієї підключеної обмотки



Залежність моменту від кута повороту ротора для двох обмоток

# СТРУКТУРНА СХЕМА



Структурна схема пристрою

# ПРИНЦИПОВА СХЕМА

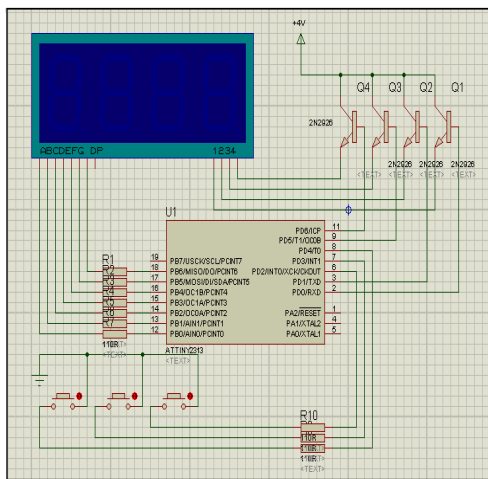
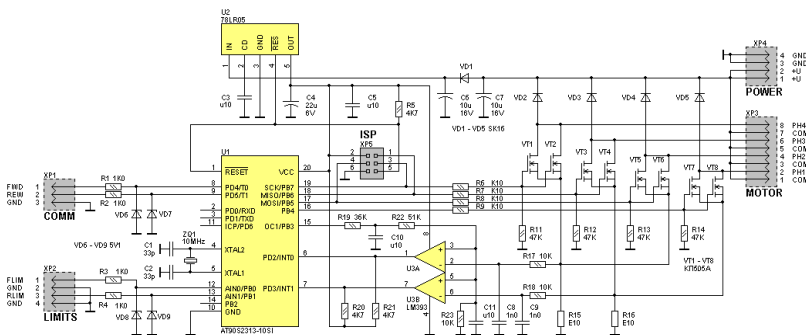


Схема електрична принципова побудована із допомогою програмного забезпечення Proteus 8



Принципова схема контролера крокового двигуна.

## • ВИСНОВКИ

В роботі проведено дослідження крокових двигунів. Описані різні їх типи. Вказано на особливості їх конструкцій та способів керування.

Запропоновано схему для дослідження параметрів крокових двигунів. Схема дозволяє в автоматичному та ручному режимі досліджувати параметри крокового двигуна.

Розроблено алгоритм та програмне забезпечення макету для дослідження параметрів крокових двигунів.

Доповідь закінчено.

Дякую за увагу!

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1011609354

Дата перевірки:  
18.06.2022 16:06:19 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet

Дата звіту:  
18.06.2022 16:25:14 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Нахімчук антиплагіат в1

Кількість сторінок: 82 Кількість слів: 14103 Кількість символів: 104893 Розмір файлу: 852.50 KB ID файлу: 1011477794

## 9.01% Схожість

Найбільша схожість: 5.07% з Інтернет-джерелом (<http://eom.com.ua/index.php?action=dlattach;topic=19481.0;attach=3...>)

9.01% Джерела з Інтернету

101

Сторінка 84

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

3

# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%****Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 6%**

ID: 105920 Назва: Бакалаврська кваліфікаційна робота Додано в БД: 2022-06-18 Автора: Нахімчук В. Керівники: Мартинюк В.В. Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	100281	977	3786 (4%)	53 (5%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Нахімчук Вадим Володимирович

Тема: Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 0 Кількість сторінок записки 87

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження розробки методів та принципів побудови крокових двигунів та способів їхнього керування
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Дипломна робота відповідає виданому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У першому розділі розглянуто опис конструкцій крокових двигунів. Наведено принципи регулювання і керування крокових двигунів. Описано контролер крокового двигуна. В розділі розглянуто двигуни зі змінним магнітним опором, двигуни з постійними магнітами, дібридні двигуни, діполярні та уніполярні крокові двигуни. Проведено порівняння біполярних чи уніполярних крокових двигунів. Показані їх переваги і недоліки у порівнянні із іншими видами двигунів. У змісті другого розділу кваліфікаційної роботи були наведено розробку структурної схеми пристрою вимірювання параметрів крокових двигунів. Структурна схема складається із необхідних блоків, що забезпечують виконання усіх заявлених параметрів. Наведене обґрунтування технічних рішень побудови схеми електричної принципової. Запропоновані різні варіанти схемних рішень по керуванню кроковими двигунами і вимірюванню їх параметрів. У третьому розділі було представлено розробка алгоритму роботи пристрою. Блок схема складається із усіх необхідних етапів що забезпечують керування кроковим двигуном в різних напрямках. Представлені блок-схеми алгоритмів окремих підпрограм по керуванню і налаштуванню портів мікроконтролера. Запропоновано програмний код керування кроковим двигуном написаний на мові програмування C++.

4. Позитивні сторони роботи: Найбільшою перевагою роботи є побудова моделей крокових двигунів та їх дослідження, що дає змогу розробляти схеми їх керування більш ефективно.

5. Негативні сторони роботи: -

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: -

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на високому науковому рівні

8. Інші зауваження: -

9. Оцінка дипломної роботи: Розглянувши представлену роботу, вважаю, що робота заслуговує оцінки добре 3,75 (С)

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи)

В.Т.К., доц. каф. КІІС Нічепорук А.О. - (кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем)

«20» 08 2022р.

  
підпис

Завідувачу кафедри АКІТ  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Нахімчука В.В.

ГІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи АКІТс-19-1

### ЗАЯВА

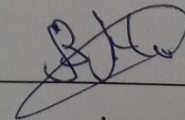
З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) 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 (Unicheck 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.

18.06.2022р

дата

  
підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ ПО КАФЕДРИ

**АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Автоматизована система вимірювання параметрів крокового двигуна

Автор: Вадим НАХІМЧУК

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітня програма 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Науковий керівник д.т.н., проф. Валерій МАРТИНЮК

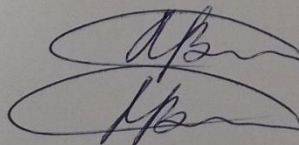
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є 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. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнуті. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 9,01%, що виявлені в роботі, містять посилання на відповідні джерела літератури, що використані в роботі. Результати конструкторського розділу не містять запозичень. Розроблена схема електрична та її опис є унікальними та також не містять запозичень. Робота приймається до захисту.

18.06.2024р.

Науковий керівник роботи:



Валерій МАРТИНЮК

Зав. каф. АКІТ

Валерій МАРТИНЮК