

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр

Освітній рівень

Система керування електродвигуном з плавним пуском

Назва теми

КвРАКІТ.2022128.03.13 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 III курсу, група АКІТс-22-1


Підпис

Вадим ПЕДОС
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис, дата

Максим ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

зав. кафедри автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки


Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 19 » червня 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК

07 лютого 2025р.



ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Педосу Вадиму Михайловичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Система керування електродвигуном з плавним пуском

Керівник роботи канд.техн.наук. Максим ДИХА

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

Затверджено наказом ректора університету від 07.02.2025 р. №23

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.06.2025р.





3 Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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)
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 07 лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вибір та затвердження теми кваліфікаційної роботи; розробка завдання на кваліфікаційну роботу; складання календарного графіка виконання кваліфікаційної роботи	01.03.2025	Виконано
2 Вивчення предметної області, в якій планується використання системи автоматизації; аналіз вимог до системи автоматизації	15.03.2025	Виконано
3 Проектування та розробка загальної архітектури і структури системи автоматизації, інтерфейсу користувача; вибір засобів реалізації системи автоматизації	29.03.2025	Виконано
4 Програмна реалізація та тестування системи автоматизації	12.04.2025	Виконано
5 Написання тексту пояснювальної записки та розробка графічних матеріалів	19.04.2025	Виконано
6 Остаточне коригування кваліфікаційної роботи з урахуванням зауважень керівника; оформлення кваліфікаційної роботи як документа відповідно до вимог	11.04.2025	Виконано
7 Отримання супровідних документів (відгуку керівника, рецензії, довідки про перевірку на плагіат); нормоконтроль	30.05.2025	Виконано
8 Підготовка до захисту та захист кваліфікаційної роботи	03.06.2025	Виконано

Студент


 Підпис

Вадим ПЕДОС
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


 Підпис

Максим ДИХА
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система керування електродвигуном з плавним пуском».

Автор роботи: Вадим ПЕДОС

Керівник роботи: Максим ДИХА

Пояснювальна записка: 63 с., 44 рис., 1 табл., - дод., 40 джерел.

Графічна частина: 8 презентаційних слайдів.

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ПЛАВНИЙ ПУСК, КОНТРОЛЕРНИЙ ПРИСТРІЙ, БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування електродвигуном з плавним пуском.

Розроблено модуль плавного пуску двигуна постійного струму на основі мікроконтролера. Спроектвані електричні та електронні з'єднання, обрана апаратна платформа та компонентна основа. Розроблено керуючу програму для реалізації контролю робочого циклу двигуна та плавного пуску.

Для забезпечення оперативного контролю та плавного запуску вибраного двигуна постійного струму була розроблена програма керування. Для отриманого програмного коду були складені всі необхідні блок-схеми робочого алгоритму. Включено блок-схему, що описує роботу різних компонентів програмного комплексу пристрою плавного пуску.





Розроблений пристрій плавного пуску може бути використаний як один із компонентів шасі автоматичного мобільного транспортного робота або його прототип після подальшого доопрацювання схемної частини, оновлення та налагодження програмного забезпечення.


Підпис студента

19.06.25
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 СТАН ПИТАННЯ	5
1.1 Огляд існуючих технологій і рішень	5
1.2 Застосування пристроїв плавного пуску двигунів	6
1.3 Транспортна платформа що рухається автоматично	11
1.4 Висновки до першого розділу	14
2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ М'ЯКОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	16
2.1 Ходова частина роботів	16
2.2 Керування транспортною платформою	19
2.3 Активне використання безколекторних двигунів	21
2.4 Апаратне забезпечення пристрою м'якого пуску електродвигуна	26
2.5 Компонентна база пристрої м'якого пуску електродвигуна	29
2.6 Висновки до другого розділу	42
3 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ М'ЯКОГО ПУСКУ	44
3.1 Алгоритм комутації обмоток електродвигуна	44
3.2 Широтно-імпульсна модуляція	46
3.3 Розробка керуючої програми	51
3.4 Висновки до третього розділу	56
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	60
ДОДАТОК А Програмний код системи управління	64

КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ								
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Система керування електродвигуном з плавним пуском Пояснювальна записка	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Педос В.М.		19.06.25				
Перевір.		Диха М.О.		19.06.25			2	
Н. Контр.		Корецька Л.О.		19.06.25		ХНУ, АКІТс-22-1		
Затв.		Мартинюк В.В.		19.06.25				

ВСТУП

Сьогодні робототехніка стала ключовою частиною комплексної автоматизації виробничих процесів. Можливе впровадження промислових роботів, що позитивно вплине на їх продуктивність і загальну якість роботи.

Під промисловими роботами зазвичай розуміють автоматизовані пристрої, що складаються з приводів, механізмів і програмованих пристроїв управління.

У складі різноманітних промислових роботів часто можна зустріти двигуни постійного струму, які живляться від ізольованої бортової мережі пристрою та забезпечують мобільність для власних ступенів свободи або прямого руху робота.

В автономних мобільних транспортних платформах двигуни постійного струму та їх системи приводу є ключовими компонентами шасі, оскільки вони забезпечують можливість переміщення робота в просторі [1-6].

Метою випускної кваліфікаційної роботи є підвищення якості роботи обладнання, в тому числі двигунів постійного струму, пускових і робочих характеристик двигунів, збільшення терміну їх служби шляхом розробки та проектування програмно-апаратного комплексу для плавного пуску двигунів постійного струму на основі мікроконтролерів.

Завданнями роботи є:

1. Проаналізувати сучасний стан робототехніки з акцентом на використання автономних мобільних платформ і роль двигунів постійного струму у промислових роботах.

2. Дослідити принципи роботи та характеристики двигунів постійного струму, які застосовуються в мобільних роботизованих системах, зокрема особливості пуску, керування та навантаження.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	3
		№ докум.	Підпис			

3. Розглянути існуючі підходи до реалізації плавного пуску двигунів постійного струму, їх переваги та недоліки, включаючи аналогові та цифрові способи керування.

4. Обґрунтувати вибір мікроконтролера для реалізації програмно-апаратного комплексу, а також розробити структурну та функціональну схеми пристрою.

5. Розробити програмне забезпечення для мікроконтролера, що забезпечує керування плавним пуском, контролем швидкості та моніторингом параметрів двигуна.

6. Провести моделювання, натурні експерименти або випробування, оцінити ефективність реалізованого пристрою та зробити висновки щодо підвищення якості роботи й ресурсу двигунів.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			4

1 СТАН ПИТАННЯ

1.1 Огляд існуючих технологій і рішень

Пристрої плавного пуску використовуються для плавного розгону (пуску), плавної зупинки та захисту двигунів. Напруга, що подається на двигун, контролюється регулюванням кута відкриття тиристора, так що двигун може запускатися і зупинятися плавно. При прямому пуску двигуна різко падає напруга в мережі, пусковий струм в обмотці статора зростає до критичного значення (в 6-8 разів перевищує номінальне значення), а крутний момент значно зростає. Для регулювання цих параметрів використовується пристрій плавного пуску. У момент розгону двигуна пристрій плавного пуску підвищує напругу живлення до початкової напруги (на 40-60% нижче номінальної напруги), а потім поступово підвищує її до номінальної. Зі збільшенням напруги пусковий струм і швидкість його збільшення зменшуються, тому час запуску двигуна збільшується. Для обмеження напруги використовуються силові вимикачі – тиристори.

Вибираючи пристрій плавного пуску, варто врахувати деякі нюанси, щоб правильно визначити потрібний пристрій плавного пуску з потрібними параметрами. У цьому контексті можна виділити такі випадки:

- обрано пристрій з номінальним струмом, який на один розряд перевищує розрахункове значення;
- враховано характеристики та можливості мережі для даної напруги;
- враховано умови роботи ЕСК;
- враховано сферу, механізм та обладнання, суміщене зі спусковим пристроєм. Це можуть бути, наприклад, лампи розжарювання, колодязні насоси, фабричні млини і різні агрегати. У разі використання пристрою резервного електроживлення (дизель-генератора) номінальна потужність резервного джерела живлення повинна перевищувати номінальну потужність

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	5
		№ докум.	Підпис			

двигуна в 5-6 разів, а при використанні перетворювача частоти - в 2-3 рази. Головне враховувати, що пристрій плавного пуску слід вибирати не на основі вартості пристрою, а зважаючи на діапазоні використання та характері запуску (нормальний, важкий, дуже важкий).

Пристрої плавного пуску використовуються в насосах, компресорах, конвеєрах, міксерах, екструдерах, токарних верстатах, шліфувальних машинах, повітродувках, циркулярних пилках (стрічкових пилках), центрифугах, дробарках тощо [1-6].

1.2 Застосування пристроїв плавного пуску двигунів

Принцип плавного пуску двигунів постійного струму активно використовується в багатьох галузях промисловості, включаючи автоматизацію процесів, транспортне машинобудування та робототехніку. Одним із найпоширеніших прикладів використання пристрою плавного пуску є його включення в систему електроприводу. Наприклад, у верстатах з ЧПК робочий елемент має бути точно позиціонований і його тремтіння неприпустимо. Пристрої плавного пуску також використовуються в конструкціях електромобілів, транспортних роботів, мобільних платформ.

Пристрій плавного пуску двигуна використовується для управління процесом пуску, зупинки і робочого циклу двигуна. Цей тип пристрою може плавно прискорювати та гальмувати двигун і зменшувати пусковий струм, як показано на рисунку 1.1.

У момент запуску крутний момент двигуна постійного струму може досягати близько 200% від номінального значення, що негативно позначається на механічній частині приводу. У свою чергу, пусковий струм міг перевищити робоче значення в десятки разів, що призвело до збою в мережі підприємства. Можливі перепади напруги. Якщо двигун встановлено в автономній системі, не підключеній до загальної електромережі, наприклад, якщо він є частиною

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	6
		№ докум.	Підпис			

мобільної транспортної платформи, високий пусковий струм може мати негативний вплив на електричну систему робота [7-9].

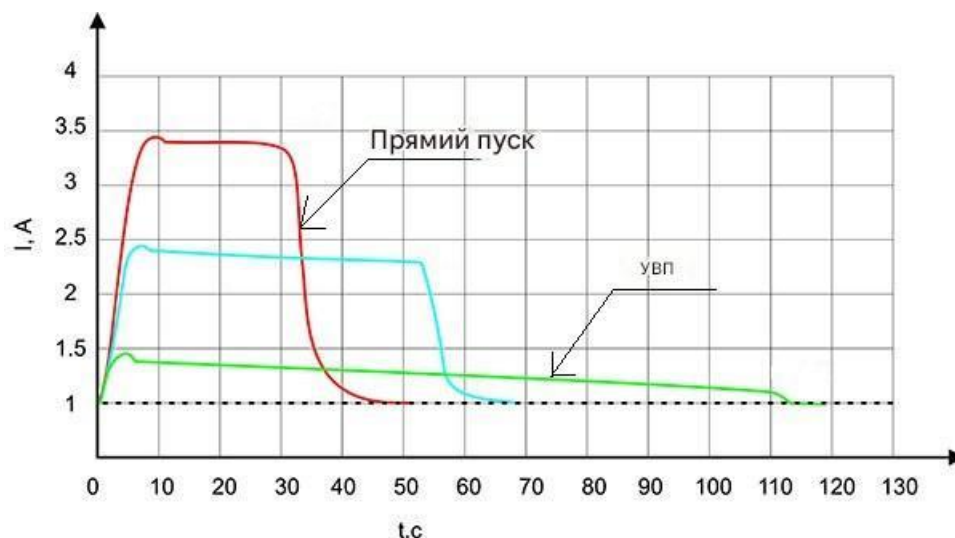


Рисунок 1.1 - Графік пускових струмів

У пристроях, що пропонують плавний пуск, обмеження струму досягається плавним підвищенням напруги на обмотках двигуна, що дозволяє підтримувати пускові параметри в безпечних межах. Це знижує можливість перегріву обмоток двигуна, усуває вібрацію в механічній частині і знижує навантаження на мережу електроживлення. Зрештою, правильно підібраний і налаштований пристрій плавного пуску може підвищити довговічність і надійність двигуна та його приводу.

Класифікація та види пристроїв плавного пуску двигунів. Пристрої плавного пуску для двигунів постійного струму можуть бути реалізовані за допомогою готових рішень, заснованих на аналогових схемах або з використанням більш складних пристроїв, таких як контролери.

На рисунку 1.2 показана принципова схема пристрою плавного пуску з використанням аналогових компонентів.

Конструкція Постійний магніт	Product Size 79 x 43 x 26mm
Крутний момент Stand	Package List 1 x Module
Комутація Щітка	Feature 1 upper and lower duty cycle
Функція захисту Захист від води	Feature 2 With standard 5135 instrument housing
Безперервний струм (А) 5А	Feature 3 Motor soft start function
Вихідна потужність 150W	Feature 4 3 start-stop button and external switch control

Рисунок 1.5 - Технічні характеристики контролера двигуна



Рисунок 1.6 - Контролер двигуна від компанії TAXNELE

Подібні конструкції є дорожчими та гнучкішими за функціями та налаштуваннями. Регулятори обертів двигуна забезпечують плавний пуск і зупинку, знижуючи механічні навантаження та усуваючи інші негативні ефекти. Модуль має людино-машинний інтерфейс для зручного зчитування інформації та налаштування регулювання швидкості. Регулювання забезпечує середні кроки в межах 5% від номінальної швидкості підключеного двигуна, але може виконуватися лише прямим натисканням функціональної кнопки. Крім того, модуль має обмеження щодо типів двигунів, які можна підключати.

Найбільш гнучкі, адаптивні та вдосконалені пристрої плавного пуску для двигунів постійного струму засновані на різних конструкціях мікроконтролерів. Розглянемо деякі переваги такого обладнання:

За допомогою мікроконтролера плавний пуск двигуна можна налаштувати під оптимальні робочі параметри використовуваного двигуна.

Контролер дозволяє системі плавного пуску адаптуватися до мінливих умов роботи двигуна та регулювати параметри запуску та зупинки в режимі реального часу. Системи плавного пуску на основі мікроконтролерів легко інтегруються з іншими системами управління та автоматизації, що значно розширює можливості їх застосування в різних галузях промисловості.

1.3 Транспортна платформа що рухається автоматично

Яскравим і перспективним прикладом застосування пристроїв плавного пуску на основі мікроконтролерів є їх реалізація в мобільних транспортних платформах [13-14]. На рисунку 1.7 показано приклад такого транспортного робота.

Ці транспортні роботи широко використовуються на складах і виробництвах для переміщення різноманітних вантажів за визначеними маршрутами та транспортування частин на конвеєрні стрічки, значно підвищуючи ефективність виробничих операцій. Перевезення вантажів повинні здійснюватися прямими маршрутами з використанням мінімальної кількості часу та простору. Це дозволяє уникнути повторного повернення на будь-який склад чи виробничу зону та неефективного виконання операцій. Кількість передач з одного пристрою на інший повинна бути мінімальною.

Одним з основних і найважливіших компонентів автономного мобільного транспортного робота є система управління, яка безпосередньо пов'язана з іншими системами, в даному випадку це шасі. Приклад блок-схеми робота AGV показано на рисунку 1.9.

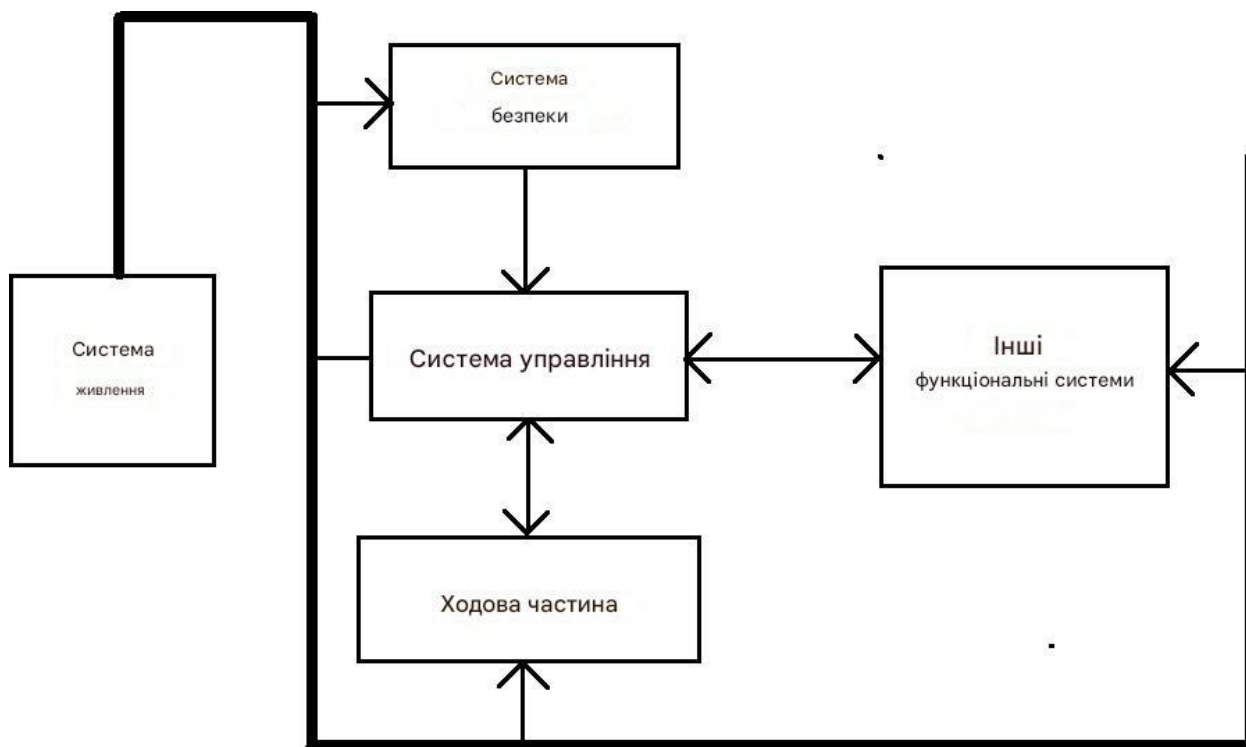


Рисунок 1.9 - Структурна схема AGV робота з 1 контролером

Як видно на зображенні вище, структура має головний мікроконтролер, який керує всіма частинами комплексу. Відповідно до предмету випускної кваліфікаційної роботи, що виконується, саме цей мікроконтролер виконує функції керування двигунами та приводами робота та здійснює плавний пуск компонентів або систем безпеки. На рисунку 1.10 показаний приклад такої структури.

Як видно з наведеного вище малюнка, завдяки цій зміні та реалізації блок-схеми завдання безпосереднього керування та взаємодії з шасі частково лягає на проміжний мікроконтролер, що може зменшити навантаження на основний мікроконтролер системи керування.

навантаження, забезпечуючи безпечну та стабільну роботу двигуна. Розглянуто типові рішення реалізації плавного пуску на аналоговій базі, зокрема за допомогою транзисторів, таймерів та RC-ланцюгів. Аналіз показав, що мікроконтролерні системи мають перевагу завдяки гнучкості, масштабованості та адаптивності до зовнішніх умов. Особливу увагу приділено використанню ШІМ для керування пуском двигуна, що дозволяє забезпечити точне регулювання рівня напруги. Описано практичні приклади застосування таких пристроїв у промислових і побутових системах: насосах, конвеєрах, мобільних платформах. Наведено структуру типового автономного транспортного робота, в якому пристрої плавного пуску інтегровані до системи керування. Запропонована структура управління з використанням кількох мікроконтролерів дозволяє знизити навантаження на головний контролер і підвищити надійність системи. Загалом, результати розділу свідчать про доцільність впровадження мікроконтролерних пристроїв плавного пуску в робототехнічні й автоматизовані системи.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	15
		№ докум.	Підпис			

2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ М'ЯКОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Ходова частина роботів

Роботи AGV зазвичай оснащені двигунами постійного струму та іноді містять вбудовані кодери для обчислення та передачі інформації про шлях руху. Найбільш поширеними типами двигунів, які використовуються в транспортних додатках, є редукторні двигуни постійного струму та безщіткові (без колекторів) двигуни постійного струму. Ці типи двигунів вибираються на основі їх впливу на гнучкість і точність рухів AGV.

Розглянемо як приклад безщітковий двигун постійного струму та детальніше розглянемо переваги та принципи роботи цього типу двигуна. Безщітковий або безщітковий двигун, як і будь-який двигун постійного струму, є силовим пристроєм, призначеним для роботи від постійної напруги від мережі [16]. Конструктивно пристрій схоже на двигун з постійними магнітами, за винятком того, що у нього відсутні щітки. Принцип роботи аналізованого двигуна заснований на частотному регулюванні та самосинхронізації. У запропонованій конструкції вектор поля статора керується відносно ротора [16]. На рисунку 2.1 показано принципову діаграму та порівняння щіткового та безщіткового двигунів.

Більшість безщіткових двигунів постійного струму є трифазними, тому на статорі можна спостерігати трифазні обмотки. Постійні магніти встановлені на роторі двигуна, який може мати одну або навіть кілька пар полюсів. Коли до обмоток статора двигуна подається трифазна система напруги, обмотки створюють обертове магнітне поле. Створене магнітне поле взаємодіє з постійними магнітами, встановленими на роторі, змушуючи їх рухатися [17]. При обертанні ротора вектор його магнітного поля обертається вздовж напрямку магнітного поля статора, як показано на рисунку 2.2.

Тип приводу самого транспортного робота можна розділити на одноколісний, диференціальний і всенаправлений. Він бере на себе функцію керування, тоді як інші колеса закріплені та приводяться в рух провідними колесами, як показано на рисунку 2.6.

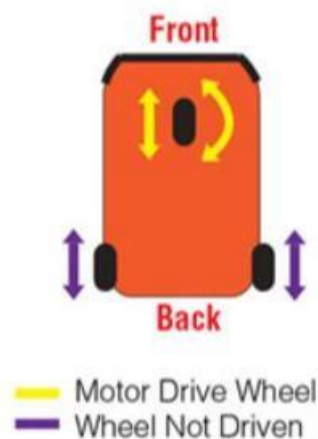


Рисунок 2.6 - Одноколісний тип приводу

Диференціальний привід відрізняється від приводу на одне колесо тим, що він використовує два провідні колеса та використовує різницю в швидкості обертання для досягнення повороту, як показано на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 - Диференціальний тип приводу

Найбільш універсальним і досконалим з представлених видів актуаторів є всенаправлені актуатори. Цей режим водіння є більш гнучким у роботі та

дозволяє AGV рухатися в будь-якому напрямку без повороту, як показано на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 - Всеспрямований привід

2.3 Активне використання безколекторних двигунів

В останній частині огляду шасі автономної мобільної транспортної платформи ми узагальнимо фактори, які зумовлюють активне використання безщіткових двигунів у цій конструкції.

Усі системи справжнього робота AGV живляться від батарей постійного струму 24 або 48 В і можуть легко керуватися безщітковими двигунами постійного струму. Високі робочі температури надзвичайно помітні для всіх термочутливих компонентів AGV. Безщіточні двигуни розсіюють тепло краще, ніж щіточні, оскільки обмотки розташовані поза ротором. Більш низька робоча температура безпосередньо впливає на термін служби і робочий цикл двигуна. Крім того, розробники AGV повинні приділити особливу увагу компактним розмірам безщіткових двигунів постійного струму, щоб мінімізувати займану площу та максимально використати простір, тим самим зменшивши розмір самого робота. Рисунок 2.9 наочно демонструє компактність цієї конструкції.

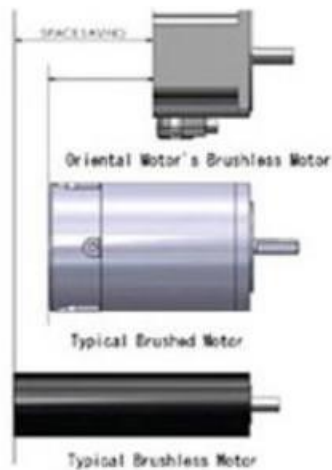


Рисунок 2.9 - Габаритні розміри моторів

Oriental Motor є прикладом виробника безщіткових двигунів постійного струму для систем AGV. Компанія є одним із лідерів галузі, що пропонує потенційним споживачам безщіткові двигуни постійного струму в унікальних і компактних корпусах. Скорочена довжина та розширений фюзеляж дозволяють розмістити більший ротор із більшою інерцією, таким чином, здатний витримувати більші навантаження [21].

Ще одна важлива перевага використання безщіткових двигунів полягає в тому, що вони не вимагають обслуговування та дуги, що значно скорочує час простою AGV. Щітки схильні до зношування під час роботи, тому їх необхідно регулярно обслуговувати та замінювати. Як було сказано раніше, безщіткові двигуни не мають щіток, що значно подовжує термін їх служби. Ця перевага дозволяє значно скоротити всі види трудових витрат, необхідних для обслуговування цього типу двигуна, тим самим скорочуючи час простою. Крім того, безщіткові двигуни створюють набагато менше індуктивного та електричного шуму завдяки використанню різних драйверів і контролерів для перемикання обмоток статора. Перешкоди, які негативно впливають на інші схеми обладнання.

Крім того, до переваг безщіткових двигунів постійного струму можна віднести широкий діапазон робочих швидкостей і постійний крутний момент.

схемою управління на номінальну напругу 5 В. В якості навантаження для пристрою плавного пуску рекомендується використовувати двигун постійного струму з номінальною напругою якоря (живлення) від 3 до 24 В.

Після аналізу існуючих рішень на ринку було запропоновано, що в рамках заключної кваліфікаційної роботи необхідно розробити пристрій, який поєднує пристрій плавного пуску з регулюванням швидкості з контролером для узгодження напруги живлення та логічних рівнів напруги та правильного керування двигуном постійного струму.

В якості навантаження системи керування та системи узгодження рівня обрано безщітковий двигун постійного струму A2212/13T з напругою живлення 12В, як показано на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 - Двигун A2212/13T

Вибраний двигун не має вбудованих датчиків Холла для визначення положення ротора, і комутація обмотки його статора буде здійснюватися на основі генерованої в ньому зворотної ЕРС. Головною перевагою бездатчикового керування двигуном є менша вартість системи. На рисунку

2.12 наведено деякі інші технічні характеристики двигуна, заявлені виробником [22].

Безщітковий двигун із зовнішнім ротором XXD A2212 1000 кВ: КВ: 1000
Максимум. ККД: 80%
Максимум. Струм ефективності: 4-10А (>75%)
Поточна Місткість: 12А/60 с
Струм холостого ходу @ 10 В: 0,5 А
Кількість осередків: 2-3 Li-Poly
Розмір двигуна: 27,5*27 мм/1,1*1,1 дюйма
Діаметр валу: 3,17 мм/0,1 дюйми
Вага: 48 г/1,7 унції

Рисунок 2.12 - Характеристики A2212/13T

Загальні характеристики системи що розробляється:

– розроблена система має бути гнучкою і може бути реалізована в прототипі автономного мобільного транспортного робота та, з відповідними вдосконаленнями, інтегрована в реальну операційну систему.

– при виборі мікроконтролера для системи управління перевага віддається пристроям архітектури AVR з існуючими і зручними системами розробки і програмування, оскільки вони є найбільш доступними, потужними і простими у використанні.

– під час аналізу ринку готових рішень і вхідних даних було сформовано перелік завдань, вирішення яких дозволить досягти поставлених цілей:

– - розробка конструкції пристрою для досягнення плавного пуску двигуна;

– - підібрати необхідну компонентну базу;

– - розробка та впровадження електричних з'єднань обладнання;

– - розробка та впровадження засобів електронного зв'язку в пристрої.

2.4 Апаратне забезпечення пристрою м'якого пуску електродвигуна

На цьому етапі випускної кваліфікаційної роботи розробляються та вибираються апаратні складові комплексного рішення завдання, вибирається апаратура керування, розробляються та демонструються всі необхідні схемні рішення.

Деякі з найважливіших критеріїв, яких необхідно дотримуватися при проектуванні системи керування машиною:

- мати достатню обчислювальну потужність і технічні характеристики для керування конкретним обладнанням;
- низька вартість компонентів;
- гнучкість, відкритість і доступність засобів розробки системи управління та програмування.

За вищезазначеними критеріями не можна не розглянути апаратну платформу, яку надає Arduino. Ця платформа є одним із найбільш використовуваних інструментів для проектування електронних пристроїв у різних сферах, аж до реалізації реальних пристроїв автоматизації та прототипів різноманітних розробок.

Апаратна платформа Arduino пропонує потенційним користувачам широкий спектр можливостей в області прийому, обробки та управління сигналами від широкого спектру зовнішніх пристроїв. Крім того, Arduino має легкодоступне та просте середовище програмування та може доповнюватися бібліотеками для різних пристроїв, у тому числі на основі мови C++.

Насправді на ринку існує велика кількість типів апаратних платформ Arduino з різними зовнішніми розмірами та робочими технологічними характеристиками [23].

При аналізі поточного ринку апаратних платформ плата розробки Arduino UNO була обрана з урахуванням цінових показників і технічних

Параметр	Значення
Тип процесора	8-бітний AVR
Флеш-пам'ять	32 КБ
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Кількість контактів	28 або 32 контакти:
Максимальна робоча частота	20 МГц
Зовнішні переривання	2
Інтерфейс USB	-

Рисунок 2.15 - Характеристики ATmega 328P

2.5 Компонентна база пристрої м'якого пуску електродвигуна

Слід зазначити, що обрана апаратна платформа є пристроєм керування, який використовує джерело живлення постійної напруги 5 В і може отримувати й обробляти лише сигнали в діапазоні 0~5 В. Крім того, Arduino не може перемикає потужне навантаження, наприклад двигуни, без використання сторонніх пристроїв. Однак для пристрою, що розробляється, потрібно було комутувати потужні навантаження, а напруга живлення становила стандартне для цієї платформи 12 В [26].

Для ізоляції системи управління з циркулюючою напругою 5 В і силової частини з напругою 12 В в систему повинна бути введена гальванічна розв'язка, реалізована за допомогою оптронів або за допомогою електронного ключа з урахуванням транзисторів. На рисунку 2.16 наведено приклади схемних реалізацій зв'язків транзисторів на польових транзисторах і біполярних транзисторах.

Під час підключення силового транзистора MOSFET до апаратної платформи Arduino ми можемо зіткнутися з проблемами, коли транзистор не вмикається повністю. Схема з мікроконтролером (у нашому випадку система управління) здатна генерувати на одній зі своїх ліній сигнал ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) в діапазоні від 0 до 5 В постійного струму. Розробіть загальне схемне рішення, яке зводить цю шкідливу ймовірність до нуля та гарантує, що більш потужні транзистори можна буде додати до схеми пізніше для керування інШІМи навантаженнями.

Тому між системою керування та блоком живлення має бути включений спеціальний інтерфейс для забезпечення координації та контролю. Як такий інтерфейс можна використовувати драйвер затвора. (рисунок 2.18).

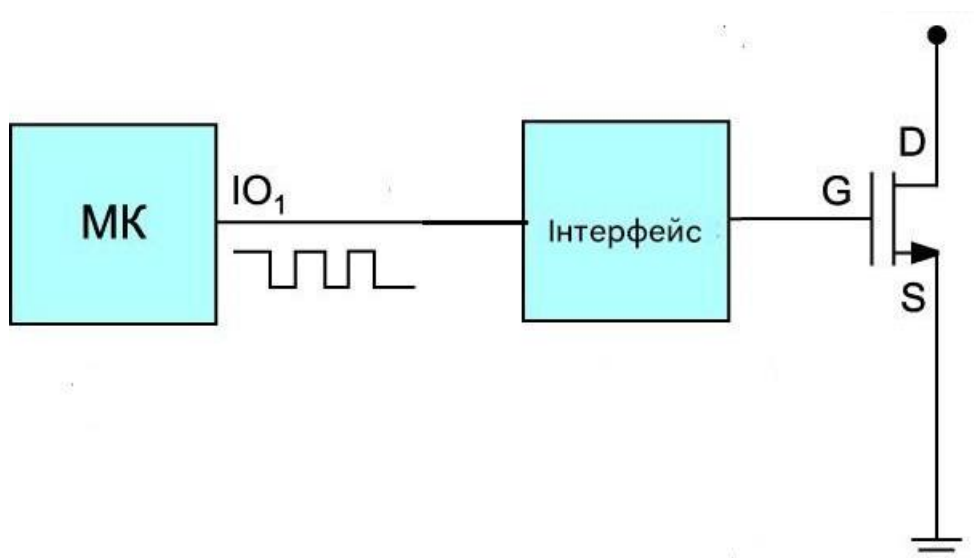


Рисунок 2.18 - Структурна схема зв'язку контролера з транзистором

У нашому випадку впровадження проміжного інтерфейсу забезпечить більш зручне і коректне управління силовими електронними ключами, крім забезпечення надійної роботи транзисторів шляхом додаткових модифікацій перед переходом на більш потужні транзистори. В якості такого інтерфейсу можна використовувати драйвер воріт IR2104 (драйвер верхнього і нижнього

польового транзистора і коректного управління напівпровідниковим приладом, і фактично виконує роль схеми перетворення рівня напруги. Однак варто пам'ятати, що в МОП-транзисторах є таке поняття, як ємність затвора, яка не дозволяє напрузі змінюватися миттєво. Іншими словами, МОП-транзистори мають ненульовий кінцевий інтервал перемикавання.

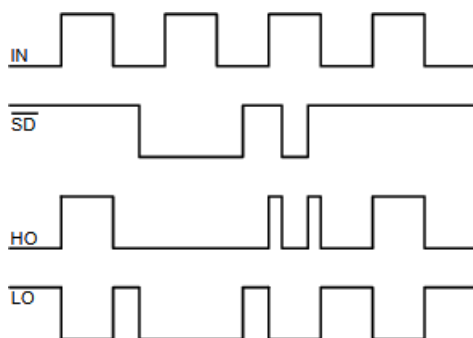


Рисунок 2.21 - Часова діаграма вхідних і вихідних сигналів

Коли пристрій перемикається, через нього протікає значний струм і прикладається значна напруга, що призводить до додаткового розсіювання потужності, яка виділяється у вигляді тепла. З цією метою слід докласти зусиль, щоб мінімізувати час перемикавання стану. Щоб виконати цю умову, необхідно забезпечити вищий перехідний струм (перехідний процес), що зменшить час зарядки та розрядки ємності затвора. IR2104 здатний забезпечувати вищі струми на затворі керованого транзистора протягом більш тривалих періодів часу, що зменшує час перемикавання та втрати потужності [29].

Вхідні і вихідні струми на вхідних і вихідних каналах мікроконтролера зазвичай не перевищують десятків міліампер. На рисунку 2.22 показана діаграма форми хвилі перехідного процесу транзистора MOSFET, керованого безпосередньо мікроконтролером під час увімкнення.

Як видно з наведеного вище рисунка, інтервали перемикавання транзистора досить великі, оскільки в даному випадку транзистор управляється сигналом, що надходить безпосередньо з виводу

У таблиці 2.1 наведено деякі технічні характеристики наведених вище перетворювачів, заявлені виробником.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			37

Таблиця 2.1 - Основні характеристики перетворювачів напруги

Тип мікросхеми	LM2596
Вхідна напруга	Від 4 до 35 В
Вихідне напруга	Від 1,23 до 30 В
Максимальний вихідний струм	3 А
ККД перетворення	92%
Частота перемикання	150 кГц
Пульсація на виході	Менш 30 мВ
Діапазон робочої температури	Від -45 до + 85 °С
Габаритні розміри	43 x 21 x 12 мм

На рисунку 2.25 показана електрична схема аналізованого понижувального перетворювача.

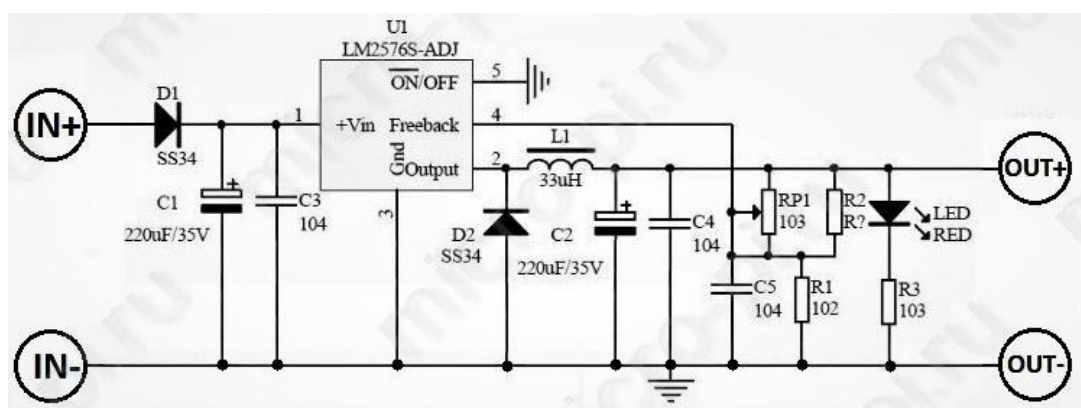


Рисунок 2.25 - Схема електрична принципова перетворювача

Як другий варіант схемного рішення, спрямованого на зниження основної напруги, розглянемо резисторний подільник. Такі перетворювачі напруги є недорогими у реалізації та допомагають заощадити доступний простір, тим самим зменшуючи загальний розмір пристрою, що розробляється. Тому для реалізації проекту в рамках випускної кваліфікаційної роботи було вирішено використати резисторний дільник.

урахуванням умов експлуатації, енергоспоживання, доступності компонентів та простоти інтеграції. Оскільки система повинна забезпечити стабільну та надійну роботу при запуску електродвигуна без датчиків Холла, вирішальним чинником стало використання комбінації доступної платформи Arduino UNO з потужними елементами силової частини, такими як MOSFET-транзистори, драйвери IR2104 та компаратори LM339.

Особливо важливо було впровадження гальванічної розв'язки між високовольтною силовою частиною та низьковольтною логікою Arduino. У схемі були використані транзисторні ключі, що забезпечують комутацію сигналів з високою надійністю та швидкістю. Було враховано, що MOSFET-транзистори потребують підвищеної напруги на затворі для повного відкриття, тому обов'язковим елементом став драйвер IR2104, який дозволяє реалізувати керування як нижнім, так і верхнім ключем у напівмостових схемах.

Окремо було розглянуто питання живлення системи. Для забезпечення роботи логіки Arduino при наявності єдиного джерела живлення 12 В постійного струму було впроваджено перетворювач напруги DC-DC на базі мікросхеми LM2596. Це дозволяє стабілізувати напругу 5 В для мікроконтролера та супутньої периферії без застосування додаткових джерел. Як додатковий засіб для зниження напруги у вторинних вузлах системи було використано резисторний подільник.

Реалізація віртуальної нульової точки за допомогою резисторного дільника дозволила зчитувати зворотну ЕРС без необхідності в зовнішніх датчиках положення ротора, що значно спростило апаратну реалізацію та знизило вартість пристрою. Для визначення моменту комутації фаз було використано компаратори LM339, які забезпечили чітку та швидку реакцію системи на зміну напруги на обмотках двигуна.

Було проведено розрахунок параметрів транзисторів, що використовуються, з урахуванням пускових струмів, які в окремих випадках

можуть сягати 4-6 А. Вибраний транзистор 06N03LA відповідає вимогам щодо швидкості перемикання, допустимого струму та низького опору в увімкненому стані. Крім того, враховуючи теплові характеристики та імпульсні режими роботи, до силових елементів додано радіатори для відведення тепла.

У результаті реалізації розглянутої апаратної частини пристрою вдалося досягти збалансованого поєднання низької вартості, високої продуктивності, простої реалізації та масштабованості проєкту. Застосовані технічні рішення дозволяють легко адаптувати конструкцію до інших типів двигунів або розширити функціональність системи завдяки відкритій архітектурі платформи Arduino. Докладна електрична схема пристрою наведена в наступному додатку.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі було проведено глибокий аналіз компонентної бази та схемотехнічних рішень для розробки пристрою плавного пуску електродвигуна постійного струму. Розглянуто принцип роботи безщіткових двигунів, їхню конструкцію та переваги у використанні в мобільних транспортних платформах. Детально досліджено типи приводів, включаючи одноколісний, диференціальний та всеспрямований, з точки зору маневреності та адаптивності. Обґрунтовано вибір мікроконтролера ATmega328P на базі апаратної платформи Arduino UNO як керуючого елемента пристрою. Проаналізовано особливості підключення безщіткового двигуна до системи та питання узгодження логічних рівнів напруги. Визначено необхідність використання силових транзисторів MOSFET з драйвером IR2104 для ефективного комутування навантажень. Представлено варіанти зниження напруги живлення для системи керування, включаючи перетворювач DC-DC і резисторний дільник. Окреслено принципи роботи схеми з віртуальним нулем

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	42
		№ докум.	Підпис			

та застосування компараторів LM339. Визначено необхідність використання функціональних кнопок для реалізації ручного керування параметрами пристрою. Усі прийняті технічні рішення спрямовані на забезпечення стабільної, ефективної та адаптивної роботи пристрою плавного пуску електродвигуна в автономних роботизованих системах.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			43

Розуміючи ключові етапи роботи системи, необхідно визначити метод, який дозволить правильно фіксувати події переходу через нуль. Одним із найпростіших і найнадійніших способів виявлення таких подій у даній системі є використання компаратора. Компаратор — це електронний пристрій, який порівнює два вхідних сигнали різного струму та напруги на своїх вхідних клеммах і видає остаточний сигнал, що вказує на більший із порівнюваних сигналів під час обчислення співвідношення. На рисунку 3.1 показано символічне представлення компаратора.

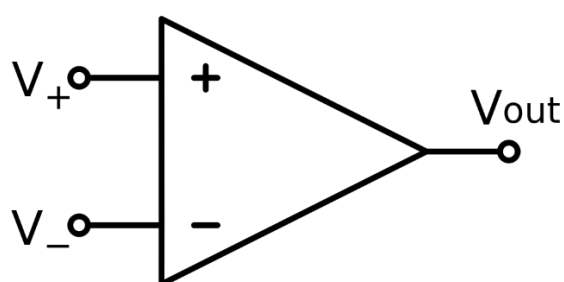


Рисунок 3.1 - Компаратор

Припустимо, що 15 В подається на неінвертуючий вхід (V_+) пристрою, а 7 В — на інвертуючий вхід (V_-). У цей час компаратор буде виводити сигнал високого рівня після завершення порівняння, інакше він генеруватиме сигнал низького рівня. Компаратори широко використовуються в аналого-цифрових перетворювачах, цифро-аналогових перетворювачах, пристроях синхронізації та контролю допусків. Одну з вхідних напруг, що подається на компаратор, часто називають пороговою або напругою порівняння.

Щоразу, коли сигнал зворотної ЕРС, створений відкритою обмоткою, перетинає нуль у позитивному напрямку, вихід компаратора перемикається з низького на високий. Коли згаданий вище сигнал зворотної електрорушійної сили перетинає нульову точку в негативному напрямку, вихідний сигнал компаратора змінюється з високого рівня на низький.

Така схема порівняння є на кожній фазі двигуна. Оскільки схема використовує компаратор LM339, вона може виводити три логічні сигнали, що

відповідають сигналу зворотної електрорушійної сили. В обмотці. Комбінація цих сигналів використовується для правильного розрахунку послідовності перемикачів. На рисунку 3.2 наочно показано взаємодію між компаратором і обмотками двигуна.

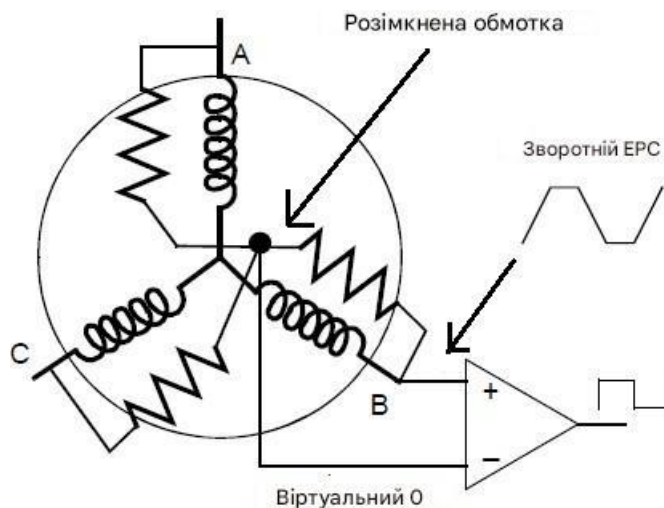


Рисунок 3.2 - Взаємодія компаратора з обмотками електродвигуна

3.2 Широтно-імпульсна модуляція

ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) — це процес керування живленням навантаження шляхом надання імпульсного сигналу для вмикання та вимикання споживача електроенергії. ШІМ-сигнал — це цифровий сигнал, який модулюється для керування потужністю, швидкістю або положенням пристрою в системі автоматизації. Аналоговий ШІМ

ШІМ-сигнал генерується аналоговим компаратором, який має опорний сигнал із значно вищою частотою, ніж модулюючий сигнал у формі «трикутника» або «пилкоподібного» входу на один вхід і модулюючий безперервний аналоговий сигнал на інший вхід. Частота вихідних імпульсів ШІМ відповідає частоті зубця пилки. Протягом періоду, коли позитивний вхідний сигнал вищий за негативний вхідний сигнал, вихід дорівнює 1;

протягом іншого періоду, коли позитивний вхідний сигнал нижчий за негативний вхідний сигнал, вихід дорівнює нулю [34-36].

Цифровий ШІМ. У двійковій цифровій технології, де вихідний сигнал може приймати лише одне з двох значень, цілком природно використовувати ШІМ для наближення бажаного середнього рівня вихідного сигналу. Схема така ж проста: пилоподібний сигнал генерується N-розрядним лічильником.

Фільтрація вихідного сигналу. При необхідності форма вихідного ШІМ-сигналу і апроксимація відповідного вхідного сигналу забезпечується інтегруючим елементом, роль якого може грати інерційний стан ШІМ-керованого елемента (наприклад, печі розжарювання), або для цього використовується інтегруючий елемент - фільтр нижніх частот.

Перевага W&M. Залежно від типу навантаження, перемикання відбувається з високою швидкістю, так що період модулюючого сигналу значно менший, ніж інерція системи, до якої він прикладений. Частота перемикання може бути:

Для повільного процесу (наприклад, електрична плита), кілька разів на хвилину; для електричного світла 100 Гц;

Для двигунів або частоти, що використовуються в аудіопідсилювачах і комп'ютерних блоках живлення, коливаються від десятків до сотень кГц.

Для оцінки форми ШІМ-сигналу використовується параметр шпаруватості, який розуміється як відношення тривалості провідного стану (часу «ввімкнено») до періоду прийнятого імпульсу; низька шпаруватість відповідає енергозберігаючому режиму, оскільки джерело енергії відключається на більш тривалий період часу. Коефіцієнт заповнення виражається у відсотках, де 100% відповідає увімкненому стану протягом усього циклу.

Основною перевагою ШІМ є низькі втрати енергії в електронній комутації. В основному він знаходиться у вимкненому стані, коли його опір максимальний і напруга максимальна, або в режимі насичення - коли опір

мінімальний, тобто струм максимальний і падіння напруги на ньому близьке до нуля. ШІМ також органічно поєднується з цифровою технікою, і велика кількість ШІМ-контролерів випускається у вигляді мікросхем. Типовий приклад - мікросхема UC3842...UC3844.

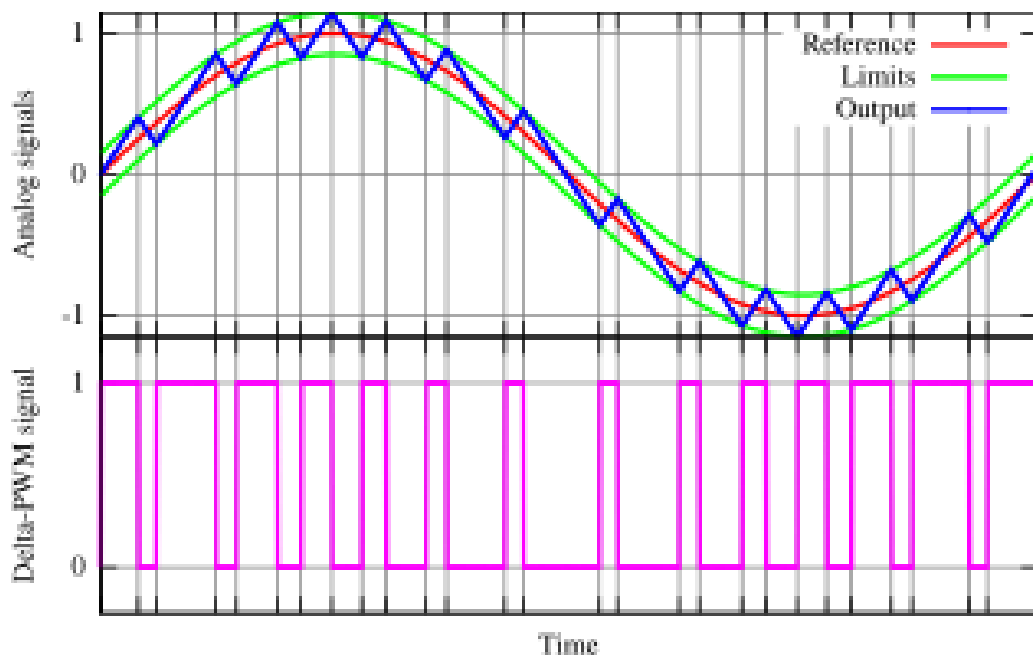
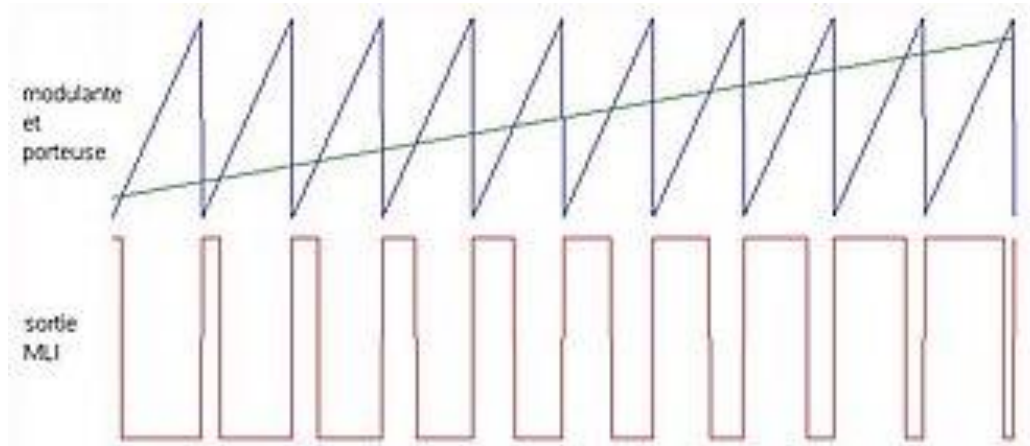
Цифрова широтно-імпульсна модуляція - це дворівнева імпульсно-кодова модуляція (ІКМ).

На рисунку 3.3 показаний приклад ШІМ. Функція ШІМ полягає в автоматичному регулюванні напруги, що подається на навантаження, залежно від режиму роботи та налаштувань генерації імпульсів, усуваючи необхідність вручну змінювати це значення або впроваджувати схемні рішення сторонніх виробників.

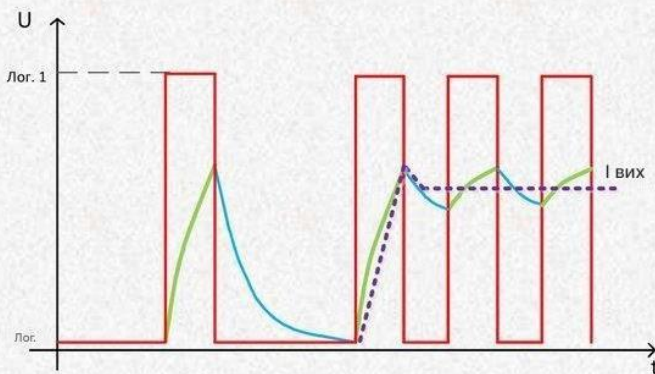
Шляхом налаштування таких параметрів, як частота, амплітуда та тривалість імпульсу, вихідна напруга системи, що подається на навантаження, може бути налаштована та відрегульована відповідно до будь-яких вимог системи автоматизації.

Широтно-імпульсна модуляція може бути реалізована за допомогою аналогових або цифрових систем керування. При використанні цифрових систем управління потрібні спеціалізовані програмні алгоритми для генерації необхідних сигналів, тоді як в аналогових системах аналогічні сигнали створюються апаратними компонентами, що робить такі системи набагато менш практичними та гнучкими. У сферах робототехніки та промислової електроніки часто потрібне плавне керування будь-яким процесом. Що стосується теми нашої випускної кваліфікаційної роботи, то таким процесом є плавний пуск і зупинка двигуна постійного струму.

Система керування — це мікроконтролер AVR, який не може генерувати достатньо аналогових сигналів для виконання завдань керування двигуном. Однак, правильно налаштувавши генерацію ШІМ-сигналу на керуючих виводах мікроконтролера, можна забезпечити плавний запуск і подальшу зупинку керованого об'єкта.



Широтно імпульсна модуляція (ШІМ)



Використовується для формування постійного рівня сигналу U в вих. діапазоні рівня балка. 1

Основні параметри

- частота сигналу f (період T)
- Добре Q
- τ - постійна часу

Що вище, то точніше вихідний сигнал

Рисунок 3.3 - Широтно-імпульсна модуляція

		№ докум.	Підпис	

Відповідні налаштування генерації ШІМ вводяться в розроблений програмний код, як показано в додатку А.

На рисунку 3.4 наведено алгоритм реалізації керування плавним пуском двигуна постійного струму за допомогою ШІМ.

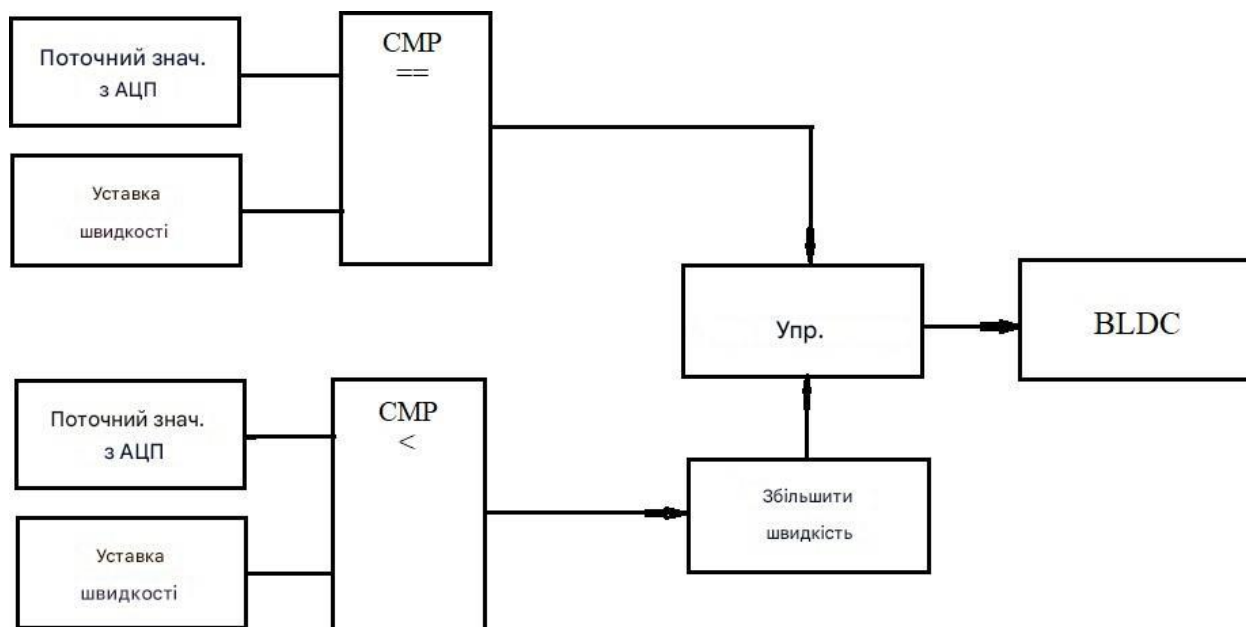


Рисунок 3.4 - Алгоритм управління і плавного пуску BLDC

У розробленому ШІМ-алгоритмі керування система керування порівнює поточне значення частоти обертання двигуна з нормативним значенням, зазначеним у програмному коді. Оператор може змінити задане значення за допомогою функціональних кнопок на пристрої плавного пуску. Поки частота обертання двигуна не досягне заданого значення, система управління буде плавно збільшувати керуючий вплив кроками, що відповідають 10% заповнення сигналу ШІМ кожні 100 мілісекунд. Отже, якщо для параметра Engine Run вибрано значення 255, система перейде в цей робочий режим приблизно через 2,5 секунди після запуску [37-40].

3.3 Розробка керуючої програми

Розробка програмного забезпечення пристрою плавного пуску двигуна постійного струму здійснювалася за допомогою програмування Arduino IDE [27]. Інтегроване середовище розробки Arduino, або програмне забезпечення Arduino (IDE), складається з текстового редактора для написання коду, області повідомлень, текстової консолі, панелі інструментів із кнопками для загальних функцій і ряду меню. Він підключається до апаратного забезпечення Arduino для завантаження програм і обміну даними з ним.

Робоче середовище програми показано на рисунку 3.5.

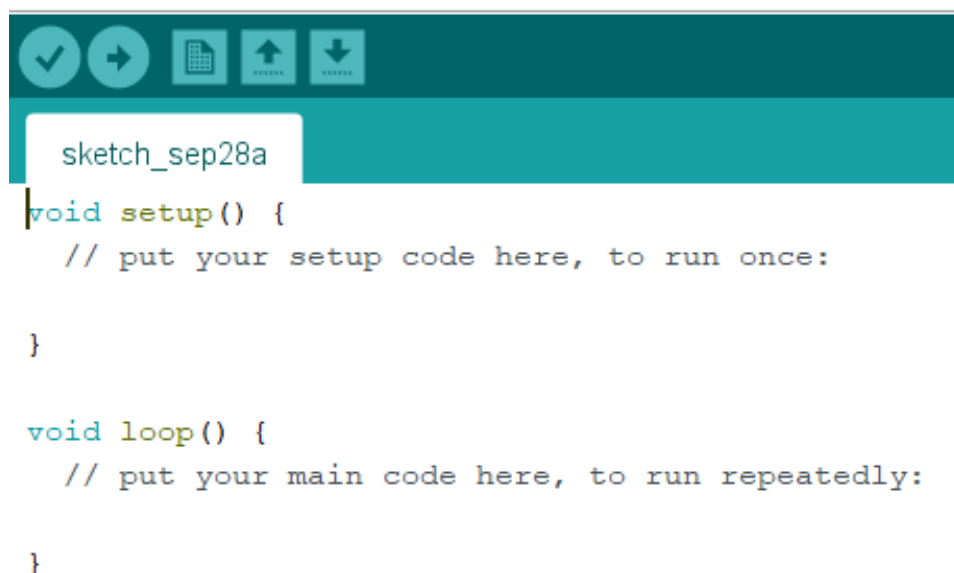


Рисунок 3.5 - Робоче середовище Arduino IDE

Програми, написані за допомогою програмного забезпечення Arduino (IDE), називаються ескізами. Ці ескізи написані в текстовому редакторі та збережені з розширенням файлу .ino. Редактор має можливості вирізання/вставлення та пошуку/заміни тексту. Область повідомлень забезпечує зворотній зв'язок під час процесу збереження та експорту та відображає помилки. Консоль відображає текстовий вихід із програмного забезпечення Arduino (IDE), включаючи повні повідомлення про помилки та

іншу інформацію. Налаштована плата та послідовний порт відображаються в нижньому правому куті вікна. Кнопки на панелі інструментів дозволяють тестувати та завантажувати програми, створювати, відкривати та зберігати ескізи, а також відкривати серійний монітор.

Варто зазначити, що використання стандартних функцій Arduino для обробки та передачі інформації неминуче призводить до багаторазового збільшення часу виконання операцій, що призводить до збільшення загального циклу виконання програми, що в деяких випадках може бути критичним [35]. Однак при роботі на цій апаратній платформі можна використовувати такі методи, як прямий доступ до регістрів, що значно скоротить цикл виконання програми. Таким чином, якщо ми хочемо отримати доступ до виводу 13 на платі Arduino UNO, ми матимемо прямий доступ до регістра PB5 мікроконтролера ATmega 328P, як показано на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 - Набір регістрів мікроконтролера ATmega 328P

Інтегроване середовище розробки Arduino, або програмне забезпечення Arduino (IDE), складається з текстового редактора для написання коду, області повідомлень, текстової консолі, панелі інструментів із кнопками для загальних функцій і ряду меню. Він підключається до апаратного забезпечення Arduino для завантаження програм і обміну даними з ним.

Мікроконтролер або однокристальний мікрокомп'ютер — комп'ютер спеціального призначення, виконаний у вигляді мікросхеми, що включає мікропроцесор, оперативну та енергонезалежну пам'ять (для зберігання виконуваного програмного коду та даних), порти введення/виведення, а також блоки зі спеціальними функціями (лічильники, компаратори, АЦП тощо).

Використовується для керування електронним обладнанням. По суті, це однокристальний комп'ютер, здатний виконувати прості завдання. Використання одного чіпа може значно зменшити розмір, енергоспоживання та вартість пристроїв на основі мікроконтролерів.

Мікроконтролери є в багатьох сучасних пристроях, таких як телефони та пральні машини. Вони відповідають за роботу двигунів і гальмівних систем сучасних автомобілів і використовуються для створення систем управління і систем збору інформації. Мікроконтролери використовуються для проектування та створення вимірювальних пристроїв, об'єктів і систем керування процесами і є основою для систем безпеки та протипожежного захисту, домофонів, сирен тощо. Більшість процесорів, що випускаються у світі, є мікроконтролерами.

Розробляючи мікроконтролер, потрібно збалансувати розмір і вартість із гнучкістю та продуктивністю. Оптимальні співвідношення цих та інших параметрів можуть істотно відрізнятися для різних виробів. У зв'язку з цим існує багато різних типів мікроконтролерів, які відрізняються архітектурою процесорного модуля, розміром і типом вбудованої пам'яті, набором периферійних пристроїв, типом корпусу.

Хоча 8-розрядні процесори загального призначення були замінені більш потужними моделями, 8-розрядні мікроконтролери все ще широко використовуються. Це пояснюється тим, що існує багато пристроїв, які не вимагають високої продуктивності, але важлива низька вартість. У той же час існують мікроконтролери з більш потужними обчислювальними можливостями, наприклад цифрові сигнальні процесори.

Обмеження ціни та потужності також призвели до збільшення тактової частоти контролера. Виробники прагнуть зробити свою продукцію на високому рівні, але в той же час вони також надають клієнтам вибір, випускаючи модифікації, призначені для різних частот і напруг живлення. Багато моделей мікроконтролерів використовують статичну пам'ять для оперативної пам'яті та внутрішніх регістрів. Це дозволяє контролеру працювати на нижчій частоті без втрати даних, навіть коли тактовий генератор повністю зупинено. Часто доступні додаткові режими енергозбереження, зокрема для деяких периферійних пристроїв і обчислювальних модулів.

Замість оперативної пам'яті мікроконтролер може мати окрему вбудовану пам'ять для зберігання програм і даних. Багато контролерів взагалі не мають шини для підключення до зовнішньої пам'яті. Найдешевші типи пам'яті дозволяють лише один запис. Цей тип обладнання підходить для масового виробництва без необхідності оновлення програми контролера. Інші модифікації контролера мають можливість багаторазового перезапису незалежної пам'яті. Мікроконтролери базуються на процесорах загального призначення, часто використовують гарвардську архітектуру.

У додатку А наведено текст програмного коду, розробленого в рамках випускної кваліфікаційної роботи, та надано керування пристроєм плавного пуску двигуна постійного струму без внутрішнього датчика. І налаштувати його роботу за заданим алгоритмом.

У рамках даної кваліфікаційної роботи було реалізовано керуючу програму для мікроконтролера ATmega328P, що відповідає за плавний запуск безщіткового електродвигуна постійного струму. Основна мета цієї програми — організувати коректну комутацію обмоток двигуна, забезпечити початковий пусковий момент і поступовий вихід на робочу швидкість, мінімізуючи пускові струми та зношення механічних елементів. Для досягнення цього в програмі реалізовано алгоритм зчитування зворотної ЕРС з обмоток, обробка сигналів компаратора LM339 та відповідна комутація фаз

з використанням транзисторних ключів на базі MOSFET 06N03LA. Програма враховує віртуальну нульову точку, реалізовану за допомогою резистивного дільника, що дозволяє визначити момент перетину сигналу через нуль та ініціювати фазову комутацію. Для реалізації керування транзисторними ключами застосовується сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), генерований за допомогою вбудованих таймерів мікроконтролера. Сигнали ШІМ подаються на затвори MOSFET через драйвер затвора IR2104, що дозволяє уникнути затримок та забезпечити швидкий перехід транзистора між станами включення та виключення. Програмна реалізація передбачає змінну ширину імпульсів для поступового нарощування керуючої напруги при запуску, що є ключовим моментом у досягненні ефекту м'якого пуску. Спеціальні змінні та програмні таймери контролюють динаміку зміни заповнення імпульсів, а також обробляють зворотні сигнали від компараторів. Структура програми включає ініціалізацію регістрів, встановлення режимів роботи таймерів та портів, запуск циклічного аналізу вхідних сигналів, а також логіку прийняття рішень для комутації обмоток. Оскільки система не використовує датчики Холла, для визначення положення ротора використовується принцип аналізу зворотної ЕРС. Для цього сигнали обмоток проходять через дільники та подаються на компаратор, що порівнює кожен фазу із віртуальним нулем. Після цього програма виконує перевірку черговості комутації та формує сигнали керування MOSFET транзисторами. Також реалізовано моніторинг напруги живлення і температури, які можуть бути зчитані з аналогових входів мікроконтролера для захисту системи. Особливу увагу в програмному коді приділено захисту від неправильного включення двигуна. Впроваджено логіку перевірки фазової послідовності та сигналізації про несправності через виводи індикації. Також реалізовано можливість аварійного зупинення при перевищенні заданого рівня напруги або втрати зворотного сигналу. Інтерфейс керування виведено через кнопки та потенціометри, які дозволяють вручну змінювати швидкість обертання

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	55
		№ докум.	Підпис			

двигуна. Значення з потенціометра зчитуються через АЦП мікроконтролера та перетворюються на відповідний ШІМ-сигнал. Це дозволяє в реальному часі регулювати вихідну потужність, забезпечуючи зручність керування та адаптацію до різних умов роботи. Система реалізована таким чином, щоб бути модульною, з можливістю розширення функціональності за рахунок додавання нових модулів або датчиків. Наприклад, до програми можна додати підтримку серійного моніторингу для відлагодження, або інтеграцію з бездротовими модулями (наприклад, ESP8266 або HC-05), щоб забезпечити віддалене керування. Оскільки Arduino IDE підтримує широку екосистему бібліотек, програмна частина розроблена таким чином, щоб легко інтегрувати додаткові бібліотеки без значного переписування базового коду. Таким чином, розроблений програмний код забезпечує не лише стабільну роботу пристрою м'якого пуску, а й дозволяє масштабувати систему під потреби складніших проєктів. У додатку А представлено повний програмний код з детальними коментарями, що дозволяє повторити та вдосконалити систему іншими користувачами або студентами.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було детально розглянуто систему керування пристроєм м'якого пуску двигуна постійного струму. Здійснено аналіз алгоритму комутації обмоток двигуна на основі зворотної ЕРС, що дало змогу спростити конструкцію та зменшити кількість датчиків. Запровадження концепції віртуального нуля в схемі керування дозволяє уникнути необхідності фізичного підключення нульової точки, що знижує вартість реалізації. Ефективність виявлення моментів переходу через нуль забезпечується за допомогою компараторів, зокрема LM339, що дає можливість точно визначати моменти перемикання фаз. Завдяки комбінації сигналів з компараторів формується правильна послідовність комутації, що

підвищує стабільність і точність роботи двигуна. Застосування широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) як методу керування дає змогу реалізувати енергоефективне регулювання швидкості обертання. Налаштування параметрів ШІМ дозволяє адаптувати керування до конкретного типу двигуна та режимів його роботи. Алгоритм реалізації плавного пуску забезпечує поступове нарощування керуючого сигналу з кроком у 10% кожні 100 мс, що забезпечує плавність переходу до робочого режиму. Програмна реалізація керування здійснюється в середовищі Arduino IDE з можливістю оптимізації виконання за рахунок прямого доступу до регістрів мікроконтролера. Загалом у розділі представлено практичне вирішення задачі плавного пуску без використання датчиків, що забезпечує універсальність і надійність системи.

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			57

ВИСНОВКИ

У ході виконання випускної кваліфікаційної роботи було досліджено комплекс питань, пов'язаних із використанням двигунів постійного струму в сучасних автономних мобільних робототехнічних системах. Робототехніка як галузь інтенсивно розвивається, забезпечуючи автоматизацію виробничих процесів, транспортних систем і побутових пристроїв. Зростання попиту на мобільні автономні платформи висуває підвищені вимоги до ефективності, точності та надійності електромеханічних вузлів, зокрема приводів, побудованих на базі двигунів постійного струму.

У роботі проаналізовано переваги та недоліки типових рішень з керування пуском двигунів постійного струму. Було виявлено, що значні пускові струми та супутні динамічні перевантаження істотно знижують термін служби приводу і можуть спричиняти небажані механічні впливи на конструкцію роботизованого пристрою. З метою усунення цих недоліків було запропоновано та реалізовано програмно-апаратний комплекс плавного пуску, побудований на базі мікроконтролера.

Під час розробки було обґрунтовано вибір елементної бази, що відповідає критеріям надійності, низького енергоспоживання та можливості роботи в режимі реального часу. Розроблене програмне забезпечення реалізує алгоритми плавного нарощування напруги на двигуні, контролює параметри струму та швидкості, а також забезпечує захист у разі перевантаження чи короткого замикання. Мікроконтролерна частина взаємодіє з силовим модулем через інтерфейс керування широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), що дає змогу точно дозувати потужність на двигун.

Моделювання та експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованого рішення. У порівнянні зі стандартними методами керування було зафіксовано зниження пікових струмів під час пуску на 35–60 %, покращення плавності старту та стабілізацію швидкісних режимів

					КвРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	58
		№ докум.	Підпис			

роботи двигуна. Таким чином, досягнуто зменшення механічного зношування та підвищено загальний ресурс двигуна. Крім того, розроблений комплекс має модульну архітектуру, що дозволяє адаптувати його до різних типів двигунів і масштабувати систему під потреби різноманітних мобільних платформ.

У підсумку, результати, отримані в межах дослідження, підтверджують доцільність впровадження програмно-апаратного комплексу плавного пуску у сфері робототехніки. Це дозволяє значно підвищити експлуатаційні характеристики автономних роботизованих систем, зменшити кількість аварійних ситуацій і знизити витрати на технічне обслуговування. Запропоноване рішення має перспективу подальшого вдосконалення шляхом інтеграції функцій дистанційного моніторингу, самодіагностики та адаптивного керування на базі елементів штучного інтелекту.

					КВРАКІТ.2022128.01.13 ПЗ	
		№ докум.	Підпис			59

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Arduino Based Automated Vacuum Cleaner. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/365789308_Arduino_Based_Automated_Vacuum_Cleaner (дата звернення: 10.05.2025). (12 с.).
2. Low Cost Autonomous Robot Cleaner using Mapping Algorithm based on IoT. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/365778961_Low_Cost_Autonomous_Robot_Cleaner (дата звернення: 12.04.2025). (10 с.).
3. An Algorithm for Semi-Autonomous Environment Navigation with Roomba. Academia.edu. URL: <https://www.academia.edu/9753016> (дата звернення: 18.04.2025). (9 с.).
4. Design & Fabrication of a Robotic Vacuum Cleaner. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/374718539> (дата звернення: 05.03.2024). (11 с.).
5. Build your own Arduino based Smart Vacuum Cleaner Robot. CircuitDigest.com. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-based-smart-vacuum-cleaner-robot> (дата звернення: 18.03.2025). (5 с.).
6. Курдюмов В. С.. Робототехніка: навчальний посібник. Київ : Ліра-К, 2020. 208 с.
7. Bekey G. A.. Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control. Cambridge : MIT Press, 2005. 600 с.
8. Ширяєв В. М.. Роботи: теорія та практика. Харків : Факт, 2018. 312 с.
9. Siegwart R., Nourbakhsh I. R.. Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge : MIT Press, 2011. 472 с.
10. Котляр Ю. В.. Сенсорні системи робототехнічних комплексів. Львів : Новий Світ, 2019. 255 с.

11. Старовойт О. І. Основи робототехніки. Львів : Львівська політехніка, 2021. 320 с.
12. Sciavicco L., Siciliano B.. Modelling and Control of Robot Manipulators. London : Springer, 2000. 440 с.
13. Кузнецов А. П.. Мобільні роботи: Навігація та управління. Київ : Інтерсервіс, 2019. 280 с.
14. Khatib O.. Springer Handbook of Robotics. Berlin : Springer, 2016. 1610 с.
15. Федосов А. О.. Роботизовані системи. Харків : УкрНДІ, 2018. 256 с.
16. How to Make Floor Cleaning Robot Powered by Arduino. Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Arduino-Floor-Cleaning-Robot> (дата звернення: 28.01.2025). (6 с.).
17. Arduino–Vacuum-Cleaner. GitHub. URL: <https://github.com/Sdavoodi/Arduino-Vacuum-Cleaner> (дата звернення: 05.03.2025). (9 с.).
18. HC-SR04 interfacing with Arduino Nano and L298N. IJIRSET. URL: <https://ijirset.com/volume-2025/HC-SR04-Arduino-Nano-L298N.pdf> (дата звернення: 17.05.2025). (5 с.).
19. Build a smart vacuum cleaner robot based on Arduino. EEWorld.cn. URL: <https://www.eeworld.cn/arduino-vacuum-robot> (дата звернення: 10.04.2025). (7 с.).
20. Nice cleaning robot with ultrasonic navigation and Bluetooth. Arduino Forum. URL: <https://forum.arduino.cc/t/nice-cleaning-robot-with-ultrasonic-navigation> (дата звернення: 05.06.2015). (6 с.).
21. Макаров С. П.. Мікроконтролери в робототехніці. Київ : Наука і техніка, 2021. 220 с.

22. Мороз О. А.. Мікроконтролери та їх програмування. Київ : Наукова думка, 2020. 312 с.
23. Valvano J. W.. Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M. New York : CreateSpace, 2014. 512 с.
24. Петренко І. П.. ARM-мікроконтролери у вбудованих системах. Одеса : Одеський технічний університет, 2021. 270 с.
25. Mazidi M. A.. AVR Microcontroller and Embedded Systems. Upper Saddle River : Pearson, 2010. 880 с.
26. Семенов С. В.. Мікроконтролери в технічних системах. Дніпро : Університетська книга, 2017. 298 с.
27. Gans N. R., Dixon W. E.. Vision-Based Control of Mobile Robots. New York : Springer, 2008. 195 с.
28. Гребенюк С. М.. Проектування роботів на базі Arduino. Одеса : ОНПУ, 2022. 180 с.
29. Spong M. W., Hutchinson S.. Robot Modeling and Control. Hoboken : Wiley, 2020. 480 с.
30. Калюжний Р. В.. Системи автоматичного керування роботами. Дніпро : Наука і освіта, 2020. 264 с.
31. Scheduling and Motion Planning of iRobot Roomba. Jade Cheng. URL: <https://jadecheng.com/Scheduling-Motion-Planning-Roomba.pdf> (дата звернення: 08.01.2025). (14 с.).
32. Roomba algorithms and visualization. Особистий блог. URL: <https://nconnaughton.github.io/roomba-algorithms/> (дата звернення: 14.02.2016). (7 с.).
33. Simulating Coverage Path Planning with Roomba. arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2201.08900> (дата звернення: 10.01.2022). (12 с.).

34. Simultaneous localization and mapping (SLAM). Wikipedia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping (дата звернення: 02.04.2025). (8 с.).

35. Real-time 3D Human Tracking for Mobile Robots with Multisensors. Example.com. URL: https://example.com/Real-time_3D_Human_Tracking.pdf (дата звернення: 05.09.2017). (11 с.).

36. Russell S., Norvig P.. Artificial Intelligence: A Modern Approach. London : Pearson, 2021. 1152 с.

37. Смаль О. В.. Програмування мікроконтролерів AVR. Київ : Кондор, 2020. 340 с.

38. Thrun S., Burgard W., Fox D.. Probabilistic Robotics. Cambridge : MIT Press, 2006. 668 с.

39. Мельник Ю. І. Алгоритми автономних роботів. Харків : ХНУРЕ, 2022. 228 с.

40. LaValle S. M.. Planning Algorithms. New York : Cambridge University Press, 2006. 826 с.

ДОДАТОК А

Програмний код системи управління

```
#define PWM_MAX_DUTY 255// Максимальне значення ШІМ #define
PWM_MIN_DUTY 0 // Мінімальне значення ШІМ #define PWM_WORK_DUTY 191 // Робоче
значення ШІМ #define SPEED_UP A1 // Збільшення швидкості обертання
#define SPEED_DOWN A2 // Зменшення швидкості обертання byte bldc_step=0,
motor_speed, pin_state;
void setup()
{
  DDRD |= 0xE0; // Встановлення режиму роботи порту як вихід для 5-7 PORTD = 0x00;
  DDRB |= 0x0E; // Встановлення режиму роботи порту як вхід для 9-11 PORTB = 0x31;
  // Налаштування таймера 1 TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0x01;
  // Налаштування таймера 2 TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 0x01;
  // Конфігурація модуля АЦП
  ADMUX = 0x60; // Конфігурувати модуль АЦП і вибрати канал 0
  ADCSRA = 0x84; // Увімкнути модуль АЦП з дільником 16, тактова частота роботи
1 МГц

  PCICR = EIMSK = 0; // Вимкнення всіх зовнішніх переривань
  // Налаштування входів pinMode(2, INPUT_PULLUP); pinMode(3, INPUT_PULLUP);
pinMode(4, INPUT_PULLUP);
}

// ISR переривання зміни висновку 2, встановлення лічильника циклу компаратора ISR
(PCINT2_vect)
{
  if( (PIND & PCMSK2) != pin_state ) return;
  // BEMF debounce for(byte i = 0; i < 20; i++)
  {
    if(bldc_step & 1) {
      if(PIND & PCMSK2) i -= 1;
    }
    else {
```

```

if(!(PIND & PCMSK2) )i -= 1;
}
}

bldc_move(); bldc_step++; bldc_step %= 6;
}

// Функції комутації двигуна void bldc_move()
{
switch(bldc_step)
{
case 0:// Нульовий випадок
АН_ВL();// Комутація обмотки А + живлення, В мінус
ВЕМF_С_FALLING();// Зворотна ЕРС фази С перетинає 0 негативному напрямку
break;

case 1:// Перший випадок
АН_СL();// Комутація обмотки А
ВЕМF_В_RISING();// зворотна ЕРС фази У перетинає 0 в позитивному напрямку
break;

case 2:// Другий випадок
ВН_СL();// Комутація обмотки У
ВЕМF_А_FALLING();// зворотна ЕРС фази А перетинає 0 в негативному напрямку
break;

case 3:// Третій випадок
ВН_АL();// Комутація обмотки У
ВЕМF_С_RISING();// зворотна ЕРС фази З перетинає 0 в позитивному напрямку
break;

case 4:// Четвертий випадок СН_АL();// Комутація обмотки З
ВЕМF_В_FALLING();// зворотна ЕРС фази У перетинає 0 в негативному напрямку
break;

case 5:// П'ятий випадок
СН_ВL();// Комутація обмотки З
ВЕМF_А_RISING();// зворотна ЕРС фази А перетинає 0 в позитивному напрямку
}
}

```

```

// Запуск основного тіла лічильника циклу програми void loop()
{

    SET_PWM_DUTY(PWM_START_DUTY); // Налаштування запуску PWM із робочим
циклом = PWM_START_DUTY
    int i = 5000;
    // Запуск електродвигуна while(i > 100)
    {
        delayMicroseconds(i); bldc_move(); bldc_step++; bldc_step% = 6;
        i = i - 20;
    }
    int h = 10; // Крок зміни швидкості обертання через ШІМ motor_speed =
PWM_MIN_DUTY; // Встановлення стартової швидкості
    PCICR = 4; // включити переривання від зміни висновків висновків PCINT23..16
(Arduino 0 – 7)
    while(1)
    {
        ADCSRA |= 1 << ADSC; // Початок перетворення while(ADCSRA & 0x40); //
Дочекатися завершення перетворення motor_speed = ADCH; // Читання даних АЦП (лише 8
біт)
        if(motor_speed < PWM_WORK_DUTY && motor_speed < PWM_MAX_DUTY)
motor_speed = motor_speed + h; // Зміна швидкості обертання SET_PWM_DUTY(motor_speed);
        while(!(digitalRead(SPEED_UP)) && motor_speed < PWM_MAX_DUTY) { motor_speed
++;
        SET_PWM_DUTY(motor_speed);
    } // Обробка функціональною кнопки
    while(!(digitalRead(SPEED_DOWN)) && motor_speed > PWM_MIN_DUTY) {
motor_speed--;
        SET_PWM_DUTY(motor_speed); delay(100);
    }
}
}
}
void BEMF_A_RISING()
{
    PCMSK2 = 0x04; // увімкнути переривання по виводу 2 (PCINT18) Arduino, решта
переривань відключена

```

```

pin_state = 0x04;
}
void BEMF_A_FALLING()
{
PCMSK2 = 0x04; // увімкнути переривання по виводу 2 (PCINT18) Arduino, решта
переривань відключена
pin_state = 0;
}
void BEMF_B_RISING()
{
PCMSK2 = 0x08; // увімкнути переривання по виводу 3 (PCINT19) Arduino, решта
переривань відключена
pin_state = 0x08;
}
void BEMF_B_FALLING()
{
PCMSK2 = 0x08; // увімкнути переривання по виводу 3 (PCINT19) Arduino, інші
переривання відкля
pin_state = 0;
}
void BEMF_C_RISING()
{
PCMSK2 = 0x10; // увімкнути переривання по виводу 4 (PCINT20) Arduino, решта
переривань відключена
pin_state = 0x10;
}
void BEMF_C_FALLING()
{
PCMSK2 = 0x10; // увімкнути переривання по виводу 4 (PCINT20) Arduino, решта
переривань відключена
pin_state = 0;
}
void AH_BL()
{
PORTD &= ~0xA0;
PORTD |= 0x40;

```

```

TCCR1A = 0; // увімкнути ШІМ на виводу 11 (OC2A) (виводи 9 і 10 вимкнено)
TCCR2A = 0x81;
}
void AH_CL()
{
PORTD &= ~0xC0; PORTD |= 0x20;
TCCR1A = 0; // увімкнути ШІМ на виводу 11 (OC2A) (виводи 9 і 10 вимкнено)
TCCR2A = 0x81;
}
void BH_CL()
{
PORTD &= ~0xC0; PORTD |= 0x20;
TCCR2A = 0; // Увімкнути ШІМ на виводу 10 (OC1B) (виводи 9 і 11 вимкнено)
TCCR1A = 0x21;
}
void BH_AL()
{
PORTD &= ~0x60; PORTD |= 0x80;
TCCR2A = 0; // Увімкнути ШІМ на виводу 10 (OC1B) (виводи 9 і 11 вимкнені) TCCR1A
= 0x21;
}
void CH_AL()
{
PORTD &= ~0x60; 0x80;

TCCR2A = 0;      Увімкнути ШІМ на виводу 9 (OC1A) (виводи 10 і 11 вимкнено)
TCCR1A = 0x81;
}
void CH_BL()
{
PORTD &= ~0xA0;
PORTD |= 0x40;
TCCR2A = 0; // Увімкнути ШІМ на виводу 9 (OC1A) (виводи 10 і 11 вимкнено)
TCCR1A = 0x81;
}
void SET_PWM_DUTY(byte duty)

```

```
{  
    OCR1A = duty; // Встановити робочий цикл ШІМ на виведенні 9 OCR1B = duty; //  
встановити робітник цикл ШІМ на виводу 10 OCR2A = duty; // встановити робітник цикл ШІМ  
на виводу 11  
}
```

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Педос Вадим Михайлович

Тема: Система керування електродвигуном з плавним пуском

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 63

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка програмно-апаратного комплексу для плавного пуску двигунів постійного струму на основі мікроконтролерів.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз існуючого стану питання щодо керування електродвигуном з плавним пуском. У другому розділі проведено розробку пристрою м'якого пуску електродвигуна. У третьому розділі проведено розробку програмно-апаратного забезпечення системи керування електродвигуном з плавним пуском.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо розкрито питання обґрунтування вибору технічних засобів

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (3.00/Е)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Підписано
Забігувасе

Сергій Костянтинівський,
Кафедри ТНІТ

“ 19 ” 06 2025 р.


(підпис)

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

Вадим ПЕДОС

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курс, групи АКІТс-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, 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 (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

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

02.06.2025

дата



підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Вадим ПЕДОС

Співавтор:

Назва: Педос антиплагіат

Експерт:

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 4.6%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 2

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-19 13:25:07.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2025-06-19



Доцент Микола Федула

Дата

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 2.0%

Dictionary check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 8%**

ID: 246891 Title: БКР Система керування електродвигуном з плавним пуском Added in a DB: 2025-06-19 Authors: Вадим ПЕДОС Heads: Максим ДИХА Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	55735	879	1321 (2%)	21 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Система керування електродвигуном з плавним пуском

Автор: Педос Вадим Михайлович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

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

Науковий керівник: Диха Максим Олександрович, кандидат технічних наук

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. 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 й 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 досягнені. 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, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 4,56% і адресується до 34 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи





Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН

Максим ДИХА