Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехнікі та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-22-1
Діоніс ЧЕРКЕЗОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Черкезов Діоніс Михайлович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і неодержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«29» червня 2026 р.  Діоніс ЧЕРКЕЗОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехнікі та безпекової інженерії

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
"____" _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Черкезову Діонісу Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності затверджена наказом по університету від "04" червня 2026 р. №473 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до ЕК 17 липня 2026 р.
3. Вхідні дані до роботи 3.1 Система автоматизації стабілізації швидкості мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності; 3.2 Технічні характеристики мобільної роботизованої платформи та електроприводу; 3.3 Характеристики мікроконтролера STM32; 3.4 Технічні характеристики сенсорних модулів; 3.5 Нормативно-технічна документація з автоматизації електроприводів.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі 4.1 Аналіз об'єкта та існуючих рішень стабілізації швидкості електроприводів;
4.2 Структурна та функціональна схема системи автоматизації;
4.3 Апаратна та програмна архітектура системи автоматизації;
4.4 Алгоритм функціонування та програмне забезпечення системи;
4.5 Інтерфейс оператора системи автоматизації;
4.6 Тестування та ефективність системи автоматизації;
4.7 Заходи з охорони праці;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (*.ppt) – 24 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз об'єкта та існуючих рішень		
	стабілізації швидкості електроприводів	27.04.26 – 08.05.26	виконано
2	Розроблення системи автоматизації		
	стабілізації швидкості електроприводів	09.05.26 – 29.05.26	виконано
3	Реалізація та тестування		
	системи автоматизації стабілізації		
	швидкості електроприводів	30.05.26 – 20.06.26	виконано
4	Охорона праці	21.06.26 – 30.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.07.26 – 04.07.26	виконано
6	Подання роботи на перевірку		
	Інтернет-системою StrikePlagiarism	05.07.26 – 08.07.26	виконано
7	Подання роботи на рецензію	09.07.26 – 12.07.26	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.05.26 – 16.07.26	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.07.26	виконано

Дата видачі завдання " 27 " квітня 2026 р.

Здобувач _____ Діоніс ЧЕРКЕЗОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 74 с., 8 табл., 17 рис., 5 дод., 29 джерел.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, ПІДВИЩЕНА ПРОХІДНІСТЬ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СТАБІЛІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ, РЕГУЛЯТОР, ЗБУРЕННЯ, АЛГОРИТМ.

Мета роботи – підвищення ефективності та стабільності руху мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності.

Об’єкт розробки – процес руху мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності.

Предмет розробки – система автоматизації стабілізації швидкості електроприводу мобільної роботизованої платформи.

У кваліфікаційної роботі проведено аналіз особливостей мобільних роботизованих платформ підвищеної прохідності, розглянуто електропривод як об’єкт автоматичного керування та досліджено основні фактори, що впливають на стабілізацію швидкості руху. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів керування та обґрунтовано доцільність використання ПІД-регулятора для забезпечення необхідної точності та швидкодії системи.

Розроблено структуру системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу, сформовано алгоритм її функціонування, а також розглянуто питання інформаційної взаємодії між основними елементами системи. Значну увагу приділено забезпеченню стійкості та надійності роботи системи в умовах впливу зовнішніх збурень.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 74 pp., 8 tab., 17 figs., 5 appendices, 29 sources.

AUTOMATED SYSTEM, MOBILE ROBOTIC PLATFORM, ENHANCED MANEUVERABILITY, ELECTRIC DRIVE, SPEED STABILIZATION, CONTROLLER, AGITATION, ALGORITHM.

The purpose of this work is to improve the efficiency and stability of the movement of a high-mobility robotic platform.

The object of this study is the movement process of a high-mobility robotic platform.

The subject of this study is an automated system for stabilizing the speed of the electric drive of a high-mobility robotic platform.

This thesis analyzes the characteristics of mobile robotic platforms with enhanced cross-country capability, examines the electric drive as an object of automatic control, and investigates the main factors affecting speed stabilization. A comparative analysis of existing control methods was performed, and the feasibility of using a PID controller to ensure the required accuracy and response time of the system was justified.

The structure of the automation system for stabilizing the speed of the electric drive was developed, an algorithm for its operation was formulated, and the issue of information exchange between the main elements of the system was examined. Significant attention was paid to ensuring the stability and reliability of the system's operation under the influence of external disturbances.

The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure," in particular to paragraph 9.4 "Development of high-tech engineering".

ЗМІСТ

Перелік скорочень …… 7
Вступ ……..… 8
1 Аналіз об’єкта та існуючих рішень стабілізації швидкості електроприводів ….……... 11
1.1 Особливості мобільних роботизованих платформ підвищеної прохідності …….……..……...……. 11
1.2 Електропривод як об’єкт управління ……. 14
1.3 Вплив зовнішніх та внутрішніх збурень на процес стабілізації швидкості ……... 17
1.4 Огляд існуючих систем стабілізації швидкості ……. 19
1.5 Постановка задачі на розроблення системи автоматизації ……..….. 22
1.6 Висновки до першого розділу ……. 24
2 Розроблення системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу ……. 26
2.1 Загальна структура системи автоматизації …… 26
2.2 Вибір методу стабілізації швидкості електроприводу ..……... 29
2.3 Алгоритм функціонування системи автоматизації …….……... 32
2.4 Інформаційна взаємодія елементів системи автоматизації …….……. 36
2.5 Забезпечення стійкості та надійності системи автоматизації …….…. 38
2.6 Висновки до другого розділу ……..……. 41
3 Реалізація та тестування системи автоматизації збору та передачі даних …….. 43
3.1 Апаратна реалізація системи автоматизації ……..…..… 43
3.2 Програмна реалізація системи автоматизації …… 45
3.3 Інтерфейс оператора системи автоматизації …….……. 49
3.4 Тестування функціонування системи автоматизації …….…… 55
3.5 Висновки до третього розділу ……. 62

4 Охорона праці ……..…..…… 64
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці ….…..…….. 64
4.2 Промислова безпека на робочому місці ….……..…….. 65
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні лабораторії …….……..…. 65
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення лабораторії ……. 67
4.5 Висновки до четвертого розділу ……. 68
Висновки …… 70
Перелік джерел посилання ……... 72
Додаток А Програмний код реалізації алгоритму ПІД-регулювання ……. 75
Додаток Б Програмний код формування ШІМ-сигналів …….. 77
Додаток В Програмний код роботи з енкодером та сенсорами …….….. 79
Додаток Г Програмний код обміну даними між STM32 та інтерфейсом оператора ……...…… 81
Додаток Д Програмний код інтерфейсу системи автоматизації …….…… 84
Додаток Е Демонстраційний матеріал …… 90

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МРП – мобільна роботизована платформа;

П – пропорційний;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПІ – пропорційно-інтегральний;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний;

ПК – персональний комп’ютер;

ПП – підвищена прохідність;

РС – роботизована система;

СШЕ – стабілізація швидкості електропривода;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Автоматизація та робототехніка характеризується широким впровадженням мобільних роботизованих платформ (МРП) у різні галузі діяльності, зокрема у військову сферу, рятувальні операції, логістику та промисловість. Особливе значення мають платформи підвищеної прохідності (ПП), здатні ефективно функціонувати в умовах бездоріжжя, складного рельєфу та підвищених навантажень. У таких умовах ключовим фактором ефективності роботи є забезпечення стабільного та керованого руху.

Одним із визначальних елементів МРП є електропривод, який забезпечує перетворення електричної енергії у механічний рух. Якість функціонування електроприводу безпосередньо впливає на точність підтримання швидкості, маневреність та енергоефективність платформи. Однак у реальних умовах експлуатації швидкість руху піддається впливу численних збурювальних факторів, серед яких зміна навантаження, нерівності поверхні, пробуксовка коліс, варіації коефіцієнта зчеплення та коливання напруги живлення.

Наявність таких збурень призводить до відхилення швидкості від заданого значення, що негативно впливає на якість виконання поставлених задач, знижує ефективність роботи системи та може призводити до нестабільної поведінки платформи. У зв’язку з цим виникає необхідність створення ефективних систем автоматизації, здатних забезпечити стабілізацію швидкості електроприводу в умовах дії зовнішніх збурень.

Існуючі системи управління швидкістю електроприводів, зокрема на базі П, ПІ та ПІД-регуляторів, широко застосовуються завдяки простоті реалізації та задовільним характеристикам. Проте їх використання в МРП ПП має певні обмеження, пов’язані зі змінністю параметрів об’єкта керування та непередбачуваністю зовнішніх впливів. Це обумовлює необхідність удосконалення підходів до побудови систем стабілізації швидкості з

урахуванням специфіки умов експлуатації.

Актуальність теми даної роботи полягає у необхідності підвищення ефективності та стабільності руху МРП ПП шляхом розроблення сучасних систем автоматизації, здатних компенсувати вплив збурень та забезпечувати підтримання заданих параметрів руху.

Мета роботи – підвищення ефективності та стабільності руху мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності.

Об’єкт розробки – процес руху мобільної роботизованої платформи підвищеної прохідності.

Предмет розробки – система автоматизації стабілізації швидкості електроприводу мобільної роботизованої платформи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати особливості МРП як об’єктів керування.

– дослідити електропривод як виконавчий елемент системи;

– визначити основні збурювальні фактори, що впливають на швидкість руху;

– провести аналіз існуючих методів стабілізації швидкості;

– розробити структуру системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу;

– сформувати алгоритм функціонування системи керування;

– реалізувати апаратну та програмну частини системи;

– провести експериментальну перевірку ефективності роботи системи;

У роботі отримано такі нові результати:

– удосконалено структуру системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу, що враховує вплив основних збурювальних факторів, характерних для МРП ПП;

– запропоновано алгоритм функціонування системи керування, який забезпечує підвищення стабільності швидкості за рахунок ефективної обробки сигналів сенсорів та формування керуючого впливу;

– набули подальшого розвитку підходи до реалізації систем стабілізації швидкості електроприводів МРП ПП, з урахуванням умов змінного навантаження та експлуатації в складному середовищі.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи автоматизації у МРП ПП для забезпечення стабільного руху, підвищення точності керування та зменшення впливу зовнішніх збурень.

Пояснювальну записку кваліфікаційної роботи оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1] та з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2, 3].

1 АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1.1 Особливості мобільних роботизованих платформ підвищеної прохідності

МРП ПП є важливим класом технічних систем, призначених для виконання завдань у складних умовах експлуатації, де використання людини або традиційної техніки є ускладненим або небезпечним (рис. 1.1) [4-6]. До таких умов належать пересічена місцевість, бездоріжжя, зони техногенних аварій, бойові дії, а також об’єкти з обмеженим доступом.

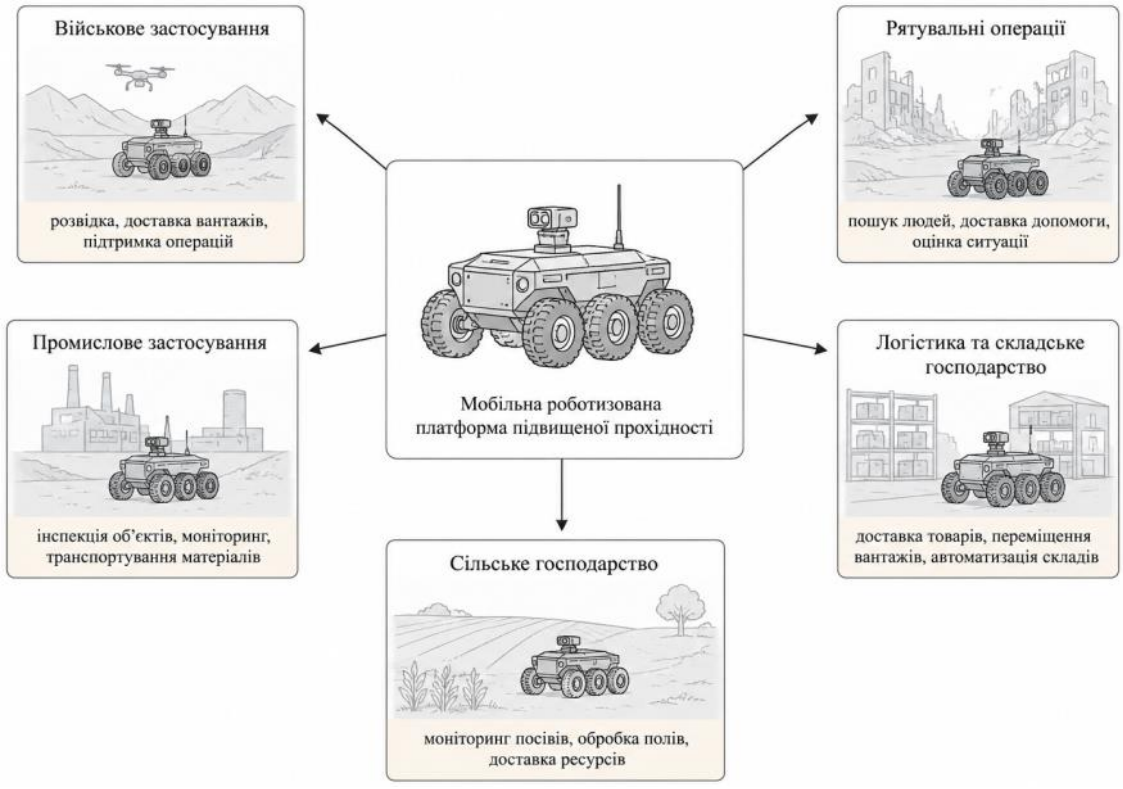


Рисунок 1.1 – Схема застосування МРП ПП

Основною відмінністю МРП ПП від стандартних транспортних систем є їх здатність зберігати функціональність та керованість у широкому

діапазоні зовнішніх впливів [7, 8]. Це досягається за рахунок спеціалізованої конструкції ходової частини, адаптивних систем керування та використання електроприводів із розширеними можливостями регулювання.

Залежно від конструктивних особливостей та принципу пересування МРП поділяються на [5, 9]:

– колісні платформи – характеризуються високою швидкістю руху, енергоефективністю та простотою конструкції. Водночас вони мають обмежену прохідність на складних поверхнях;

– гусеничні платформи – забезпечують високу прохідність та стійкість на нерівній поверхні, проте мають більші енергетичні витрати та складнішу конструкцію;

– крокуючі (ногоподібні) системи – імітують рух живих організмів та здатні долати складні перешкоди, однак характеризуються складністю реалізації та керування;

– гібридні платформи – поєднують переваги різних типів рушіїв, що дозволяє адаптуватися до змінних умов середовища.

МРП ПП працюють в умовах, що характеризуються значною невизначеністю та змінністю параметрів середовища. До основних факторів належать:

– нерівності та неоднорідність поверхні;

– наявність перешкод та перепадів висоти;

– зміна коефіцієнта зчеплення з поверхнею;

– вплив кліматичних умов (волога, пил, температура);

– зміна маси та розподілу навантаження.

Зазначені фактори безпосередньо впливають на динаміку руху платформи, викликаючи коливання швидкості та ускладнюючи процес її стабілізації.

Рух МРП є складним динамічним процесом, що залежить від взаємодії електроприводу, механічної частини та зовнішнього середовища. У процесі руху виникають такі явища:

– пробуксовка коліс або гусениць, що призводить до втрати ефективності передачі крутного моменту;

– зміна навантаження на привід, пов’язана з рельєфом місцевості;

– інерційні ефекти, що впливають на розгін та гальмування;

– коливання швидкості, викликані зовнішніми збуреннями.

У таких умовах підтримання сталої швидкості руху є складною задачею, що потребує використання систем автоматичного керування.

Електропривод є ключовим елементом МРП, який забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух [10, 11]. Його основними характеристиками є:

– здатність до регулювання швидкості у широкому діапазоні;

– висока точність керування;

– швидка реакція на зміну керуючих сигналів;

– можливість інтеграції з цифровими системами керування.

Саме електропривод визначає динамічні властивості платформи та є основним об’єктом автоматичного керування в системі стабілізації швидкості.

З урахуванням специфіки МРП ПП до систем стабілізації швидкості висуваються такі вимоги:

– забезпечення підтримання заданої швидкості руху;

– стійкість до дії зовнішніх збурень;

– швидкодія та мінімальний перехідний процес;

– надійність функціонування в складних умовах;

– енергоефективність.

МРП ПП характеризуються складними умовами експлуатації та значним впливом зовнішніх збурень на процес руху. Це обумовлює необхідність розроблення ефективних систем автоматизації стабілізації швидкості електроприводу, здатних забезпечити надійну та стабільну роботу платформи в реальних умовах.

1.2 Електропривод як об’єкт управління

Електропривод є ключовим функціональним елементом МРП, який забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух та безпосередньо визначає динамічні характеристики системи [10-12]. Саме електропривод реалізує керуючі дії, сформовані автоматизованою системою, та забезпечує рух платформи відповідно до заданих параметрів.

У контексті МРП ПП електропривод працює в умовах змінного навантаження, значних зовнішніх збурень та невизначеностей, що висуває підвищені вимоги до його характеристик і системи управління.

На рис. 1.2 наведена типова структура електроприводу МРП ПП.



Рисунок 1.2 – Структура електроприводу МРП ПП

Типова структура електроприводу МРП ПП включає такі основні елементи [11, 13]:

– джерело живлення (акумуляторна батарея або інше джерело);

– силовий перетворювач (драйвер) – забезпечує керування напругою та струмом двигуна;

– електродвигун – перетворює електричну енергію в механічну;

– механічна передача (редуктор, трансмісія);

– навантаження (колеса або гусениці платформи);

– сенсори – забезпечують зворотний зв’язок (швидкість, положення, струм).

Отже, електропривод є складною багатокомпонентною системою, що функціонує у замкненому контурі управління.

У МРП найчастіше використовуються такі типи електродвигунів [12]:

– двигуни постійного струму (DC). До переваг двигунів постійного струму можна віднести: просту конструкцію, зручність регулювання швидкості і застосування у навчальних та малих системах. До недоліків: зношування щіток.

– безщіткові двигуни (BLDC). До переваг безщіткових двигунів можна віднести: високий ККД, тривалий ресурс роботи та високу надійність. До недоліків: складна система управління.

– крокові двигуни. До переваг крокових двигунів можна віднести: високу точність позиціювання та використання у спеціалізованих задачах. До недоліків: менш ефективні для динамічного руху.

Для платформ ПП найбільш доцільним є використання BLDC або DC двигунів, які забезпечують достатній крутний момент та можливість плавного регулювання швидкості.

З точки зору теорії автоматичного управління електропривод розглядається як об’єкт управління, який характеризується:

– наявністю вхідного сигналу (керуюча напруга або ШІМ-сигнал);

– вихідного сигналу (кутова швидкість або лінійна швидкість руху);

– внутрішніх параметрів (опір, індуктивність, момент інерції);

– впливом зовнішніх збурень (навантаження, тертя).

У спрощеному вигляді зв’язок між вхідною дією та швидкістю можна описати як:

– збільшення керуючого сигналу → зростання швидкості;

– збільшення навантаження → зменшення швидкості.

Це підтверджує необхідність використання зворотного зв’язку, який дозволяє компенсувати вплив збурень [13, 15].

У реальних умовах експлуатації електропривод МРП працює в середовищі з високим рівнем невизначеності. Основні збурення це:

– зміна навантаження (підйоми, спуски, перевезення вантажу);

– зміна коефіцієнта тертя (пісок, ґрунт, сніг);

– пробуксовка коліс;

– нестабільність живлення;

– ударні навантаження.

Ці фактори викликають: коливання швидкості, запізнювання реакції системи та зниження точності управління.

Для забезпечення ефективної роботи системи стабілізації швидкості, електропривод повинен відповідати таким вимогам:

– можливість плавного регулювання швидкості;

– достатній крутний момент при низьких швидкостях;

– швидка реакція на зміну керуючого сигналу;

– стійкість до перевантажень;

– висока енергоефективність;

– сумісність із цифровими системами керування.

Зворотний зв’язок є невід’ємною складовою системи управління електроприводом. Він дозволяє:

– вимірювати поточну швидкість руху;

– порівнювати її із заданою;

– формувати коригуючий вплив;

– компенсувати вплив збурень.

Найчастіше для реалізації зворотного зв’язку використовуються: енкодери, тахогенератори і датчики струму.

Електропривод МРП є складним об’єктом автоматичного управління, робота якого визначається як внутрішніми параметрами, так і впливом зовнішніх збурень. Для забезпечення стабільності швидкості необхідно використовувати системи управління із зворотним зв’язком, здатні компенсувати вплив змінних умов експлуатації.

1.3 Вплив зовнішніх та внутрішніх збурень на процес стабілізації швидкості

Стабілізація швидкості руху МРП ПП є складною інженерною задачею, що обумовлено значним впливом зовнішніх та внутрішніх збурювальних факторів [5, 8]. На відміну від стаціонарних або добре визначених технічних систем, МРП працюють у середовищі з високим рівнем невизначеності, де параметри об’єкта управління можуть змінюватися в широких межах у процесі руху.

Збурення впливають на динамічні характеристики електроприводу та призводять до відхилення швидкості від заданого значення. Це, у свою чергу, знижує точність виконання задач, погіршує енергоефективність та може викликати нестабільність системи управління.

На рис. 1.3 наведено збурення, що впливають на процес стабілізації швидкості МРП.

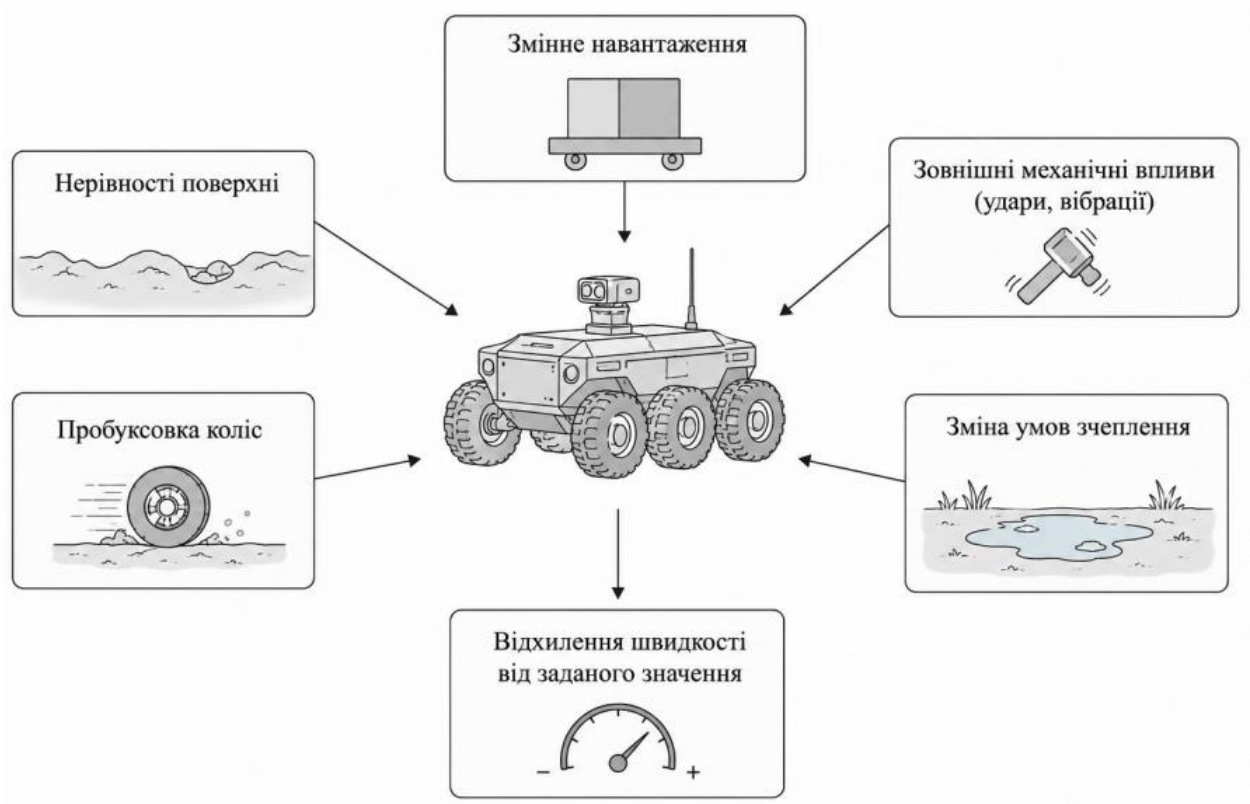


Рисунок 1.3 – Вплив збурень на швидкість руху МРП

Збурення, що впливають на процес стабілізації швидкості, доцільно поділити на такі основні групи [9, 12]:

– механічні збурення. До механічних збурень належать: зміна навантаження на платформу, наявність перешкод на шляху руху, нерівності поверхні та зміна сили тертя. Ці фактори викликають зміну моменту опору, що безпосередньо впливає на швидкість обертання двигуна.

– кінематичні збурення. До цієї групи відносяться: пробуксовка коліс або гусениць, ковзання на поверхні та втрата зчеплення. Такі явища призводять до невідповідності між швидкістю обертання двигуна та фактичною швидкістю руху платформи.

– електричні збурення. До електричних факторів належать: коливання напруги живлення, зміни струму навантаження та електромагнітні завади. Ці збурення впливають на стабільність роботи електроприводу та можуть викликати додаткові похибки керування.

– зовнішні середовищні фактори. До них відносяться: температурні зміни, вологість, пил і забруднення та погодні умови. Вони впливають як на механічні, так і на електричні характеристики системи.

Збурювальні фактори викликають ряд негативних ефектів у роботі системи стабілізації:

– відхилення швидкості від заданого значення;

– збільшення часу перехідного процесу;

– поява коливань швидкості;

– зниження точності керування;

– підвищене енергоспоживання.

Особливо небезпечними є різкі зміни навантаження, які можуть призводити до значних просідань швидкості або перевантаження електроприводу.

Однією з ключових проблем є те, що параметри об’єкта керування не є сталими. Зокрема змінюється: маса платформи, коефіцієнт тертя, ефективність передачі крутного моменту та умови зчеплення.

Це означає, що система управління повинна працювати в умовах невизначеності, що значно ускладнює процес стабілізації швидкості.

Для компенсації впливу збурень у системах електроприводу застосовується принцип зворотного зв’язку [13, 15]. Його використання дозволяє:

– оперативно визначати відхилення швидкості;

– формувати коригуючий вплив;

– забезпечувати стабілізацію режиму роботи;

– підвищувати стійкість системи.

Зворотний зв’язок реалізується за допомогою сенсорів швидкості, положення та струму, що дозволяє отримувати актуальну інформацію про стан системи.

З урахуванням дії збурювальних факторів система стабілізації повинна:

– забезпечувати швидку реакцію на зміну умов;

– мати достатній запас стійкості;

– компенсувати вплив зовнішніх факторів;

– мінімізувати похибку регулювання;

– забезпечувати надійну роботу в широкому діапазоні режимів.

МРП ПП функціонують в умовах значного впливу різноманітних збурювальних факторів, які істотно ускладнюють процес стабілізації швидкості електроприводу. Врахування цих факторів є необхідною умовою при розробленні ефективних систем автоматизації, здатних забезпечити стабільну роботу платформи в реальних умовах експлуатації.

1.4 Огляд існуючих систем стабілізації швидкості

Забезпечення стабілізації швидкості електроприводу є однією з ключових задач систем автоматичного управління МРП. Вибір методу керування суттєво впливає на точність підтримання швидкості, стійкість системи та її здатність компенсувати вплив зовнішніх збурень.

На сьогодні найбільш поширеними є класичні П-, ПІ-, ПІД-регулятори (рис. 1.4), а також сучасні підходи, зокрема нечіткі та адаптивні системи управління [14-16].

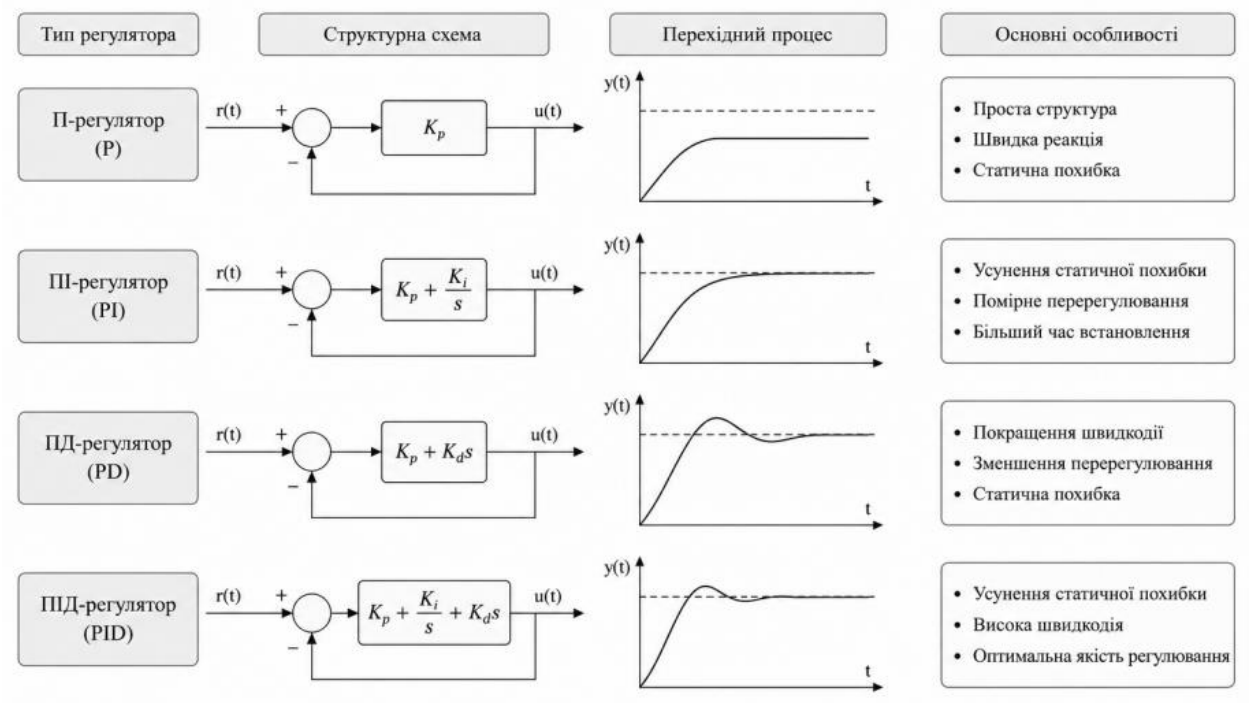


Рисунок 1.4 – Порівняльна схема регуляторів

Пропорційний (П) регулятор формує керуючий сигнал пропорційно до похибки [14, 16]. До переваг П-регуляторів можна віднести: просту структуру, висока швидкодія та легкість реалізації. До недоліків: наявність статичної похибки та недостатня точність стабілізації.

Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор доповнює пропорційний закон інтегральною складовою [14, 16]. До переваг ПІ-регуляторів можна віднести: усунення статичної похибки, підвищення точності та широке застосування у промисловості. До недоліків: збільшення часу перехідного процесу та можливі коливання при неправильному налаштуванні.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор є найбільш універсальним [14-16]. До переваг ПІД-регуляторів можна віднести: високу точність, швидку реакцію на збурення та зменшення пере регулювання. До недоліків: складність налаштування та чутливість до шумів

(диференціальна складова).

Нечіткі (Fuzzy) регулятори засновані на правилах нечіткої логіки [17]. До переваг Fuzzy-регуляторів можна віднести: не потребують точної математичної моделі та добре працюють при невизначеностях. До недоліків: складність розроблення та потреба в експертних знаннях.

Адаптивні системи управління здатні змінювати свої параметри в процесі роботи [18]. До переваг адаптивних систем управління можна віднести: високу ефективність у змінних умовах та автоматичне підлаштування. До недоліків: складність реалізації та підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів.

Порівняльний аналіз регуляторів стабілізації швидкості наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння аналіз регуляторів стабілізації швидкості

Тип регулятора	Точність	Швидкодія	Стійкість до збурень	Складність реалізації	Область застосування
П	низька	висока	низька	дуже проста	прості системи
ПІ	середня	середня	середня	проста	промислові приводи
ПІД	висока	висока	висока	середня	точні системи
Fuzzy	висока	середня	висока	висока	складні системи
Адаптивні системи	дуже висока	висока	дуже висока	дуже висока	змінні умови

З таблиці 1.1 видно, що:

– П-регулятор є найпростішим, але не забезпечує необхідної точності;

– ПІ-регулятор є компромісом між складністю та ефективністю;

– ПІД-регулятор забезпечує найкраще співвідношення якості керування та складності реалізації;

– інтелектуальні методи (Fuzzy, адаптивні) є більш ефективними, але складними для реалізації в рамках кваліфікайційної роботи.

З урахуванням умов роботи МРП ПП (наявність збурень, змінність параметрів, обмежені обчислювальні ресурси) доцільним є використання ПІД-регулятора, який забезпечує високу точність стабілізації швидкості, ефективно компенсує збурення, має прийнятну складність реалізації, а також легко інтегрується у мікроконтролерні системи.

Отже, проведений аналіз показав, що існує широкий спектр методів СШЕ, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Для МРП ПП найбільш доцільним є використання ПІД-регулятора, який забезпечує необхідну якість керування при прийнятній складності реалізації.

1.5 Постановка задачі на розроблення системи автоматизації

На основі проведеного аналізу МРП ПП, електроприводу як об’єкта управління, а також існуючих методів стабілізації швидкості встановлено, що забезпечення стабільного руху в умовах дії зовнішніх збурень є складною інженерною задачею.

Основною проблемою є необхідність підтримання заданої швидкості руху МРП при змінних умовах експлуатації, які характеризуються невизначеністю параметрів системи та впливом різноманітних збурювальних факторів.

Процес стабілізації швидкості електроприводу можна представити як задачу автоматичного управління [11, 14], в якій:

– вхідний сигнал (задання): v_{ref} – задана швидкість руху платформи;

– вихідний сигнал: v – фактична швидкість руху;

– керуючий вплив: u – сигнал керування (напруга, ШІМ);

– похибка регулювання: $e(t) = v_{ref} - v$.

Метою системи управління є мінімізація похибки ($e(t)$) у процесі роботи системи.

Система автоматизації СШЕ повинна працювати в умовах:

– змінного навантаження;

– нерівностей поверхні;

– пробуксовки та втрати зчеплення;

– коливань параметрів електроприводу;

– впливу зовнішніх середовищних факторів.

Ці умови призводять до того, що система керування повинна бути стійкою до збурень та забезпечувати надійну роботу в широкому діапазоні режимів.

Для оцінки ефективності роботи системи автоматизації використовуються такі критерії:

– точність стабілізації (мінімальна похибка);

– швидкодія (мінімальний час виходу на заданий режим);

– стійкість (відсутність коливань або їх швидке затухання);

– робастність (стійкість до зміни параметрів);

– енергоефективність.

При розробленні системи автоматизації необхідно враховувати такі обмеження:

– обмежені обчислювальні ресурси мікроконтролера;

– обмеження по енергоспоживанню;

– обмеження по вартості компонентів;

– необхідність роботи в реальному часі.

З урахуванням цього система автоматизації повинна мати просту та ефективну структуру, бути реалізованою на мікроконтролері, забезпечувати надійність роботи, а також легко налаштовуватись.

Система автоматизації СШЕ МРП (рис. 1.5) має замкнену структуру і включає блок задання швидкості, суматор (формування похибки), регулятор, електропривод і датчик швидкості (зворотний зв’язок) [10, 13].

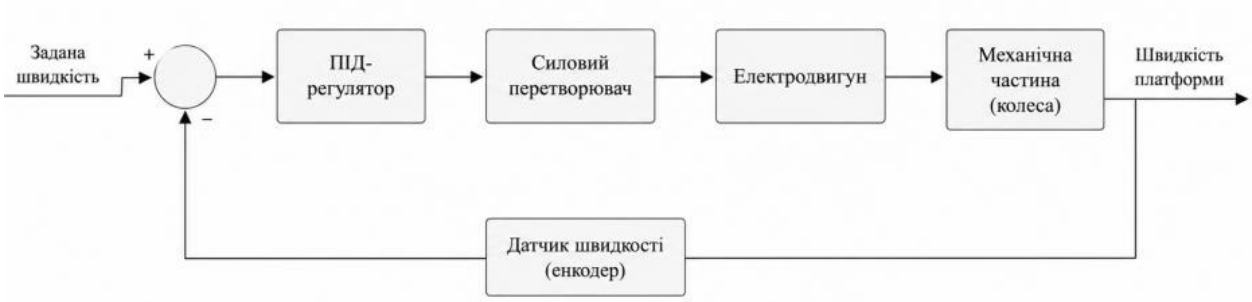


Рисунок 1.5 – Архітектура системи автоматизації СШЕ МРП ПП

У результаті виконання кваліфікаційної роботи повинно бути:

– розроблено структуру системи автоматизації;

– обґрунтовано вибір регулятора;

– сформовано алгоритм керування;

– реалізовано апаратну та програмну частини;

– підтверджено ефективність системи експериментально.

Сформульовано задачу розроблення системи автоматизації СШЕ МРП ПП, яка полягає у забезпеченні підтримання заданої швидкості руху в умовах дії зовнішніх збурень при обмежених ресурсах системи.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз МРП ПП, електроприводів як об’єктів автоматичного керування та існуючих методів стабілізації швидкості.

Встановлено, що МРП широко застосовуються у військовій, рятувальній, промисловій та логістичній сферах, де необхідне забезпечення стабільного руху в умовах складного рельєфу, змінного навантаження та впливу зовнішніх збурень. Визначено, що основними факторами, які ускладнюють процес керування швидкістю руху, є нерівності поверхні, пробуксовка коліс, зміна умов зчеплення та коливання параметрів

електроприводу.

Проаналізовано електропривод як основний виконавчий елемент платформи. Визначено його структуру, принцип роботи та особливості функціонування в умовах змінного навантаження. Показано, що електропривод є складним об’єктом автоматичного керування, робота якого значною мірою залежить від зовнішніх факторів та параметрів системи керування.

Розглянуто основні типи збурень, що впливають на стабільність швидкості руху МРП. Встановлено, що механічні, електричні та інформаційні збурення можуть призводити до відхилення швидкості від заданого значення, збільшення часу перехідного процесу та погіршення стійкості системи.

Проведено аналіз існуючих методів стабілізації швидкості, зокрема П, ПІ, ПІД, нечітких та адаптивних регуляторів. За результатами порівняння визначено, що найбільш доцільним для МРП є використання ПІД-регулятора, який забезпечує необхідну точність, швидкодію та ефективну компенсацію зовнішніх збурень при відносно простій реалізації.

У розділі також сформульовано постановку задачі розроблення системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Визначено основні вимоги до системи керування, критерії якості стабілізації та умови функціонування системи.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Загальна структура системи автоматизації

Система автоматизації СШЕ МРП ПП призначена для забезпечення підтримання заданої швидкості руху в умовах дії зовнішніх збурень та змінного навантаження. Ефективність роботи такої системи визначається узгодженою взаємодією апаратних та програмних компонентів, які формують замкнений контур керування [10, 13].

Основною задачею системи автоматизації є формування керуючого впливу на електропривод на основі інформації про поточний стан МРП та задані параметри руху.

На рисунку 2.1 наведено структурна схема системи автоматизації СШЕ МРП ПП.



Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Система автоматизації СШЕ МРП повинна виконувати такі основні функції:

– формування заданої швидкості руху;

– вимірювання параметрів руху платформи;

– обробка інформації від сенсорів;

– формування керуючих сигналів;

– компенсація впливу зовнішніх збурень;

– забезпечення стабілізації швидкості;

– контроль стану системи.

До складу системи автоматизації платформи входять такі основні елементи:

– блок задання параметрів руху – призначений для формування заданої швидкості руху МРП. Джерелом задавального сигналу може бути оператор, пульт дистанційного керування та автономний алгоритм. Основним параметром є задана швидкість руху (v_{ref});

– сенсорна система – забезпечує отримання інформації про стан платформи та параметри руху. До її складу входять: енкодери, IMU-модулі, датчики струму, датчики напруги та температурні датчики. Датчики забезпечують реалізацію зворотного зв'язку, необхідного для стабілізації швидкості [12];

– контролер системи керування – центральний елементй системи автоматизації. Він виконує прийом та обробку сигналів, обчислення похибки регулювання, реалізацію алгоритму керування, а також формування керуючих сигналів [15]. У якості контролера можуть використовуватись: STM32, ESP32, Arduino та DSP-контролери;

– регулятор швидкості – формує керуючий вплив на основі похибки $e(t)$. В роботі використовуємо ПІД-регулятор, який забезпечує високу точність, швидку реакцію на збурення, а також зменшення коливань швидкості [14-16];

– силовий перетворювач (драйвер) – забезпечує передачу енергії до електродвигуна відповідно до керуючого сигналу. До його основних функцій належать: формування ШІМ-сигналів, керування напрямком обертання, обмеження струму та захист від перевантажень;

– електропривод – виконує перетворення електричної енергії в механічний рух. До його складу входять: електродвигун, механічна передача та виконавчий механізм.

Об’єктом керування є МРП ПП, рух якої залежить від параметрів електроприводу, маси платформи, дорожніх умов та зовнішніх збурень.

Робота системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу здійснюється таким чином:

– формується задане значення швидкості;

– сенсори вимірюють фактичну швидкість руху;

– контролер визначає похибку регулювання;

– регулятор формує керуючий сигнал;

– силовий перетворювач подає сигнал на електропривод;

– електропривод забезпечує рух платформи;

– інформація про швидкість знову надходить до контролера через зворотний зв’язок.

Таким чином формується замкнена система автоматичного керування.

На відміну від стаціонарних систем, система автоматизації МРП повинна працювати в реальному часі та при обмежених енергетичних ресурсах, компенсувати вплив збурень, забезпечувати високу швидкодію, а також мати підвищену надійність.

Використання системи автоматизації СШЕ МРП ПП дозволяє:

– підвищити точність керування;

– зменшити вплив зовнішніх факторів;

– покращити плавність руху;

– підвищити енергоефективність;

– забезпечити стабільність роботи платформи.

Загальна структура системи автоматизації СШЕ МРП ПП являє собою замкнену систему керування, що включає сенсорну систему, контролер, регулятор, силовий перетворювач та електропривод. Така структура забезпечує можливість компенсації зовнішніх збурень та підтримання заданої

швидкості руху в умовах змінного навантаження.

2.2 Вибір методу стабілізації швидкості електроприводу

Одним із ключових етапів розроблення системи автоматизації СШЕ МРП ПП є вибір методу керування, який забезпечує необхідну якість регулювання в умовах дії зовнішніх збурень та змінних параметрів об’єкта керування.

Для МРП ПП система керування повинна забезпечувати:

– підтримку заданої швидкості руху;

– компенсацію впливу зовнішніх збурень;

– високу швидкодію;

– стійкість роботи;

– плавність регулювання;

– простоту практичної реалізації.

У зв’язку з цим доцільним є проведення аналізу існуючих методів стабілізації швидкості та вибору найбільш ефективного рішення для даної системи.

У сучасних системах автоматичного керування найбільш поширеними методами стабілізації швидкості є П- ПІ- ПІД-регулятори, нечіткі регулятори та адаптивні системи керування [14, 16].

Пропорційний (П) регулятор формує керуючий сигнал пропорційно до похибки:

$$U(t) = K_p e(t), \tag{2.1}$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт;

$e(t)$ – похибка системи.

До переваг П-регулятора належать: проста реалізація, висока швидкодія та невеликі обчислювальні витрати. До недоліків можна віднести: наявність статичної похибки, недостатню точність стабілізації, а також чутливість до зміни навантаження.

У системах автоматизації МРП використання лише П-регулятора не забезпечує необхідної якості керування;

Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор поєднує пропорційну та інтегральну складові:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \,, \tag{2.2}$$

де K_i – інтегральний коефіцієнт.

Інтегральна складова забезпечує усунення статичної похибки та підвищує точність стабілізації.

До переваг ПІ-регулятора належать: відсутність статичної похибки, достатня точність та простота реалізації. До недоліків можна віднести: можливість коливань, збільшення часу перехідного процесу, а також повільнішу реакцію на різкі зміни навантаження.

Пропорційно-інтегрально-діференційний (ПІД) регулятор додатково містить диференціальну складову:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \,, \tag{2.3}$$

де K_d – диференціальний коефіцієнт.

Диференціальна складова дозволяє прогнозувати зміну похибки, підвищити швидкодію, зменшити коливання та покращити реакцію на збурення.

До переваг ПІД-регулятора належать: висока точність стабілізації, швидка реакція на зміну навантаження, ефективна компенсація збурень та покращення динамічних характеристик. До недоліків можна віднести: складніше налаштування та чутливість до шумів датчиків.

Нечіткі та адаптивні регулятори забезпечують високу ефективність у складних умовах експлуатації, однак мають складну структуру, підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів та складність практичної реалізації.

Для кваліфікаціоної роботи їх використання є менш доцільним через значну складність реалізації та налаштування.

Для вибору найбільш доцільного методу стабілізації швидкості проведено порівняння основних характеристик перерахованих вище регуляторів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняння методів стабілізації швидкості

Метод керування	Точність	Швидкодія	Компенсація збурень	Складність реалізації
П	низька	висока	низька	низька
ПІ	середня	середня	середня	низька
ПІД	висока	висока	висока	середня
Fuzzy	висока	середня	висока	висока
Адаптивний	дуже висока	висока	дуже висока	дуже висока

Отже, на основі проведеного аналізу для системи стабілізації швидкості МРП ПП обрано ПІД-регулятор (рис. 2.2).

Такий вибір обумовлений тим, що ПІД-регулятор [14-16]:

– забезпечує високу точність підтримання швидкості;

– ефективно компенсує вплив зовнішніх збурень;

– має хороші динамічні характеристики;

– може бути реалізований на сучасних мікроконтролерах;

– забезпечує стабільну роботу системи при змінному навантаженні.

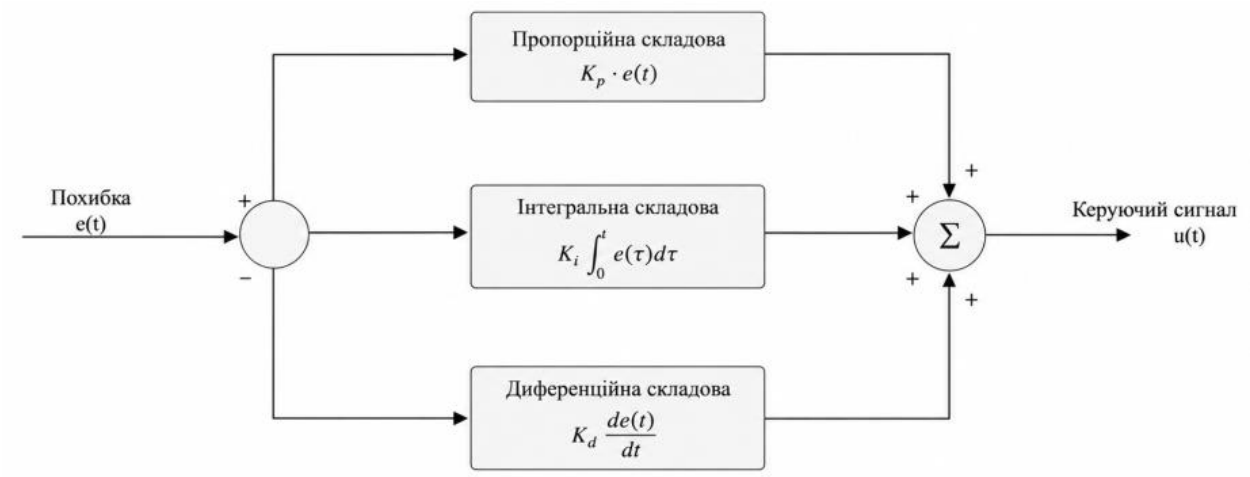


Рисунок 2.2 – Структура ПІД-регулятора

Крім того, ПІД-регулятори широко використовуються у промислових системах автоматичного керування, що підтверджує їх ефективність та надійність [17].

У автоматизованій системі ПІД-регулятор реалізується програмно в мікроконтролері.

Основними етапами роботи ПІД-регулятора є:

– зчитування поточного значення швидкості;

– визначення похибки регулювання;

– обчислення керуючого сигналу;

– формування ШІМ-сигналу;

– передача сигналу на драйвер двигуна.

Проведений аналіз показав, що для системи автоматизації СШЕ МРП найбільш доцільним є використання ПІД-регулятора, який забезпечує необхідну точність, швидкодію та стійкість роботи в умовах дії зовнішніх збурень при прийнятній складності реалізації.

2.3 Алгоритм функціонування системи автоматизації

Ефективність системи автоматизації СШЕ МРП ПП значною мірою залежить від алгоритму її функціонування. Саме алгоритм визначає

послідовність обробки інформації, формування керуючих сигналів та реакцію системи на зміну зовнішніх умов експлуатації [4, 5, 11].

Основним призначенням алгоритму є забезпечення підтримання заданої швидкості руху платформи шляхом безперервного аналізу стану системи та компенсації впливу збурень [6, 23].

Робота системи автоматизації СШЕ МРП ПП базується на принципі замкненого автоматичного керування із використанням зворотного зв’язку.

У процесі роботи система автоматизації виконує такі опрації [6, 11]:

– отримує задане значення швидкості;

– вимірює фактичну швидкість руху;

– визначає похибку регулювання;

– формує керуючий вплив;

– передає сигнал на електропривод;

– аналізує результат керування;

– повторює цикл у реальному часі.

Блок-схема алгоритму етапів роботи системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено на рис. 2.3.

На початковому етапі виконується ініціалізація системи, с початку запуск мікроконтролера, далі ініціалізація периферійних модулів, після налаштування ШІМ-таймерів запускаються датчики, а в кінці проходить перевірка працездатності системи [16-20]. Також задаються початкові параметри ПІД-регулятора (K_p, K_i, K_d) [5, 16, 23].

Після запуску системи формується значення заданої швидкості (v_{ref}). Задання може здійснюватися оператором, дистанційним пультом, а також автономною системою навігації.

Зчитування даних проходить після того, як система отримує інформацію від енкодерів, датчиків струму, IMU-модулів та датчиків температури. Основним параметром є фактична швидкість (v). Отримані дані використовуються для оцінки поточного стану системи автоматизації.

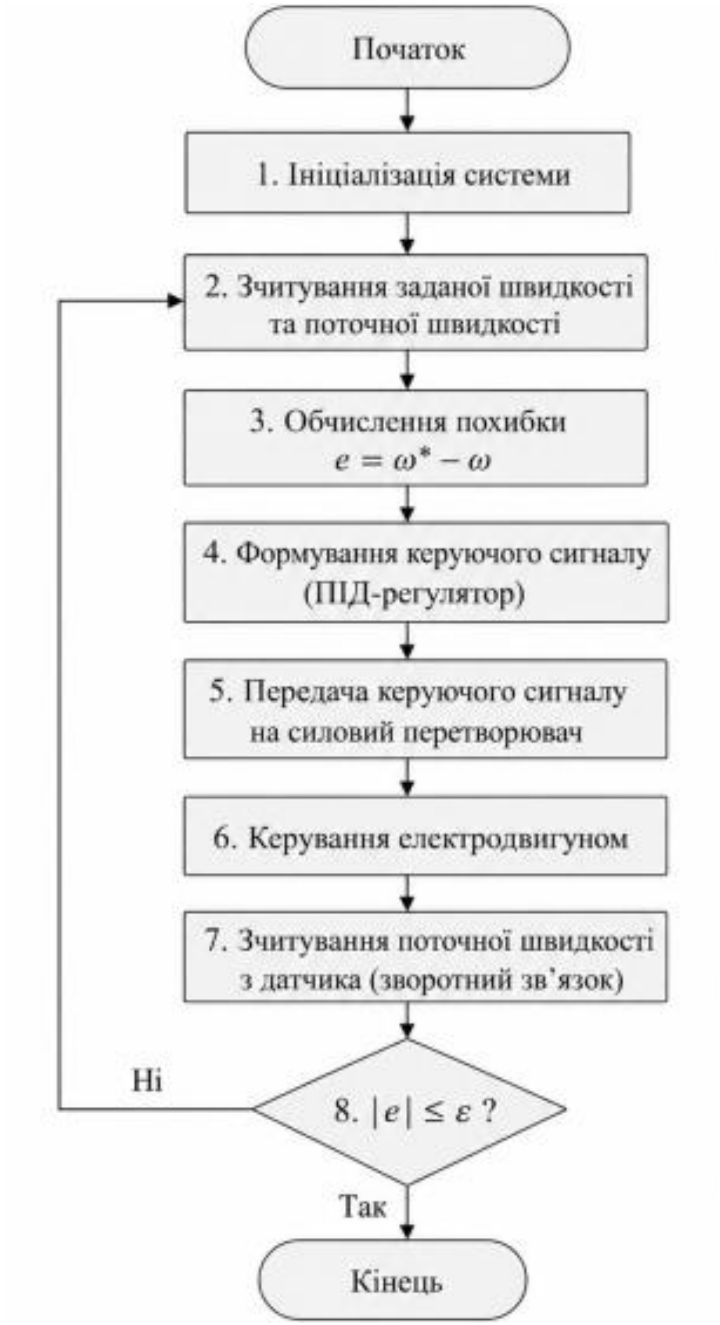


Рисунок 2.3 – Алгоритм функціонування системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Для формування керуючого сигналу обчислюється похибка регулювання ($e(t)$). На основі похибки ПІД-регулятор обчислює керуючий сигнал ($u(t)$), де пропорційна складова забезпечує швидку реакцію, інтегральна – усуває статичну похибку, а диференціальна – покращує динаміку системи. На основі керуючого сигналу формується ШІМ-сигнал для драйвера двигуна. ШІМ дозволяє плавно регулювати швидкість, зменшити

втрати енергії та забезпечити високу точність керування. Сформований ШІМ-сигнал передається до драйвера електродвигуна, який змінює швидкість обертання, регулює крутний момент і забезпечує напрям руху. У результаті здійснюється стабілізація швидкості руху МРП [14-16, 23].

Під час руху система постійно аналізує зміну навантаження, пробуксовку, коливання швидкості та зміни параметрів живлення. У разі виникнення збурень система автоматично змінює керуючий сигнал для компенсації їх впливу.

Для забезпечення безпечної роботи системи алгоритм контролює перевищення струму, перегрів двигуна, втрату сигналу сенсорів, а також перевищення допустимої швидкості. У разі аварійної ситуації система обмежує потужність, зупиняє електропривод та формує сигнал помилки.

Після завершення одного циклу всі етапи повторюються з високою частотою. Це забезпечує роботу в реальному часі, безперервний контроль швидкості та швидку реакцію на зміну умов руху.

На відміну від звичайних систем електроприводу алгоритм функціонування системи автоматизації повинен працювати в умовах постійних збурень, забезпечувати плавність руху, швидко реагувати на зміну навантаження, а також враховувати інерційність МРП.

Запропонований алгоритм функціонування системи автоматизації забезпечує стабілізацію швидкості руху, зменшення похибки регулювання, підвищення стійкості системи, компенсацію впливу збурень та надійну роботу електроприводу.

Розроблений алгоритм функціонування системи автоматизації забезпечує підтримання заданої швидкості електроприводу МРП в умовах дії зовнішніх збурень. Використання замкненого контуру керування та ПІД-регулятора дозволяє підвищити точність стабілізації, покращити динамічні характеристики системи та забезпечити надійну роботу платформи в реальних умовах експлуатації.

2.4 Інформаційна взаємодія елементів системи автоматизації

Ефективність функціонування системи автоматизації СШЕ МРП значною мірою залежить від організації інформаційної взаємодії між її основними елементами. Саме обмін даними між сенсорами, контролером, регулятором та виконавчими пристроями забезпечує реалізацію замкненого контуру керування та можливість оперативної компенсації зовнішніх збурень.

Інформаційна взаємодія в системі здійснюється у режимі реального часу, що дозволяє забезпечити швидке реагування на зміну параметрів руху та умов експлуатації МРП [4, 5, 11].

На рисунку 2.4 наведено схему інформаційної взаємодії елементів системи автоматизації СШЕ МРП ПП.

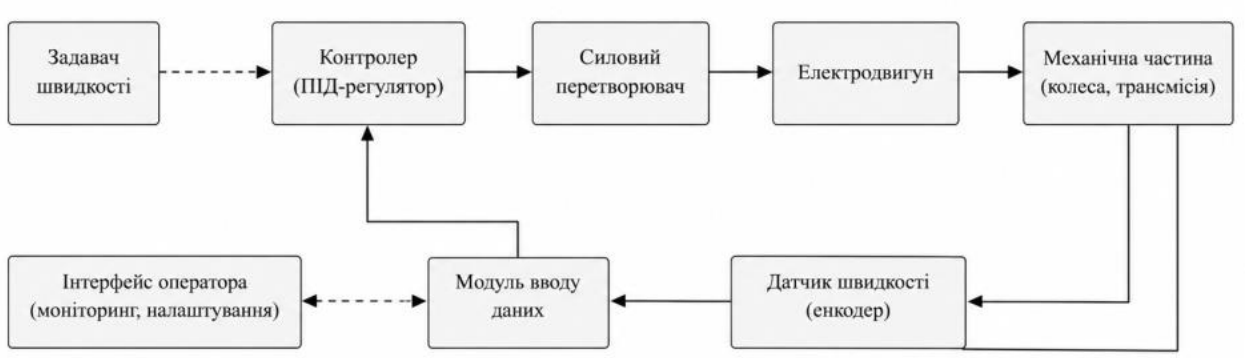


Рисунок 2.4 – Схема інформаційної взаємодії елементів системи автоматизації СШЕ МРП ПП

У автоматизованої системі можна виділити такі основні інформаційні потоки: задавальних сигналів, даних сенсорної системи, керуючих сигналів, діагностичної інформації та аварійних повідомлень.

Потік задавальних сигналів – формується оператором або системою автономного керування та передається до контролера. До основних параметрів належать: задана швидкість руху, напрям руху та режими роботи платформи. Задавальний сигнал (v_{ref}) надходить до регулятора та

використовується для формування похибки керування.

Потік даних сенсорної системи – забезпечує безперервний моніторинг параметрів роботи електроприводу та руху платформи [5, 16, 23]. До контролера передаються швидкість руху, кутова швидкість двигуна, струм двигуна, напруга живлення, температура електроприводу і параметри прискорення та нахилу. Основним джерелом інформації про швидкість є енкодер. Фактична швидкість (v) передається до контролера для порівняння із заданим значенням. Процес обробки інформації полягає в тому, що контролер отримує дані від датчиків, потім відбувається фільтрація сигналів і обчислення похибки регулювання, а наприкінці формується керуючий сигнал. Після цього ПІД-регулятор формує сигнал керування електроприводом.

Потік керуючих сигналів – забезпечує передачу керуючого сигналу $u(t)$ до силового драйвера у вигляді ШІМ-сигналу [17-20]. Драйвер двигуна змінює напругу живлення двигуна, регулює крутний момент та забезпечує зміну швидкості руху. Передача керуючих сигналів повинна здійснюватися з мінімальною затримкою для забезпечення високої швидкодії системи. Зворотний зв’язок є основою стабілізації швидкості та забезпечує контроль фактичної швидкості, компенсацію впливу збурень та стабілізацію режимів роботи. Безперервне оновлення інформації дозволяє системі адаптуватися до змін навантаження, реагувати на пробуксовку, а також компенсувати нерівності поверхні.

Потік діагностичної інформації – забезпечує отримання та порівняння основних параметрів системи. Система автоматизації повинна функціонувати у режимі реального часу, оскільки навіть незначні затримки в передачі або обробці інформації можуть призвести до коливань швидкості, втрати стійкості та погіршення якості керування. Тому цикл обробки інформації виконується з високою частотою дискретизації. Окрім основних сигналів система формує службову (діагностичну) інформацію про стан датчиків, рівень заряду батареї, температура компонентів та аварійні повідомлення. Це

дозволяє контролювати працездатність системи, своєчасно виявляти несправності, а також підвищити надійність роботи.

Потік аварійних повідомлень – забезпечує обмін інформацією у разі електромагнітних перешкод, втрати пакетів даних, збоїв датчиків та нестабільності живлення. Для цього використовуються фільтрація сигналів, контроль цілісності даних та резервування критичних сигналів. Ефективна організація інформаційного взаємодії дозволяє підвищити точність стабілізації швидкост, забезпечити швидке реагування на збурення, підвищити надійність системи, а також покращити якість керування платформою.

Інформаційна взаємодія елементів системи автоматизації є важливою складовою СШЕ МРП. Організація безперервного обміну даними між сенсорами, контролером та виконавчими пристроями забезпечує реалізацію замкненого контуру керування, компенсацію впливу зовнішніх збурень та стабільну роботу системи в режимі реального часу.

2.5 Забезпечення стійкості та надійності системи автоматизації

Однією з основних вимог до системи автоматизації стабілізації швидкості електроприводу МРП є забезпечення її стійкої та надійної роботи в умовах дії зовнішніх збурень, змінного навантаження та можливих відмов окремих компонентів [4, 5, 11].

МРП ПП функціонують у складних умовах експлуатації, де система керування постійно піддається впливу механічних, електричних та середовищних факторів. У таких умовах навіть незначні порушення роботи сенсорів, електроприводу або контролера можуть призводити до погіршення якості керування, втрати стабільності руху або аварійних ситуацій [8, 10].

У зв’язку з цим важливою задачею є забезпечення стійкості системи керування, надійності функціонування, захисту від аварійних режимів та стабільності роботи електроприводу.

Стійкість системи автоматичного керування характеризує її здатність зберігати працездатність, повертатися до встановленого режиму після дії збурень, а також забезпечувати стабільне значення швидкості [11, 23].

На рисунку 2.5 наведена схема забезпечення стійкості системи автоматизації СШЕ МРП ПП.



Рисунок 2.5 – Схема забезпечення стійкості системи автоматизації СШЕ МРП ПП

У автоматизованої системі СШЕ стійкість проявляється у відсутності самозбудження, мінімізації коливань та швидкому затуханні перехідних процесів.

На стійкість впливають наступні фактори:

– зовнішні механічні збурення (зміна навантаження, нерівності поверхні, пробуксовка коліс);

– електричні фактори (коливання напруги живлення, перевантаження двигуна, електромагнітні завади);

– інформаційні фактори (шум сенсорів, затримки передачі даних, помилки вимірювання);

– програмні фактори (помилки алгоритму, нестабільність налаштувань регулятора, перевантаження контролера).

ПІД-регулятор забезпечує стабільність роботи системи за рахунок компенсації похибки регулювання, згладжування перехідних процесів та швидкої реакції на збурення [16, 23]. Пропорційна складова – підвищує швидкодію, інтегральна – усуває статичну похибку, а диференціальна – зменшує коливання та покращує стійкість системи.

Для забезпечення стабільної роботи системи автоматизації СШЕ необхідно мінімізувати вплив шумів та завад [20, 24]. Для цього у системі використовуються цифрова фільтрація сигналів, усереднення вимірювань, а також програмне обмеження різких змін сигналів. Це дозволяє зменшити вплив випадкових перешкод, підвищити точність вимірювань та стабілізувати роботу регулятора.

Для підвищення надійності система автоматизації СШЕ повинна контролювати аварійні ситуації [22, 25]. До основних аварійних ситуацій належать:

– перевищення струму двигуна;

– перегрів електроприводу;

– втрата сигналу енкодера;

– перевищення допустимої швидкості;

– падіння напруги живлення.

У разі виникнення аварійної ситуації система автоматизації обмежує потужність, зупиняє електропривод та формує повідомлення про помилку.

Надійність роботи системи автоматизації визначається її здатністю тривалий час працювати без відмов. Для підвищення надійності використовуються захист силових елементів, контроль температури, стабілізація живлення, діагностика стану сенсорів та контроль помилок передачі даних.

У сучасних систем автоматизаціїах важливу роль відіграють самодіагностика, контроль працездатності компонентів та резервування критичних елементів [17-20, 23]. Контролер виконує перевірку датчиків, аналізує коректность сигналів, а також виявляє несправності. Це дозволяє

підвищити відмовостійкість системи.

Як зазначалось, що система автоматизації повинна працювати у режимі реального часу, оскільки затримки обробки інформації можуть призвести до погіршення стабілізації, виникнення коливань та втрати керованості платформи. Для цього використовуються високошвидкісні мікроконтролери, оптимізовані алгоритми, та апаратні таймери ШІМ [17-20, 23].

Оскільки МРП використовує автономне живлення, важливими є контроль заряду акумулятора, захист від глибокого розряду та контроль споживання енергії. Це дозволяє збільшити час автономної роботи і уникнути аварійного вимкнення системи [22, 25].

Запропоновані рішення дозволяють визначити основні переваги реалізованої системи забезпечення стійкості. До переваг належать: підвищена стабільність швидкості платформи, зменшення впливу зовнішніх збурень, підвищена надійність електроприводу, забезпечення безпечної роботи системи, а також поліпшення якості керування МРП [23, 24].

Забезпечення стійкості та надійності системи автоматизації СШЕ є необхідною умовою ефективної роботи МРП ПП. Використання ПІД-регулятора, систем захисту, цифрової фільтрації сигналів та засобів діагностики дозволяє забезпечити стабільну роботу електроприводу в умовах дії зовнішніх збурень та змінного навантаження.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи розроблено структурну схему та алгоритм функціонування системи автоматизації СШЕ МРП ПП.

Визначено загальну структуру системи автоматизації, яка включає сенсорну систему, контролер, регулятор швидкості, силовий перетворювач та електропривод. Встановлено, що використання замкненого контуру керування із зворотним зв’язком забезпечує можливість підтримання заданої швидкості руху МРП в умовах дії зовнішніх збурень.

Проведено аналіз існуючих методів стабілізації швидкості та обґрунтовано вибір ПІД-регулятора як найбільш ефективного рішення для даної системи. Визначено, що ПІД-регулятор забезпечує необхідну точність регулювання, високу швидкодію та покращені динамічні характеристики при прийнятній складності реалізації.

Розроблено алгоритм функціонування системи, який включає:

– формування заданої швидкості;

– зчитування інформації із сенсорів;

– визначення похибки регулювання;

– обчислення керуючого сигналу;

– формування ШІМ-сигналу;

– керування електроприводом;

– компенсацію впливу зовнішніх збурень.

Встановлено, що запропонований алгоритм забезпечує роботу системи автоматизації у режимі реального часу та дозволяє підтримувати стабільність швидкості руху платформи в умовах змінного навантаження.

У розділі також розглянуто інформаційну взаємодію елементів системи та визначено основні інформаційні потоки між сенсорною системою, контролером та виконавчими елементами. Показано, що ефективна організація передачі даних є необхідною умовою забезпечення високої точності та стійкості керування.

Окрему увагу приділено питанням забезпечення стійкості та надійності системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Визначено основні фактори, що впливають на стабільність роботи електроприводу, а також розглянуто методи компенсації зовнішніх збурень, цифрової фільтрації сигналів та захисту від аварійних режимів.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Апаратна реалізація системи автоматизації

Апаратна реалізація системи автоматизації СШЕ МРП ПП передбачає вибір та інтеграцію технічних засобів, які забезпечують вимірювання параметрів руху, оброблення інформації, формування керуючих впливів та керування виконавчими механізмами. Від правильності вибору апаратних компонентів залежить точність стабілізації швидкості, швидкодія та надійність функціонування всієї системи [4, 5].

Загальну структуру апаратної частини системи наведено на рис. 3.1. До її складу входять мікроконтролер, датчик швидкості, силовий драйвер електродвигуна, електропривод, блок живлення та інтерфейс взаємодії з оператором.

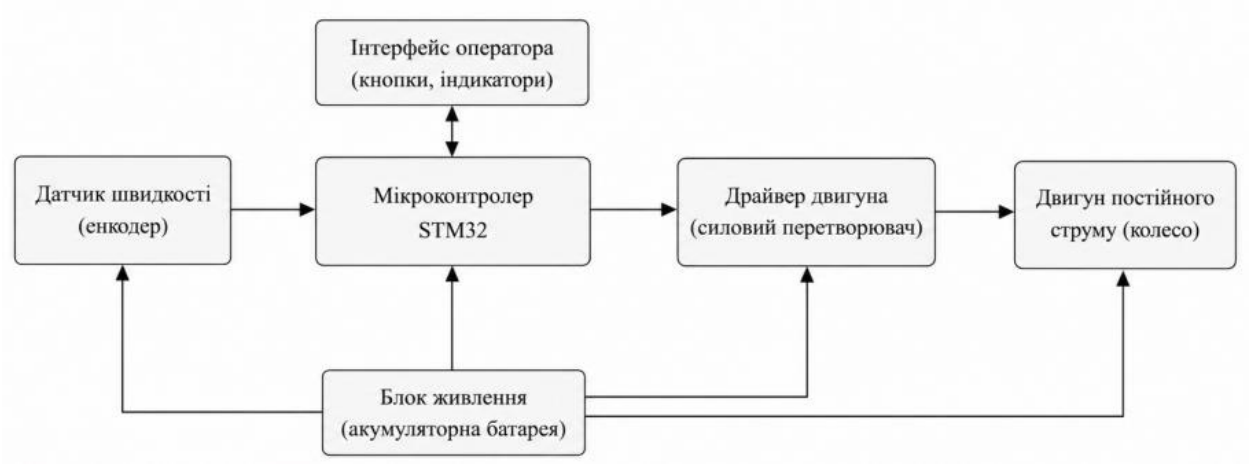


Рисунок 3.1 – Структура апаратної частини системи автоматизації СШЕ МРП ПП

У якості центрального елемента системи доцільно використовуємо сучасний мікроконтролер STM32, які характеризуються високою

продуктивністю, наявністю апаратних таймерів, модулів ШІМ та розвинених інтерфейсів обміну даними [17, 19]. Мікроконтролер виконує функції збору інформації від сенсорів, реалізації алгоритму ПІД-регулювання та формування керуючих сигналів для силового перетворювача.

Для визначення фактичної швидкості руху МРП використовується інкрементальний енкодер, встановлений на валу електродвигуна або безпосередньо на колесі платформи. Енкодер забезпечує формування імпульсних сигналів, кількість яких пропорційна швидкості обертання вала [13, 14]. Інформація від енкодера надходить до мікроконтролера, де виконується обчислення поточного значення швидкості та визначення похибки регулювання.

Керування електродвигуном здійснюється за допомогою силового драйвера, який забезпечує перетворення малопотужних керуючих сигналів мікроконтролера у сигнали, необхідні для живлення електроприводу. У системах мобільної робототехніки широко використовуються драйвери типу L298N, BTS7960 або аналогічні модулі, здатні працювати зі значними струмами навантаження [16, 25]. Силовий драйвер також реалізує функції захисту від перевантаження та короткого замикання.

Як виконавчий механізм у роботі розглядається двигун постійного струму, який завдяки простоті конструкції, високій швидкодії та можливості плавного регулювання швидкості широко застосовується у мобільних роботизованих системах [13, 15]. Електродвигун забезпечує перетворення електричної енергії у механічний рух коліс МРП.

Для забезпечення автономної роботи системи використовується акумуляторна батарея, яка живить мікроконтролер, сенсорну систему та електропривод. Блок живлення повинен забезпечувати стабільність вихідної напруги та захист електронних компонентів від перенапруги і глибокого розряду акумулятора [7].

Основні технічні характеристики елементів апаратної частини системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти апаратної реалізації системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Компонент	Призначення
Мікроконтролер STM32	Оброблення даних та реалізація алгоритму керування
Енкодер	Вимірювання швидкості обертання
Драйвер двигуна	Керування електроприводом
Двигун постійного струму	Виконавчий механізм
Акумуляторна батарея	Енергоживлення системи

Для взаємодії між окремими компонентами системи автоматизації використовуються цифрові інтерфейси UART, I^2C та SPI, які забезпечують надійну передачу інформації між мікроконтролером, датчиками та допоміжними модулями [17, 19]. Використання стандартних інтерфейсів спрощує модернізацію системи та дозволяє підключати додаткові сенсори без суттєвих змін апаратної структури.

Запропонована апаратна реалізація системи автоматизації забезпечує необхідну точність вимірювання параметрів руху, формування керуючих впливів у режимі реального часу та стабільне функціонування електроприводу МРП в умовах дії зовнішніх збурень.

3.2 Програмна реалізація системи автоматизації

Програмна реалізація системи автоматизації СШЕ МРП ПП є одним із найважливіших етапів розроблення, оскільки саме ПЗ забезпечує реалізацію алгоритмів керування, оброблення сигналів від сенсорів та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Використання сучасних мікроконтролерів сімейства STM32 дозволяє реалізувати складні алгоритми керування в режимі реального часу, що забезпечує високу точність стабілізації швидкості електроприводу [17, 19].

Загальну структуру ПЗ системи наведено на рис. 3.3. ПЗ побудоване за модульним принципом, що спрощує його модернізацію, налагодження та подальший розвиток. Основними складовими ПЗ є модуль ініціалізації системи, модуль опитування датчиків, модуль реалізації ПІД-регулятора, модуль формування ШІМ-сигналів, модуль діагностики та захисту, а також модуль взаємодії з оператором.

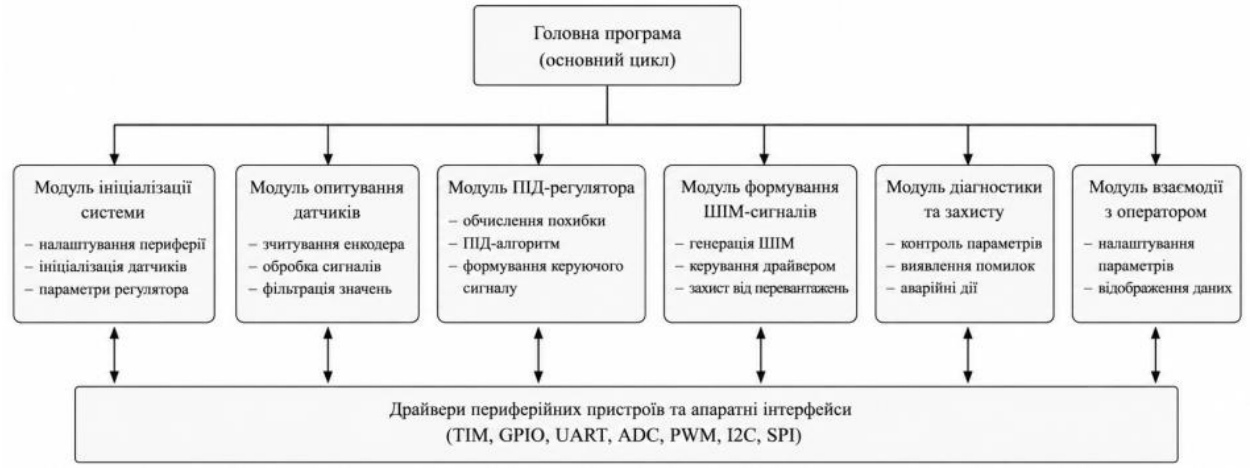


Рисунок 3.2 – Структура ПЗ системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Після подачі живлення мікроконтролер виконує процедуру ініціалізації периферійних пристроїв. На цьому етапі здійснюється налаштування таймерів, конфігурування цифрових входів і виходів, запуск модулів широтно-імпульсної модуляції, ініціалізація інтерфейсів UART, GPIO та таймерів режиму енкодера [17]. Крім того, задаються початкові коефіцієнти ПІД-регулятора та виконується перевірка працездатності основних вузлів системи.

Після завершення ініціалізації ПЗ переходить до циклічного режиму роботи. У межах головного циклу здійснюється безперервне опитування енкодера, визначення фактичної швидкості електроприводу, обчислення похибки регулювання та формування нового значення керуючого сигналу.

Основним елементом ПЗ є модуль реалізації ПІД-регулятора. Його призначення полягає у визначенні керуючого сигналу на основі різниці між

заданою та поточною швидкістю обертання електродвигуна. Програмна реалізація ПІД-регулятора здійснюється відповідно до класичного алгоритму цифрового регулювання [4, 5, 11]. Фрагмент програмного коду реалізації ПІД-регулятора наведено у лістингу 3.1 (програмний код наведено у Додатку А).

Лістинг 3.1 – Реалізація ПІД-регулятора

```
float error = setSpeed - currentSpeed;
integral += error * dt;
derivative = (error - previousError) / dt;
controlSignal = Kp * error +
                Ki * integral +
                Kd * derivative;
previousError = error;
```

Наведений програмний код забезпечує обчислення похибки регулювання, накопичення інтегральної складової, визначення диференціальної складової та формування результуючого керуючого сигналу. Для підвищення стійкості роботи системи значення інтегральної складової може обмежуватися програмними засобами [12].

Після визначення керуючого сигналу виконується формування ШІМ-сигналу, який надходить до драйвера двигуна, що дозволяє плавно змінювати швидкість електроприводу та забезпечує високу енергоефективність системи [16, 25]. Фрагмент програмної реалізації формування ШІМ-сигналу наведено у лістингу 3.2 (програмний код наведено у Додатку Б).

Лістинг 3.2 – Формування ШІМ-сигналу

```
if(controlSignal > PWM_MAX)
    controlSignal = PWM_MAX;
if(controlSignal < 0)
    controlSignal = 0;
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,
                      TIM_CHANNEL_1,
                      (uint16_t)controlSignal);
```

У наведеному фрагменті здійснюється перевірка допустимого діапазону значень керуючого сигналу та передача розрахованого значення до відповідного каналу таймера STM32. Це забезпечує стабільне формування ШІМ-сигналу та виключає можливість перевантаження силового драйвера.

Однією з найважливіших функцій ПЗ є отримання інформації від датчика швидкості. Для цього використовується апаратний режим роботи таймерів STM32 у режимі енкодера, що забезпечує високу точність вимірювання кутової швидкості [17]. Фрагмент програмного коду зчитування даних з енкодера наведено у лістингу 3.3 (програмний код наведено у Додатку В).

Лістинг 3.3 – Зчитування даних з енкодера

```
encoderCount =
    __HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim2);
currentSpeed =
    (encoderCount - previousCount) /
    sampleTime;
previousCount = encoderCount;
```

У результаті виконання наведеного алгоритму визначається кількість імпульсів енкодера за інтервал дискретизації, що дозволяє обчислити поточну швидкість обертання електроприводу. Отримані дані використовуються ПІД-регулятором для формування нового значення керуючого сигналу.

Для забезпечення надійності функціонування ПЗ реалізовано модуль діагностики та захисту. Цей модуль здійснює контроль струму двигуна, температури силових елементів, напруги живлення та коректності роботи датчиків [13, 17]. У разі виникнення аварійної ситуації система автоматизації СШЕ МРП переходить у безпечний режим роботи або повністю вимикає електропривод.

Основні програмні модулі та їх функції наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні програмні модулі системи автоматизації

Модуль	Основні функції
Ініціалізація	налаштування периферійних пристроїв
Опитування датчиків	зчитування та оброблення сигналів енкодера
ПІД-регулятор	обчислення керуючого сигналу
ШІМ-модуль	формування сигналів керування двигуном
Діагностика	контроль стану системи та захист
Інтерфейс оператора	налаштування параметрів та моніторинг

Для взаємодії оператора із системою може використовуватися послідовний інтерфейс UART, який забезпечує передачу діагностичної інформації та налаштування параметрів регулятора [18, 19]. Використання модульної структури ПЗ забезпечує простоту масштабування системи та можливість інтеграції додаткових функцій у майбутньому.

Розроблене ПЗ забезпечує реалізацію алгоритму СШЕ, формування керуючих сигналів у режимі реального часу та підтримання стабільної роботи МРП ПП в умовах дії зовнішніх збурень.

3.3 Інтерфейс оператора системи автоматизації

Важливою складовою системи автоматизації СШЕ МРП ПП є інтерфейс оператора, який забезпечує взаємодію користувача із системою, налаштування параметрів регулятора, моніторинг поточного стану обладнання та відображення діагностичної інформації. Наявність зручного інтерфейсу значно спрощує процес експлуатації системи та підвищує ефективність її використання [7, 18].

У сучасних систем автоматизаціїах для реалізації інтерфейсу оператора широко використовуються програмні засоби моніторингу, що забезпечують відображення технологічних параметрів у режимі реального часу [4, 7]. Для розроблюваної системи інтерфейс реалізується у вигляді програмного

застосунку, який забезпечує двосторонній обмін даними між мікроконтролером STM32 та оператором через послідовний інтерфейс UART або бездротовий канал зв’язку [17, 19].

Загальну структуру взаємодії оператора із системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено на рис. 3.3.

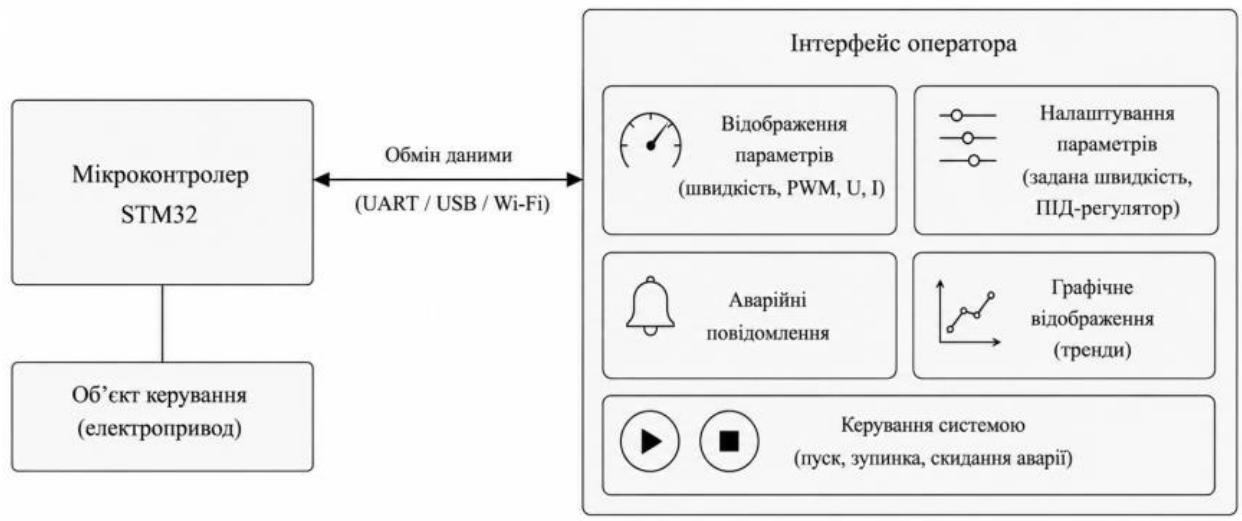


Рисунок 3.3 – Структура інтерфейсу оператора
системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Інтерфейс оператора забезпечує відображення основних параметрів функціонування електроприводу, серед яких особливе значення мають задана швидкість, поточна швидкість руху, величина похибки регулювання, значення керуючого сигналу, а також технічний стан основних вузлів системи. Відображення зазначених параметрів у режимі реального часу дозволяє оператору оперативно оцінювати якість роботи системи автоматизації та своєчасно виявляти можливі відхилення [11, 18].

До основних функцій інтерфейсу оператора належать:

– відображення поточної швидкості електроприводу;

– встановлення заданої швидкості руху;

– зміна параметрів ПІД-регулятора;

– відображення стану системи;

– реєстрація аварійних повідомлень;

– моніторинг параметрів живлення.

Перелік основних функціональних елементів інтерфейсу оператора системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні елементи інтерфейсу оператора

Елемент інтерфейсу	Призначення
Поле задання швидкості	встановлення необхідної швидкості
Індикатор поточної швидкості	відображення фактичної швидкості
Поле параметрів ПІД	налаштування коефіцієнтів регулятора
Вікно повідомлень	відображення службових повідомлень
Кнопки керування	пуск, зупинка, скидання аварії
Графічне поле	побудова графіків зміни швидкості

Для передачі інформації між мікроконтролером STM32 та інтерфейсом оператора використовується послідовний інтерфейс UART, який характеризується простотою реалізації та достатньою швидкістю обміну даними [17]. Передача даних здійснюється у вигляді текстових повідомлень, що містять поточні значення параметрів системи.

Фрагмент програмного коду передачі інформації до інтерфейсу оператора наведено у лістингу 3.4 (програмний код наведено у Додатку Г).

Лістинг 3.4 – Передача даних до інтерфейсу оператора

```
sprintf(txBuffer,
        "Speed:%d; PWM:%d\r\n",
        currentSpeed,
        controlSignal);

HAL_UART_Transmit(&huart1,
                  (uint8_t*)txBuffer,
                  strlen(txBuffer),
                  100);
```

У наведеному фрагменті програмного коду формується текстове повідомлення, яке містить значення поточної швидкості та керуючого сигналу, після чого інформація передається через послідовний порт UART. Отримані дані можуть відображатися у спеціалізованому ПЗ на персональному комп'ютері (ПК) або мобільному пристрої [18, 19].

Загальний вигляд вікна інтерфейсу оператора системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено на рис. 3.4.

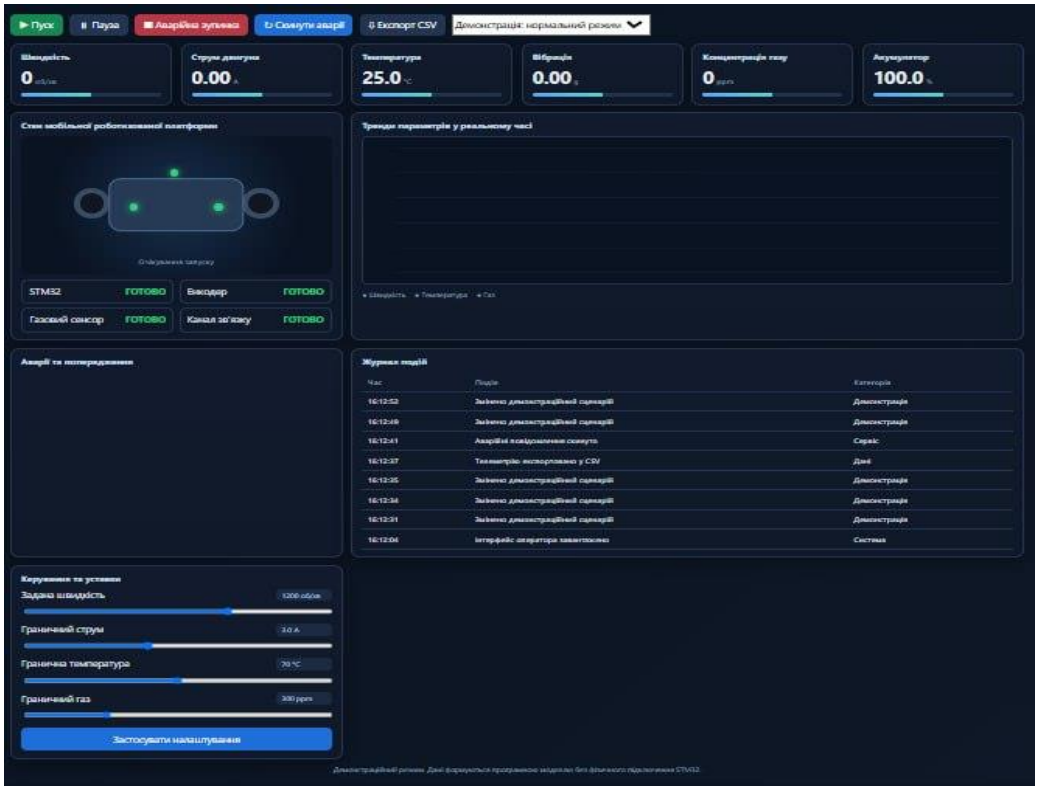


Рисунок 3.4 – Вікно інтерфейсу оператора
системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Інтерфейс оператора системи автоматизації призначений для встановлення заданої швидкості, перегляду фактичної швидкості електроприводу, контролю величини ШІМ-сигналу, а також відображення службових і аварійних повідомлень.

Фрагмент програмного коду створення інтерфейсу оператора системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено у лістингу 3.5 (програмний код наведено у Додатку Д).

Лістинг 3.5 – Створення інтерфейсу оператора

```
import tkinter as tk
window = tk.Tk()
window.title("Інтерфейс оператора системи")
window.geometry("420x300")
title = tk.Label(
    window,
    text="Система стабілізації швидкості",
    font=("Arial", 14, "bold")
)
title.pack(pady=10)
frame = tk.Frame(window)
frame.pack(pady=10)
tk.Label(frame, text="Задана швидкість, об/хв:").grid(row=0,
column=0, sticky="w")
set_speed_entry = tk.Entry(frame, width=15)
set_speed_entry.grid(row=0, column=1)
tk.Label(frame, text="Поточна швидкість, об/хв:").grid(row=1,
column=0, sticky="w")
current_speed_label = tk.Label(frame, text="0")
current_speed_label.grid(row=1, column=1)
tk.Label(frame, text="ШІМ-сигнал, %:").grid(row=2, column=0,
sticky="w")
pwm_label = tk.Label(frame, text="0")
pwm_label.grid(row=2, column=1)
tk.Label(frame, text="Стан системи:").grid(row=3, column=0,
sticky="w")
status_label = tk.Label(frame, text="Очікування")
status_label.grid(row=3, column=1)
button_frame = tk.Frame(window)
button_frame.pack(pady=15)
start_button = tk.Button(button_frame, text="Пуск", width=12)
start_button.grid(row=0, column=0, padx=5)
stop_button = tk.Button(button_frame, text="Зупинка", width=12)
stop_button.grid(row=0, column=1, padx=5)
window.mainloop()
```

Наведений фрагмент програмного коду демонструє принцип побудови найпростішого графічного інтерфейсу оператора. У реальній системі до цього модуля додається обробка подій кнопок, передавання заданої швидкості до мікроконтролера через UART, приймання телеметричних даних від STM32 та оновлення поточних значень швидкості й ШІМ-сигналу. Використання такого інтерфейсу спрощує налагодження системи автоматизації, забезпечує наочний контроль параметрів електроприводу та підвищує зручність її експлуатації [17, 18, 19].

Окрім відображення поточних параметрів, інтерфейс оператора забезпечує можливість зміни коефіцієнтів ПІД-регулятора без необхідності перепрограмування мікроконтролера. Такий підхід значно спрощує процес налаштування системи та дозволяє адаптувати алгоритм керування до різних умов експлуатації МРП [5, 11].

Для підвищення інформативності роботи системи автоматизації доцільно реалізувати графічне відображення зміни швидкості електроприводу у часі.

Наявність графічних засобів візуалізації дозволяє аналізувати динамічні характеристики системи автоматизації, оцінювати якість СШЕ та визначати ефективність роботи ПІД-регулятора [4, 7].

Крім функцій моніторингу та керування, програмний інтерфейс реалізує механізми діагностики, які дозволяють повідомляти оператору про виникнення аварійних ситуацій, таких як перевищення струму, перегрів електродвигуна, відсутність сигналу від енкодера або критичне зниження напруги живлення. Це сприяє підвищенню надійності та безпеки експлуатації системи автоматизації [13, 17].

Розроблений інтерфейс забезпечує зручну взаємодію оператора із автоматизованою системою, дозволяє здійснювати моніторинг параметрів роботи електроприводу, змінювати налаштування ПІД-регулятора та своєчасно реагувати на виникнення аварійних ситуацій.

3.4 Тестування функціонування системи автоматизації

3.4.1 Методіка проведення комплексного тестування

Після завершення розроблення апаратного та ПЗ системи автоматизації СШЕ МРП ПП проведено комплексне тестування її функціонування. Основною метою тестування є перевірка працездатності системи автоматизації, оцінювання точності підтримання заданої швидкості, аналіз реакції на зовнішні збурення та підтвердження відповідності отриманих

результатів поставленим вимогам [4, 5].

Процес тестування сучасних систем автоматизації є невід'ємною складовою етапу впровадження, оскільки дозволяє виявити можливі помилки функціонування, оцінити надійність роботи системи та визначити ефективність застосованих алгоритмів керування [7, 11]. Загальну схему проведення тестування системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено на рис. 3.5.

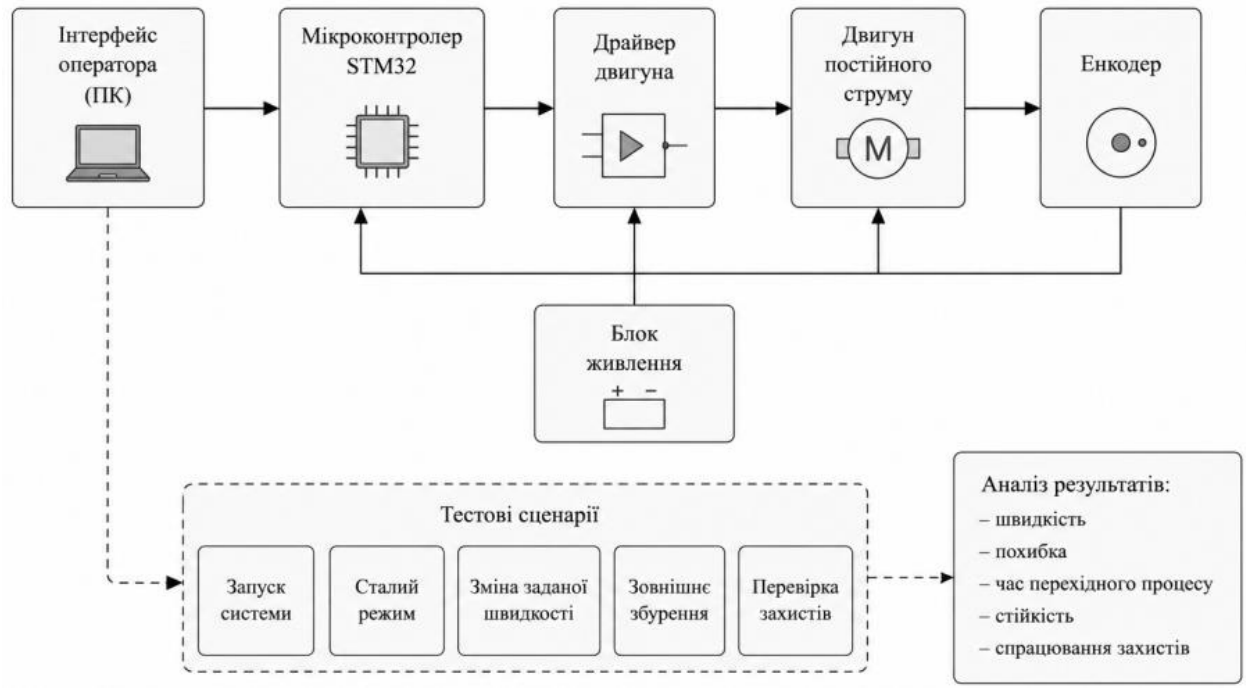


Рисунок 3.5 – Схема тестування системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Тестування проводилося на експериментальному стенді, до складу якого входили мікроконтролер STM32, драйвер двигуна, двигун постійного струму, енкодер, блок живлення та програмний інтерфейс оператора. Випробування здійснювалися за різних режимів роботи електроприводу та різних значень заданої швидкості.

Для оцінювання ефективності роботи системи було сформовано такі тестові сценарії:

– перевірка працездатності системи автоматизації після запуску;

– перевірка стабілізації швидкості при сталому навантаженні;

– дослідження реакції системи на зміну заданої швидкості;

– дослідження впливу зовнішніх збурень;

– перевірка роботи системи захисту.

Основні режими тестування системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Режими тестування системи автоматизації

№	Режим випробування	Контрольований параметр
1	Запуск системи	коректність ініціалізації
2	Сталий режим	похибка стабілізації
3	Зміна швидкості	час перехідного процесу
4	Зовнішнє збурення	стійкість системи
5	Перевантаження	робота захисту

3.4.2 Оцінювання стійкості системи автоматизації

Для оцінювання стійкості системи автоматизації було проведено аналіз реакції електроприводу на короткочасне зовнішнє механічне збурення. Під час експерименту після досягнення усталеного режиму роботи на вал двигуна короткочасно прикладалося додаткове механічне навантаження, що призводило до зменшення швидкості обертання.

Під час дослідження задана швидкість електроприводу становила $n_{зад}$=1200 об/хв, а в момент прикладання збурення швидкість зменшилася до значення $n_{\min}$=1120 об/хв. Після завершення перехідного процесу система відновила швидкість до значення $n_{факт}$=1175 об/хв.

Для оцінювання стійкості визначимо максимальне відхилення швидкості (Δn) від заданого значення:

$$\Delta n = n_{зад} - n_{\min}, \qquad (3.1)$$

$$\Delta n = 1200 - 1120 = 80 \text{ об/хв.}$$

Для оцінювання ступеня впливу збурення визначимо відносне відхилення швидкості ($\delta_{зб}$):

$$\delta_{зб} = \frac{\Delta n}{n_{зад}} \cdot 100\%, \tag{3.2}$$

$$\delta_{зб} = \frac{80}{1200} \cdot 100\% = 6{,}67\%.$$

Після усунення зовнішнього збурення система автоматизації СШЕ автоматично повернулася до усталеного режиму роботи. Залишкова похибка стабілізації швидкості (δ), один із найважливіших показників ефективності, визначається за формулою:

$$\delta = \frac{\left| n_{зад} - n_{факт} \right|}{n_{зад}} \cdot 100\%, \tag{3.3}$$

$$\delta = \frac{\left| 1200 - 1175 \right|}{1200} \cdot 100 = 2{,}08\,\%.$$

Отримані результати свідчать, що після дії зовнішнього збурення система автоматизації відновлює заданий режим роботи із залишковою похибкою 2,08 %, що підтверджує її стійкість та здатність компенсувати зовнішні впливи. Відсутність тривалих коливань і повернення швидкості до усталеного значення свідчать про ефективність використання ПІД-регулятора та відповідність системи вимогам, що висуваються до МРП ПП [5, 11, 15].

3.4.3 Оцінювання часу перехідного процесу

Крім точності стабілізації, оцінювався час перехідного процесу ($t_{пп}$), який характеризує швидкодію системи автоматизації. Час перехідного процесу визначався як інтервал часу від моменту подачі нового значення швидкості до моменту встановлення фактичної швидкості в межах ±5 % від заданого значення [5, 11].

Під час експериментальних досліджень встановлено, що після подачі задавального сигналу в момент часу t_0=0 с, а фактична швидкість електроприводу досягла усталеного значення та увійшла в допустиму зону ±5 % від заданої швидкості через t_1=4 с.

Тоді час перехідного процесу визначається за формулою

$$t_{пп} = t_1 - t_0, \tag{3.4}$$

де t_0 – момент подачі задавального впливу, с;

t_1 – час досягнення усталеного режиму, с.

Підставивши експериментальні значення, отримаємо:

$$t_{пп} = 1 - 0 = 4 \text{ с}.$$

Отримане значення часу перехідного процесу свідчить про достатньо високу швидкодію розробленої системи автоматизації СШЕ та відповідає вимогам, що висуваються до систем керування МРП [7, 13].

Графік зміни швидкості електроприводу під час тестування наведено на рис. 3.6.

Аналіз отриманої залежності показує, що після подачі задавального сигналу швидкість електроприводу починає інтенсивно зростати, що свідчить про високу швидкодію розробленої системи керування. На початковому етапі перехідного процесу спостерігається незначне перерегулювання, величина

якого не перевищує 4,5 %, після чого швидкість поступово наближається до заданого значення.

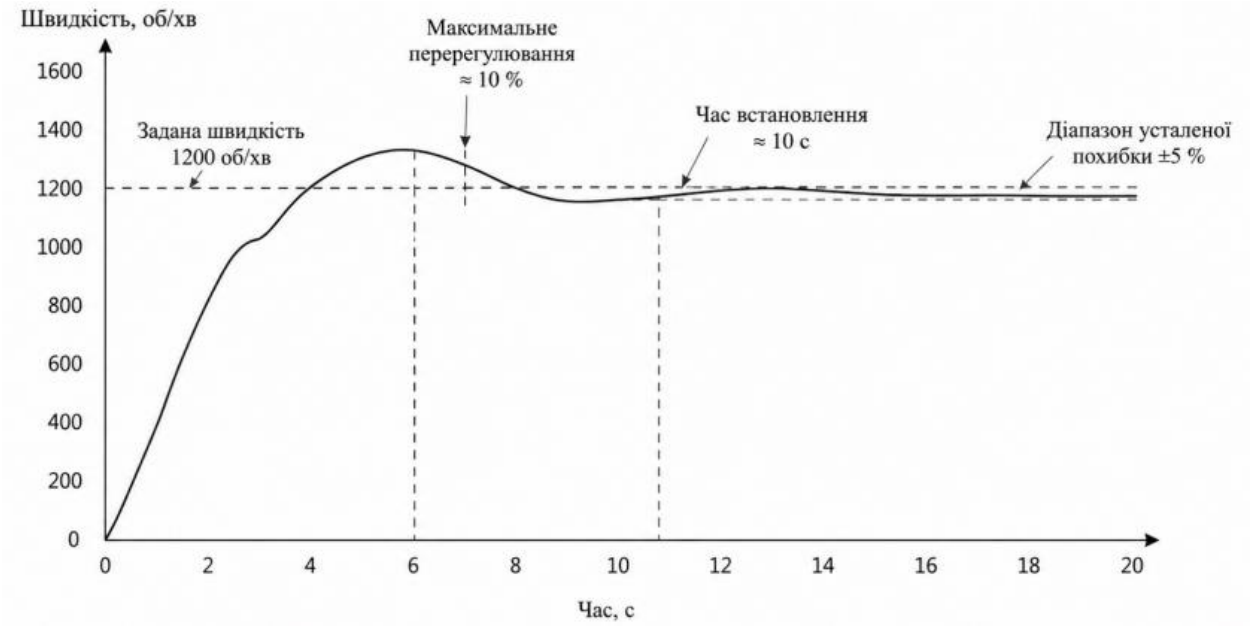


Рисунок 3.6 – Перехідний процес системи автоматизації СШЕ МРП ПП

Як видно з рис. 3.6, система досягає усталеного режиму роботи приблизно за 4 с. Після завершення перехідного процесу фактична швидкість стабілізується на рівні 1175 об/хв при заданому значенні 1200 об/хв. При цьому коливання швидкості є незначними, а відхилення від заданого значення не перевищує допустимих меж.

Під час тестування також було встановлено, що система автоматизації ефективно компенсує вплив короткочасних зовнішніх збурень. Після виникнення додаткового механічного навантаження швидкість електроприводу тимчасово зменшується, однак завдяки роботі ПІД-регулятора швидко відновлюється та повертається до усталеного значення без тривалих коливань. Це свідчить про достатній запас стійкості та правильність налаштування параметрів регулятора [5, 11].

Отримані результати підтверджують, що розроблена система автоматизації забезпечує високу точність підтримання швидкості, достатню

швидкодію та стійкість до зовнішніх збурень, що є необхідною умовою ефективного функціонування МРП ПП[4, 13].

3.4.4 Перевірка функціонування підсистеми захисту

Також здійснювалася перевірка функціонування підсистеми захисту. Для цього створювалися аварійні режими роботи, зокрема перевищення струму двигуна та зниження напруги живлення нижче допустимого рівня. У всіх випадках система автоматизації СШЕ МРП ПП своєчасно формувала повідомлення про аварійний стан та переводила електропривод у безпечний режим роботи [13, 17].

Для перевірки функціонування підсистеми захисту було виконано контроль аварійного режиму, пов’язаного з перевищенням струму електродвигуна. Підсистема захисту повинна своєчасно виявляти перевантаження та обмежувати керуючий сигнал або вимикати електропривод для запобігання пошкодженню силових елементів [13, 17].

Номінальний струм електродвигуна становив $I_{ном}$=2,5 А, а для захисту системи автоматизації було встановлено допустиме граничне значення струму $I_{гр}$=3,0 А. Під час експерименту при короткочасному збільшенні механічного навантаження на валу двигуна було зафіксовано струм $I_{факт}$=3,2 А.

Для перевірки спрацювання захисту визначимо перевищення струму (ΔI) над допустимим значенням:

$$\Delta I = I_{факт} - I_{гр}, \tag{3.5}$$

$$\Delta I = 3{,}2 - 3 = 0{,}2 \text{ А}.$$

Відносне перевищення струму (δ_i) визначається за формулою:

$$\delta_i = \frac{\Delta I}{I_{гр}} \cdot 100, \tag{3.6}$$

$$\delta_i = \frac{0{,}2}{3} \cdot 100 = 6{,}67\ \%.$$

Оскільки фактичний струм $I_{факт}$ перевищив встановлене граничне значення $I_{гр}$, підсистема захисту сформувала аварійний сигнал та обмежила керуючий ШІМ-сигнал, що забезпечило перехід електроприводу у безпечний режим роботи. Це підтверджує працездатність підсистеми захисту та її здатність запобігати перевантаженню електродвигуна і силового драйвера.

3.5.4 Аналіз отриманих результатів

Результати експериментальних досліджень тестування системи автоматизації СШЕ МРП ПП наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати тестування системи автоматизації

Параметр	Значення
Задана швидкість	1200 об/хв
Фактична швидкість	1175 об/хв
Відносна похибка	2,08 %
Час перехідного процесу	4 с
Максимальне перерегулювання	4,5 %
Перевищення струму	0,2 А
Відносне перевищення струму	6,67 %
Результат тестування	успішно

Аналіз отриманих результатів показав, що розроблена система автоматизації СШЕ забезпечує стабільне підтримання заданої швидкості, характеризується високою точністю регулювання та достатньою швидкодією.

Отримані значення похибки, часу перехідного процесу та перерегулювання підтверджують ефективність застосування ПІД-регулятора для СШЕ.

Проведене тестування підтвердило працездатність розробленої системи автоматизації СШЕ та можливість її практичного використання у МРП ПП.

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було виконано практичну реалізацію та тестування системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Розроблено апаратну структуру системи на базі мікроконтролера STM32, до складу якої входять датчик швидкості, силовий драйвер, електродвигун постійного струму, блок живлення та інтерфейс взаємодії з оператором. Обрана апаратна конфігурація забезпечує необхідну точність вимірювання параметрів руху та формування керуючих впливів у режимі реального часу.

Розроблено ПЗ системи автоматизації, яке реалізує алгоритм ПІД-регулювання, зчитування даних з енкодера, формування ШІМ-сигналів, а також функції діагностики та захисту. Використання модульного принципу побудови ПЗ забезпечило простоту модернізації та розширення функціональних можливостей системи автоматизації.

У процесі розроблення створено інтерфейс оператора, який забезпечує відображення параметрів роботи електроприводу, налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора, візуалізацію технологічних параметрів та формування повідомлень про аварійні ситуації. Реалізований інтерфейс підвищує зручність експлуатації системи автоматизації та дозволяє здійснювати оперативний контроль її стану.

Проведене комплексне тестування підтвердило працездатність розробленої системи автоматизації СШЕ МРП ПП. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що система забезпечує підтримання заданої швидкості з відносною похибкою 2,08 %, час перехідного процесу не перевищує 4 с, а максимальне перерегулювання

становить 4,5 %. Дослідження реакції на зовнішні збурення підтвердило достатній запас стійкості системи та ефективність використання ПІД-регулятора.

Перевірка функціонування підсистеми захисту показала її здатність своєчасно виявляти аварійні режими роботи та переводити електропривод у безпечний стан. Отримані результати підтверджують ефективність розробленої системи автоматизації СШЕ та можливість її практичного використання у МРП ПП.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

В приміщенні лабораторіі на робочому місці оператора ПК згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці оператора ПК є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

На рис 4.1 зображено приміщення лабораторіі, де виконувалась кваліфікаційна робота з розроблення системи автоматизації СШЕ МРП ПП.

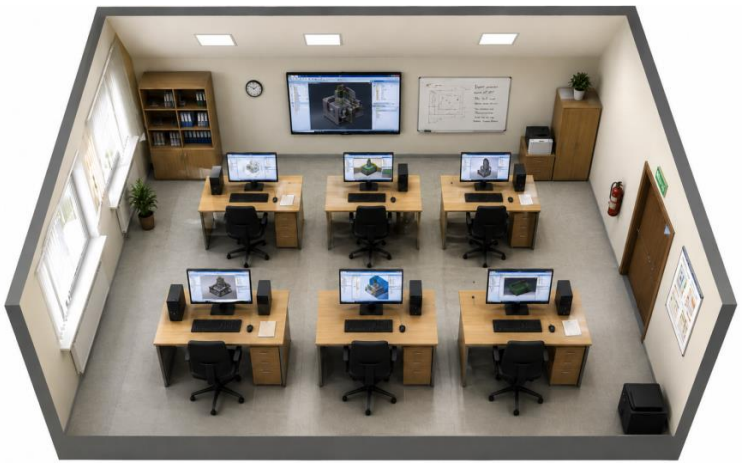


Рисунок 4.1 – Приміщення лабораторії

Організація робочого місця. Приміщення лабораторії, в якому

знаходиться робоче місце оператора ПК, загальною площею 48 м^2, і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочім столом, стільцем та ПК, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чьотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку [29].

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення [29].

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні лабораторії

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В табл. 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [29].

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціювання повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

– площа приміщення 48 м2 (8 м × 6 м);

– висота 3,5 м;

– кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м2 площі та 20 м3 обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [29]. Площа приміщення 48 м2 та об’єм 168 м3, на кожне робоче місце приходится 8 м2 площі і об’єм 28 м3, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 % [29].

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [29].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\sum}}{S}, \tag{4.1}$$

де W – питома потужність, Вт/м^2;

S – площа приміщення, м^2;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\sum} = W_{св} \cdot n_{св}, \tag{4.2}$$

де $W_{св}$ – потужність одного світильника, Вт;

$n_{св}$ – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\sum} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \tag{4.3}$$

$$W = \frac{400}{48} = 8{,}33 \text{ Вт/м}^2. \tag{4.4}$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м^2 по таблиці Б.3 із [29] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимої освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення лабораторії

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якім виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця

розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у приміщенні лабораторії є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщені можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціювання повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціювання повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

4.5 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз умов праці в лабораторному приміщенні, де здійснюється розроблення та дослідження системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Встановлено, що під час

роботи оператора ПК можуть виникати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, серед яких підвищений рівень шуму, електромагнітні випромінювання, несприятливі параметри мікроклімату, недостатній рівень освітленості та підвищена напруженість праці.

Проаналізовано вимоги промислової безпеки та визначено, що досліджуване приміщення належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки. Для забезпечення електробезпеки передбачено застосування системи занулення, що дозволяє знизити ризик ураження електричним струмом персоналу.

Виконано оцінювання параметрів виробничої санітарії та встановлено, що площа й об’єм приміщення відповідають нормативним вимогам щодо організації робочих місць з персональними комп’ютерами. Проведений розрахунок штучного освітлення показав, що фактичний рівень освітленості є нижчим за нормативне значення, у зв’язку з чим рекомендовано збільшити кількість світильників або використати джерела світла більшої потужності для покращення зорових умов праці.

Також розглянуто питання пожежної безпеки приміщення, визначено потенційні джерела займання та запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж і забезпечення безпечної евакуації персоналу.

Отже, виконаний аналіз показав, що за умови реалізації запропонованих заходів з охорони праці, виробничої санітарії, електро- та пожежної безпеки в лабораторному приміщенні можуть бути забезпечені безпечні та комфортні умови праці, які відповідають чинним нормативним вимогам.

ВИСНОВКИ

Актуальність кваліфікаційної роботи обумовлена необхідністю забезпечення стабільного руху МРП в умовах дії зовнішніх збурень, змінного навантаження та складного рельєфу місцевості.

Проведено аналіз особливостей МРП ПП, досліджено електропривод як об’єкт автоматичного керування та визначено основні фактори, що впливають на стабільність швидкості руху. Проаналізовано існуючі методи стабілізації швидкості та встановлено, що для умов експлуатації МРП ПП найбільш доцільним є використання ПІД-регулятора, який забезпечує високу точність, швидкодію та ефективну компенсацію зовнішніх збурень.

Розроблено структуру системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Сформовано загальну архітектуру системи, обґрунтовано вибір ПІД-регулятора, розроблено алгоритм функціонування системи керування та визначено склад основних апаратних і програмних компонентів. Запропонована структура забезпечує підтримання заданої швидкості руху та компенсацію впливу зовнішніх збурень у режимі реального часу.

Реалізовано ПЗ системи автоматизації, яке забезпечує збір та обробку даних із сенсорів, виконання алгоритму ПІД-регулювання, формування керуючих сигналів для електроприводу, а також організацію взаємодії між усіма елементами системи. Розроблене ПЗ дозволяє здійснювати стабілізацію швидкості електроприводу в умовах змінного навантаження та забезпечує можливість подальшого розширення функціональних можливостей системи.

Проведено експериментальні дослідження та оцінено ефективність функціонування розробленої системи автоматизації СШЕ МРП ПП. Результати тестування підтвердили працездатність системи автоматизації, її здатність забезпечувати підтримання заданої швидкості руху, компенсувати вплив зовнішніх збурень та зберігати стійкість у різних режимах роботи. Встановлено, що використання ПІД-регулятора дозволяє зменшити похибку

регулювання, покращити динамічні характеристики та підвищити якість керування МРП.

У результаті виконання кваліфікаційної роботи досягнуто поставленої мети – підвищено ефективність та стабільність руху МРП ПП шляхом розроблення системи автоматизації СШЕ. Отримані результати мають практичне значення та можуть бути використані при створенні сучасних МРП різного призначення, зокрема для військових, рятувальних, логістичних та промислових застосувань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. Київ. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

4. Невлюдов І. Ш. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. 396 с.

5. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. І. Филипенко, Н. П. Демська, С. П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

6. Невлюдов І. Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, Б. О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. 244 с.

7. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник для студентів Вищих Навчальних Закладів / І. Ш.