

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення стенду управління виконавчими механізмами типу "гвинт-гайка" з асинхронним двигуном

Виконав: студент IV курсу, групи КТ-41

спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

		Гаврилюк М. В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Митник М. М.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Чихіра І. В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Микитишин А. Г.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Коваль В.П.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Микитишин А. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«___» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Гаврилюку Миколі Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення стенду управління виконавчими механізмами типу "гвинт-гайка" з асинхронним двигуном

Керівник роботи Митник Микола Мирославович, доцент, канд. техн. наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» березня 2025 року № 4/7-239

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики та вимоги частотного перетворювача і асинхронного двигуна.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1) Аналітична частина

2) Проєктна частина

3) Спеціальна частина

4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Титульна сторінка. 2. Актуальність теми. 3. Мета, об'єкт, предмет розробки. 4. Спрощена принципова схема навчального стенду. 5. Електрична схема системи управління, індикації та безпеки. 6. Характеристики асинхронного двигуна. 7. Характеристики мікрокомп'ютера Raspberry Pi. 8. Характеристики частотного перетворювача. 9. Лабораторний стенд "гвинт-гайка". 10. Інтерфейс ППЗ. 11. ППЗ під час роботи стенду. 12. Висновки та перспективи використання стенду.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Сенчишин Віктор Степанович, к.т.н. заступник зав. кафедри МТ		

7. Дата видачі завдання 11 червня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Гаврилюк М. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Митник М. М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Обсяг графічної частини становить 15 слайдів.

Обсяг пояснювальної записки складає 77 друкованих сторінок формату А4 (210×297 мм).

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів, у яких міститься 45 рисунків, 1 таблиця. У роботі використано 22 джерела літератури.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення навчального стенду для керування виконавчим механізмом типу "гвинт-гайка" з асинхронним двигуном, що дозволяє студентам отримувати практичні навички в галузі автоматизованого електроприводу та промислової автоматизації. Стенд реалізує зв'язок між мікрокомп'ютером Raspberry Pi, частотним перетворювачем та виконавчим механізмом через протокол Modbus RTU по інтерфейсу RS-485.

Програмне забезпечення розроблено на мові Python з використанням бібліотеки CustomTkinter і бази даних SQLite. Стенд забезпечує підтримку основних функцій керування: зміна частоти, вибір напрямку обертання, пуск, зупинка та зчитування стану системи. Робота охоплює етапи аналізу сучасних підходів до побудови навчальних стендів, проєктування апаратної частини, створення програмного забезпечення та тестування в лабораторному середовищі.

Ключові слова: частотний перетворювач, асинхронний двигун, виконавчий механізм, гвинт-гайка, Python, CustomTkinter, RS-485, Modbus RTU, Raspberry Pi.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЧП - частотний перетворювач;

АД - асинхронний двигун;

ПЗ - програмне забезпечення;

NI - National Instruments;

ПЛК - програмований логічний контролер;

ЧПК - числове програмне керування;

АЦП - Аналого-цифровий перетворювач

GUI - графічне середовище користувача;

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	8
1.1 Аналіз сучасних підходів до побудови навчальних стендів	8
1.2 Актуальність створення навчального стенду керування виконавчими механізмами	13
1.3 Мета, завдання та методичні принципи побудови стенду	17
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	20
2.1 Принцип роботи виконавчого механізму типу гвинт гайка	20
2.2 Вибір компонентів стенду	25
2.2.1 Частотний перетворювач	25
2.2.2 Двигун змінного струму	33
2.2.3 Безпека, кнопки та індикатори	37
2.2.4 Мікрокомп'ютер	42
2.3 Комунікація мікрокомп'ютера з частотним перетворювачем	45
2.4 Проєктування прикладного програмного забезпечення для управління стендом	49
РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	53
3.1 Структура прикладного програмного забезпечення та принцип його роботи	53
3.2 Інтерфейс користувача та функціональні можливості програми	57
3.3 Робота програмного забезпечення в складі лабораторного стенду ...	61
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	65
4.1 Долікарська допомога при ураженні електричним струмом	65
4.2 Система захисного вимкнення в установці	67
4.3 Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання	70
ВИСНОВКИ	73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	75

ВСТУП

Сучасні автоматизовані системи управління активно впроваджуються у всі галузі промисловості завдяки їхній здатності підвищувати ефективність виробничих процесів, зменшувати втрати ресурсів та забезпечувати точне й стабільне виконання технологічних операцій. Особливу роль у розробці таких систем відіграють навчальні й дослідницькі стенди, які дозволяють моделювати та випробовувати функціонування різних типів виконавчих механізмів у лабораторних умовах.

Одним із ефективних варіантів перетворення обертального руху в лінійний є гвинтові механізми типу «гвинт-гайка», які широко застосовуються в автоматизованих пристроях подачі, позиціонування або регулювання. Забезпечити точне та надійне керування таким механізмом дозволяє використання асинхронного двигуна у поєднанні з частотним перетворювачем, який регулює швидкість обертання валу двигуна.

У даній кваліфікаційній роботі розглядається розроблення стенду для керування виконавчим механізмом типу «гвинт-гайка» на основі асинхронного двигуна з використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4, цифрового інтерфейсу RS-485 та частотного перетворювача. Обчислювальний модуль у вигляді Raspberry Pi виконує роль головного контролера, що забезпечує обмін даними з частотним перетворювачем за допомогою стандартного промислового інтерфейсу.

Таке рішення дозволяє реалізувати гнучку систему керування з можливістю програмного налаштування режимів роботи виконавчого механізму, а також з високим потенціалом для інтеграції в більш складні автоматизовані системи. Крім того, використання відкритих апаратних платформ та простих інтерфейсів сприяє зниженню вартості розробки та полегшує впровадження системи в навчальний або дослідницький процес.

При побудові стенду особливу увагу було приділено енергетичному узгодженню компонентів, надійності обміну даними між пристроями, а також зручності програмного керування процесом. Отриманий стенд може

використовуватись як для демонстрації принципів роботи електроприводу, так і для дослідження алгоритмів автоматичного керування виконавчими механізмами.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз сучасних підходів до побудови навчальних стендів

У сучасних умовах підготовки фахівців із автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій особливе значення має практична складова навчального процесу. Відповідно до сучасних тенденцій в освіті, студенти повинні не лише опановувати теоретичні знання, але й набувати реального досвіду розробки, побудови та експлуатації автоматизованих систем. Одним із найбільш ефективних інструментів для досягнення цього є навчальні стенди, що дозволяють у повному обсязі відпрацьовувати навички проектування, програмування та тестування систем автоматизації. Саме таку функцію виконує запропонований стенд управління виконавчими механізмами типу "гвинт-гайка" з асинхронним двигуном.

Актуальність тематики підготовки спеціалістів зі спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" підтверджується як динамічним розвитком сучасної промисловості, так і державними програмами підтримки інженерно-технічних напрямів. Україна, як країна, що активно прагне модернізувати своє виробництво і стати конкурентоспроможною в умовах глобальної цифрової трансформації, має потребу у великій кількості висококваліфікованих фахівців. Ринок праці демонструє стабільний попит на інженерів автоматизації, розробників систем керування, фахівців з електроприводу, що володіють навичками програмування, роботи з інтерфейсами зв'язку, цифровими контролерами та реальними фізичними механізмами.

За останні роки спостерігається також активна державна підтримка розвитку прикладних інженерних спеціальностей, що відображено в освітніх стандартах вищої освіти, конкурсних проєктах Міністерства освіти і науки, а також регіональних ініціативах, спрямованих на переоснащення лабораторій технічних університетів. У рамках таких ініціатив особлива увага приділяється

обладнанню, яке дозволяє реалізовувати сучасні підходи до автоматизації виробництва із залученням цифрових технологій - саме таким і повинен бути розроблюваний стенд.

Огляд сучасних лабораторних стендів свідчить, що більшість із них є або дорогими комплексами з обмеженою відкритістю, або застарілими пристроями, які не відповідають вимогам сучасного ринку.

Стенди на базі NI ELVIS (рис. 1.1) є прикладом сучасних високотехнологічних лабораторних рішень, які активно застосовуються у провідних університетах світу для навчання з електроніки, схемотехніки, вимірювань та керування. Вони поєднують у собі універсальний апаратний модуль і набір вбудованих функцій для проведення експериментів через програмне середовище LabVIEW. Проте, незважаючи на широкі функціональні можливості, такі комплекси мають низку суттєвих обмежень.

По-перше, їхня вартість є дуже високою, що робить масове впровадження подібних стендів у вітчизняних ЗВО фінансово недоцільним.

По-друге, масштабованість таких рішень є обмеженою - апаратні й програмні компоненти складно адаптувати до змінених умов або додати нестандартні модулі без серйозного втручання.

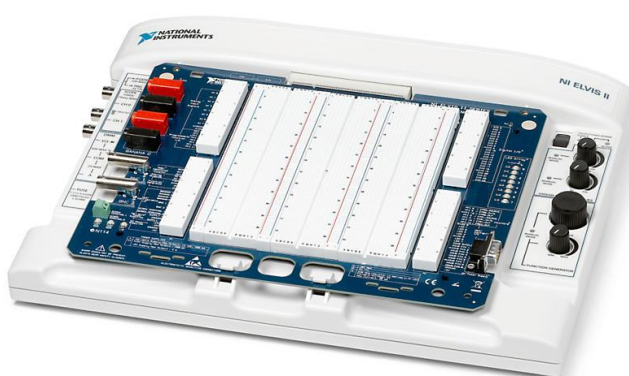


Рисунок 1.1 Лабораторно-технічна платформа NI ELVIS II з макетною платою загального призначення

Найголовніше - закрыта архітектура NI ELVIS не дозволяє вільно змінювати логіку керування, використовувати сторонні протоколи зв'язку чи інтегрувати інші контролери або програмні засоби (наприклад, Python або

Raspberry Pi), що ускладнює застосування таких стендів для міждисциплінарного навчання. Таким чином, попри високу якість виконання та функціональність, ці стенди є не надто гнучкими й потребують додаткових витрат при спробах адаптації під сучасні освітні вимоги.

Стенди на базі ПЛК від таких відомих виробників, як Siemens, Delta та Schneider Electric, широко застосовуються у професійній підготовці інженерів з автоматизації. Вони забезпечують студентів практичними навичками програмування у середовищах Step 7, TIA Portal, WPLSoft або SoMachine, що дозволяє ефективно вивчати логіку керування, структуру програм та принципи побудови промислових систем. ПЛК є основою сучасних систем автоматизації, оскільки вирізняються надійністю, гнучкістю, зручністю програмування та здатністю працювати в жорстких промислових умовах [1]. Наприклад, у навчальних цілях часто використовуються такі моделі, як Siemens S7-1200, Delta DVP-SX2 та Schneider Electric Modicon M221 (рис 1.2), проте більшість із них не передбачає інтеграції з відкритими програмними платформами (Python, Web), а також не охоплює практичної роботи з аналоговими виконавчими механізмами, що обмежує їх застосування в умовах комплексної підготовки фахівців. Проте, попри свою популярність, такі стенди мають ряд обмежень у контексті сучасних міждисциплінарних підходів.

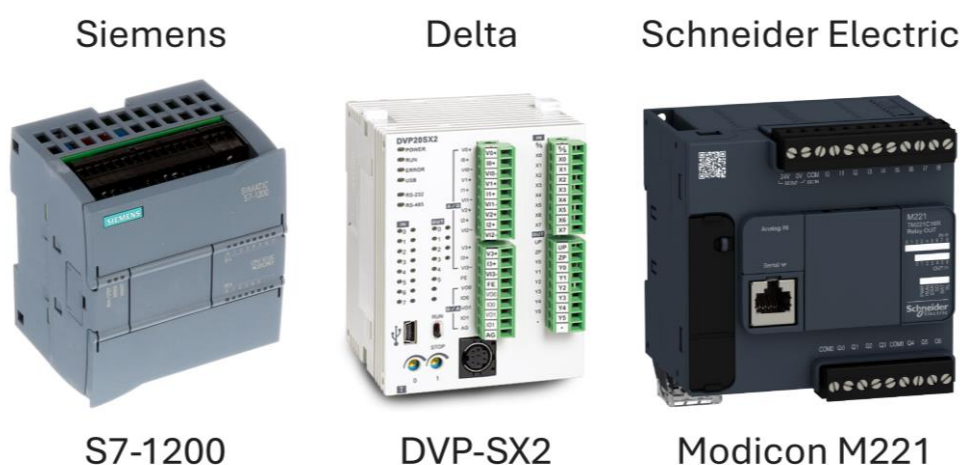


Рисунок 1.2 Сучасні ПЛК для промислових систем автоматизації

По-перше, інтеграція з відкритими програмними середовищами, зокрема такими як Python, Web-технології чи Linux-платформи, зазвичай є складною

або взагалі не передбачена. Це знижує можливість розширення функціоналу та реалізації повноцінних HMI/SCADA-рішень на відкритому ПЗ.

По-друге, стенди цього типу рідко включають аналогові виконавчі механізми, зокрема такі, як приводи типу гвинт-гайка. Через це студенти можуть вивчати лише абстрактні принципи керування без візуального розуміння динаміки виконавчого пристрою чи ефекту регуляторів у реальному часі.

Окрім того, апаратна архітектура таких стендів часто є жорстко фіксованою, що обмежує можливість модифікації або модернізації під потреби конкретних курсів чи індивідуальних проєктів. З цієї причини вони не завжди забезпечують гнучкість і масштабованість, необхідні для сучасного інженерного навчання.

Таким чином, хоча ПЛК-стенди і залишаються незамінними для ознайомлення з класичними принципами автоматизації, вони поступаються міждисциплінарним відкритим платформам за гнучкістю, візуалізацією фізичних процесів та інтеграцією з сучасним програмним забезпеченням, що робить розроблюваний стенд на базі Raspberry Pi із реальним виконавчим механізмом більш придатним для практичного навчання в умовах ЗВО.

У порівнянні з розглянутими аналогами, розроблюваний навчальний стенд має мати низку переваг:

1. Модульність - окремі компоненти легко замінюються або модернізуються (двигун, датчики, Raspberry Pi, частотний перетворювач);
2. Вартість - значно дешевший у виробництві та обслуговуванні;
3. Програмна відкритість - використання мов програмування високого рівня (Python), відкритих ОС (Linux), графічних бібліотек (CustomTkinter) забезпечують гнучкість у розробці інтерфейсів і логіки керування;
4. Відповідність промисловим стандартам - реалізація протоколу Modbus RTU через RS-485 дозволяє моделювати реальні виробничі ситуації;
5. Навчальна ефективність - студент безпосередньо бачить результат взаємодії з реальним приводом, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу;

6. Міждисциплінарність - стенд може бути застосований у викладанні курсу "Автоматизований електропривід", "Метрологія", "Програмування систем автоматизації", "SCADA та HMI-системи", "Системи управління базами даних" тощо.

Окрім вищезазначеного, варто врахувати, що сучасні виробничі підприємства все активніше впроваджують автоматизовані системи керування та обробки інформації. Масове виробництво, яке має високі вимоги до точності, швидкодії, повторюваності та безперервного контролю, потребує кваліфікованих інженерів, здатних оперативно впроваджувати, налагоджувати та обслуговувати такі системи. Саме тому створення навчального стенду, що імітує роботу виконавчого механізму типу "гвинт-гайка", який широко застосовується у сучасній промисловості (верстати, приводи лінійного переміщення, промислові маніпулятори), дозволяє максимально наблизити процес навчання до умов реального виробництва [2].



Рисунок 1.3 Аргументація вибору концепції стенду на основі сучасних освітніх рішень

У процесі пошуку літературних джерел, аналізу підходів до побудови сучасних лабораторних стендів та формування методичної бази дослідження, було враховано принципи, викладені у статті [3]. Таким чином, аналіз літературних, практичних і освітніх джерел свідчить про доцільність розробки такого стенду для підготовки студентів інженерно-технічних спеціальностей, а

також про його численні переваги в порівнянні з існуючими аналогами саме в навчальних цілях. Стенд є важливим елементом у підготовці затребуваних фахівців у галузі автоматизації та відповідає викликам сучасної технічної освіти.

1.2 Актуальність створення навчального стенду керування виконавчими механізмами

Сучасний ринок пропонує велику кількість лабораторних стендів, проте більшість із них орієнтовані на вузькоспеціалізовані задачі та не дозволяють охопити весь спектр дисциплін, що викладаються на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій.



Рисунок 1.4 Міждисциплінарність розроблюваного навчального стенду в межах спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Запропонований стенд має міждисциплінарний характер (рис. 1.4) і дозволяє проводити практичні заняття з таких дисциплін, як:

1. «Проектування прикладного програмного забезпечення для автоматизованих систем» - одна з таких дисциплін, у межах якої студенти опановують мову програмування Python та вчаться створювати прикладні

рішення для автоматизованих систем із використанням пристроїв Raspberry Pi. Запропонований стенд дозволяє реалізовувати завдання цієї дисципліни на практиці: керування реле та двигунами, зчитування інформації з датчиків, організація бездротового обміну даними та виведення інформації через зручні інтерфейси. Такі компетенції є надзвичайно актуальними у сучасному виробництві, де мікрокомп'ютери на кшталт Raspberry Pi широко застосовуються для автоматизації окремих технологічних ділянок і виконання функцій моніторингу та керування;

2. «Програмування систем управління технологічним обладнанням» - це дисципліна, що формує в студентів розуміння архітектури сучасних систем керування, принципів побудови їхнього програмного та апаратного забезпечення, а також типових алгоритмів управління технологічними процесами. Запропонований навчальний стенд відповідає вимогам цього курсу, оскільки реалізація програмної частини на базі Raspberry Pi 4 із використанням мови Python дозволяє створювати прототипи SCADA-подібних систем, здійснювати моніторинг та керування реальним обладнанням через промисловий інтерфейс RS-485, а також забезпечує наочну демонстрацію обміну даними між рівнями управління. Завдяки цьому студенти отримують практичний досвід, який безпосередньо відображає реальні умови функціонування сучасних автоматизованих систем;

3. «Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах» - запропонований стенд оснащений інтерфейсом RS-485 і дозволяє реалізувати обмін даними за протоколом Modbus RTU, що дає змогу студентам вивчати особливості промислових мереж нижнього рівня в умовах, наближених до реальних. Студенти можуть моделювати інтеграцію виконавчих пристроїв, датчиків і контролерів у єдину систему, здійснювати налаштування адресації, моніторинг та обмін інформацією між компонентами, що є актуальним у контексті впровадження Industry 4.0. Стенд також відкриває можливість дослідження гібридних систем з локальним управлінням і хмарною інтеграцією;

4. «Комп'ютерні мережі» - у межах лабораторних занять студенти мають змогу практично реалізовувати налаштування взаємодії між елементами автоматизованих систем через Ethernet та бездротові інтерфейси. Завдяки інтеграції Raspberry Pi та інших модулів можливе розгортання моделі локальної мережі з IP-адресацією, тестування клієнт-серверної архітектури та впровадження простих REST API. Це забезпечує засвоєння основ маршрутизації, комутації, а також конфігурації TCP/IP-стека в умовах, наближених до реальних промислових мереж. Студенти вчаться обирати апаратне забезпечення для побудови мережі, виконувати діагностику з'єднань та інтегрувати вузли в загальну систему управління згідно з концепцією Industry 4.0;

5. «Автоматизований електропривід» - дисципліна, що формує у студентів фундаментальні знання та практичні навички з побудови, аналізу та керування сучасними електроприводами. Вивчаються методи автоматичного регулювання електродвигунів змінного струму, принципи енергозбереження та проектування надійних систем. Навчальний стенд забезпечує наочну реалізацію цих принципів: за допомогою частотного перетворювача, підключеного через інтерфейс RS-485, студенти можуть здійснювати регулювання параметрів асинхронного двигуна, моделюючи типові режими роботи виконавчих механізмів у промисловості. Такий підхід дає змогу закріпити теоретичні знання шляхом практичного досвіду, що критично важливо для підготовки фахівців, здатних ефективно працювати в умовах реального виробництва;

6. «Web-технології в системах автоматизації» - дисципліна спрямована на формування у студентів навичок створення та впровадження інтернет-орієнтованих інтерфейсів для промислових об'єктів. Завдяки використанню відкритої архітектури Raspberry Pi, навчальний стенд дозволяє реалізувати як локальні, так і віддалені засоби моніторингу та керування параметрами електроприводу через веб-браузер, REST API або інші мережеві протоколи. Це забезпечує сучасний рівень інтеграції систем автоматизації з інформаційними технологіями, відповідає актуальним вимогам цифровізації виробництва та

дозволяє моделювати промислові IoT-рішення безпосередньо в навчальному середовищі;

7. «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади» - вивчення цієї дисципліни передбачає формування навичок точного вимірювання фізичних величин, опрацювання результатів експериментів і критичної оцінки похибок. Конструкція стенду передбачає можливість підключення додаткових сенсорних модулів, зокрема датчиків відстані (дальномірів), кутових переміщень, обертів або лінійного положення. Це дозволяє моделювати різні вимірювальні задачі та на практиці опрацьовувати методи калібрування, аналіз метрологічних характеристик і взаємодію з аналоговими та цифровими сигналами, що формує у студентів фундаментальні компетентності у сфері технічних вимірювань;

8. «Системи управління базами даних» - вивчення дисципліни формує у студентів знання щодо структури, принципів роботи та розробки баз даних, а також навички створення прикладного програмного забезпечення для обробки та зберігання інформації. У межах роботи зі стендом зручно реалізовувати локальні бази даних, зокрема SQLite, що дозволяє зберігати дані про зміну параметрів електропривода, фіксувати події, результати вимірювань або помилки системи. Інтеграція СУБД у програмне забезпечення на Python дає змогу забезпечити автономність, зручність доступу до інформації, а також базову аналітику - що цілком відповідає вимогам сучасних комп'ютеризованих систем управління;

9. «Теорія автоматичного управління» - завдяки можливостям запропонованого стенду студенти можуть на практиці реалізовувати та моделювати типові задачі з автоматичного регулювання, будувати структурні та функціональні схеми систем управління, оцінювати їх стійкість, точність і динамічні характеристики, зокрема перехідні процеси. Робота з реальним виконавчим механізмом типу "гвинт-гайка" дозволяє дослідити вплив регуляторів на поведінку об'єкта, що сприяє глибшому розумінню теоретичних аспектів побудови аналогових, імпульсних і цифрових систем автоматичного керування, а також дозволяє закріпити навички розробки й оптимізації алгоритмів регулювання.

Таким чином, стенд слугує універсальним навчальним засобом, що дозволяє інтегрувати знання студентів із різних освітніх компонентів у межах єдиної платформи. Це значно підвищує мотивацію студентів, дозволяє формувати цілісне уявлення про функціонування автоматизованих систем і сприяє практичній підготовці випускників до умов виробництва.

1.3 Мета, завдання та методичні принципи побудови стенду

Розробка та впровадження навчального стенду є одним з ключових елементів забезпечення якісної інженерної освіти в галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Основною метою створення стенду є формування практичних компетентностей у студентів, які передбачають роботу з реальними компонентами систем автоматизованого керування, програмування прикладного забезпечення та налагодження інтерфейсів взаємодії між апаратурою та програмним середовищем.

Створення навчального стенду має на меті:

1. Забезпечити наочне уявлення студентів про роботу виконавчих механізмів типу "гвинт-гайка" з електроприводом;
2. Дати можливість реалізувати практичні задачі автоматизованого регулювання, побудови функціональних схем, моделювання об'єктів керування;
3. Сформувані базові навички у проєктуванні, модифікації та тестуванні програмно-апаратних рішень з використанням відкритих протоколів обміну та вільно доступного програмного забезпечення.

Основними завданнями розробки стенду є:

1. Створення універсальної апаратної бази, здатної імітувати типові виробничі ситуації;
2. Реалізація підтримки найпоширеніших протоколів промислового зв'язку, зокрема Modbus RTU по інтерфейсу RS-485, що відповідає рекомендаціям методичних вказівок до проєктування систем автоматизації [4];
3. Надання можливості розробки та відлагодження алгоритмів керування засобами високорівневого програмування (наприклад, Python);

4. Інтеграція вимірювальних датчиків та інтерфейсів для побудови замкнених систем автоматичного регулювання.

Окрему увагу при створенні стенду приділено методичним принципам, які визначають ефективність його використання в освітньому процесі.

Модульність. Конструкція стенду повинна бути реалізована таким чином, щоб дозволяло швидко змінювати або доповнювати його складові частини. Наприклад, можлива заміна електродвигуна на інший тип або підключення додаткових виконавчих пристроїв. Це забезпечує гнучкість використання стенду в умовах лабораторного експерименту, дозволяючи викладачу адаптувати завдання під конкретний навчальний курс або рівень підготовки студентів.

Універсальність. Стенд призначений для широкого спектру дисциплін, що охоплюють електропривод, мікроконтролери, комп'ютерні мережі, бази даних, теорію автоматичного регулювання, web-програмування та інші суміжні напрями. Це забезпечує його багаторазове використання в рамках навчального процесу і створює передумови для міждисциплінарного навчання.

Відкритість архітектури. Одним з методичних пріоритетів є використання відкритих апаратних і програмних рішень: мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4, мова програмування Python, база даних SQLite, графічна бібліотека CustomTkinter. Це дає змогу студентам вивчати сучасні технології, які є актуальними на ринку праці, а також розширювати функціональність системи без потреби у спеціалізованому дорогому програмному забезпеченні.

Наближеність до реальних промислових умов. Стенд дозволяє моделювати типові виробничі процеси, зокрема керування асинхронним двигуном за допомогою мікрокомп'ютер Raspberry Pi через частотний перетворювач із застосуванням протоколу Modbus RTU [5]. Вивчення роботи інтерфейсів, моделювання впливу навантаження, аналіз стабільності та перехідних процесів формують у студентів навички, наближені до реального інженерного середовища.

Безпечність і наочність. Усі елементи стенду реалізовані з урахуванням вимог електробезпеки та ергономіки. Візуалізація стану системи, доступ до

основних параметрів через екран інтерфейсу, світлодіодна індикація й інші засоби зворотного зв'язку забезпечують кращу взаємодію користувача зі стендом. Це сприяє підвищенню ефективності навчального процесу, знижує ризики технічних помилок та формує свідоме ставлення до експлуатації автоматизованих систем.

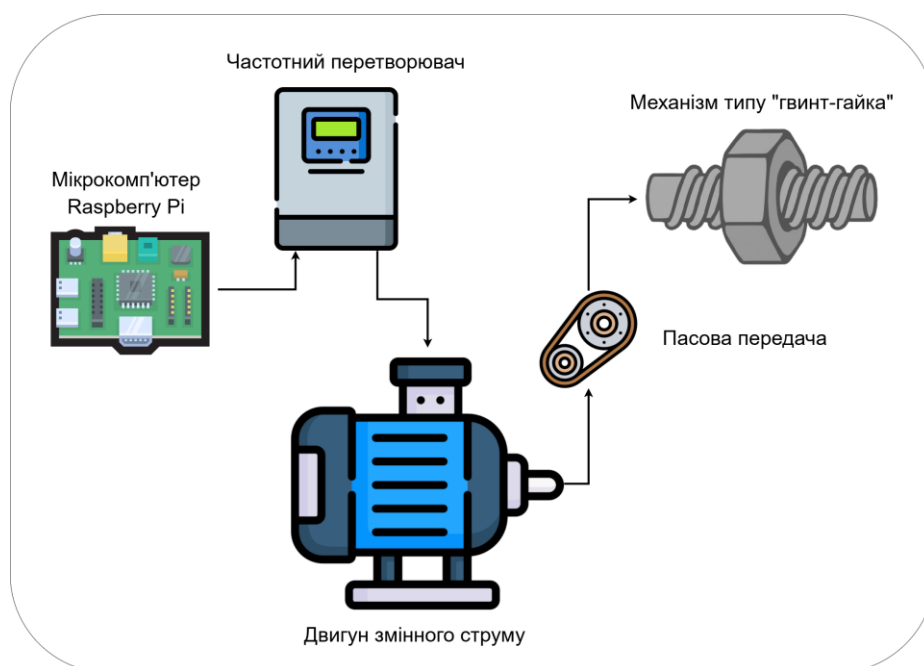


Рисунок 1.5 Спрощена принципова схема навчального стенду

На рисунку 1.5 зображено спрощену схему навчального стенду для керування виконавчим механізмом типу «гвинт-гайка». Мікрокомп'ютер Raspberry Pi керує частотним перетворювачем, який регулює роботу двигуна змінного струму. Обертання двигуна передається на механізм через пасову передачу, забезпечуючи наочну демонстрацію принципів автоматизованого електроприводу.

Таким чином, підхід до побудови навчального стенду поєднує в собі принципи практичності, адаптивності та інженерної логіки. Це дозволяє використовувати його як інструмент для всебічної підготовки фахівців, здатних працювати в умовах цифрової трансформації сучасної промисловості.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Принцип роботи виконавчого механізму типу гвинт гайка

У лабораторному стенді реалізовано конфігурацію з обертовим гвинтом та поступальною гайкою, що була обрана з огляду на її конструкційну простоту, експлуатаційну надійність та достатню точність переміщення. Така схема є доцільною для використання в навчальних цілях, оскільки дозволяє ефективно демонструвати основи кінематичних перетворень та принципи побудови систем автоматизованого керування.

Завдяки своїй простоті, надійності та високій точності переміщення, механізми типу "гвинт-гайка" є широко вживаними у промисловості для задач:

- позиціонування об'єктів у координатних системах (наприклад, у верстатах із ЧПК);
- подачі заготовок або інструментів у механізмах автоматизації;
- підйому або опускання вантажу з контрольованою швидкістю;
- виконання зусиль, де потрібна передача великого навантаження без проковзування.

Механізм типу "гвинт-гайка", що зображений на рисунку 2.1, належить до поступально-обертальних передач, основним призначенням яких є перетворення обертального руху в поступальний. Конструктивно такий вузол складається з гвинта з нарізаною прямокутною різьбою та гайки, яка переміщується вздовж осі обертання гвинта. Прямокутна різьба характерна для передач, де важливе ефективне перетворення обертального руху в поступальний з мінімальними втратами на тертя, зокрема в механізмах з великим навантаженням або в напрямних приводах (рис. 2.2).

У лабораторному стенді гвинт жорстко закріплений у підшипникових опорах так, щоб мати можливість вільно обертатися навколо власної осі, але не зміщуватися поступально (рис. 2.3). Гвинт наводиться в рух електродвигуном

змінного струму через пасову передачу, яка передає крутний момент зі шківа на валу двигуна (рис. 2.4 а). на шків, закріплений на гвинті (рис. 2.4 б).



Рисунок 2.1 Загальний вигляд навчального стенду



Рисунок 2.2 Гвинт виконавчого стенду

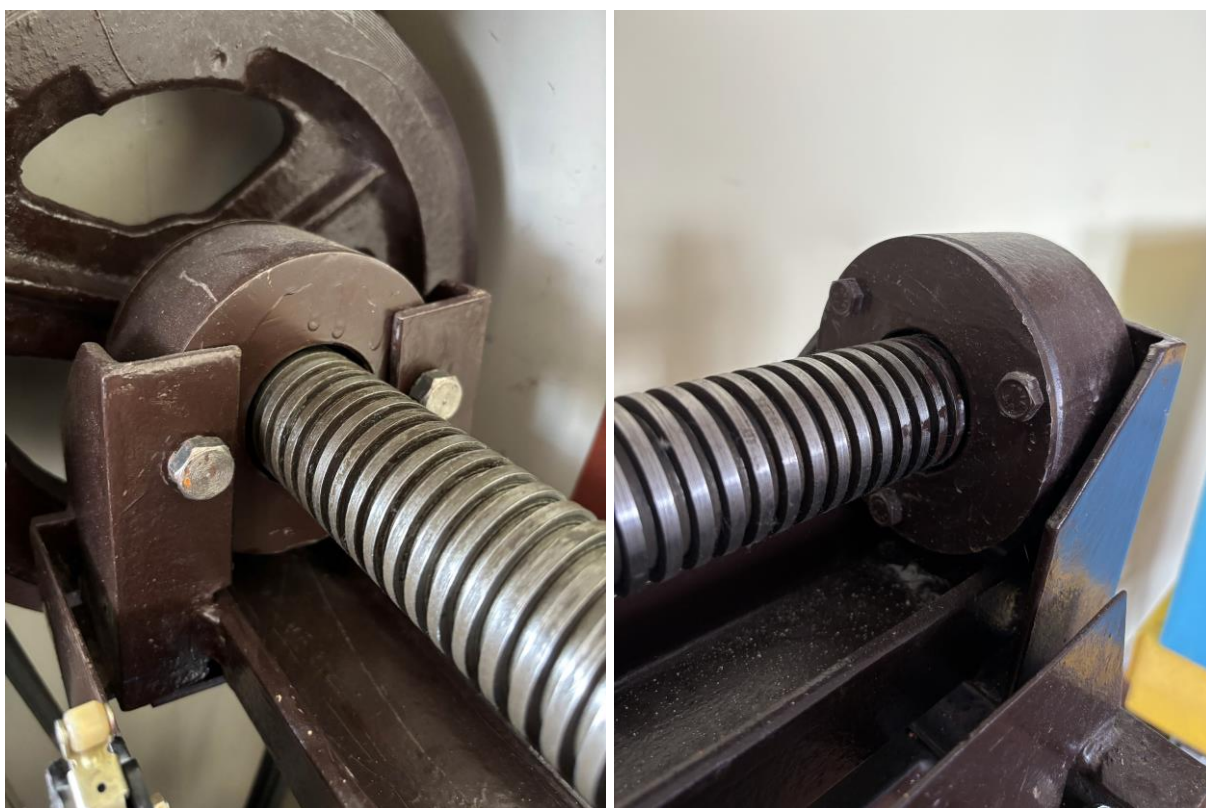
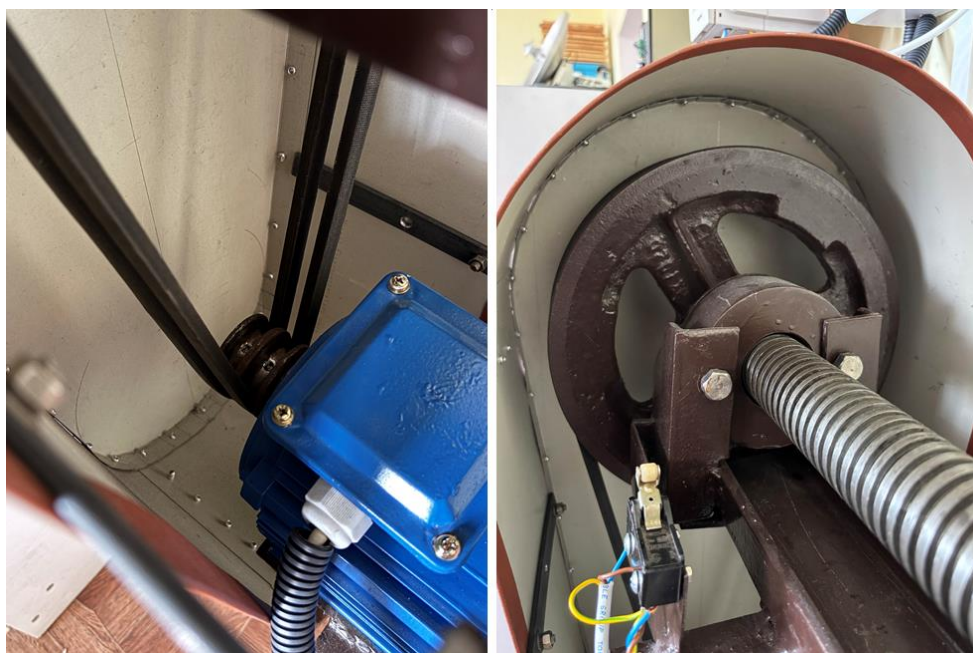


Рисунок 2.3 Підшипникові опори гвинта виконавчого механізму



а)

б)

Рисунок 2.4 Передача крутного моменту: а) шків на валу двигуна;
б) шків на гвинті

Гайка, навпаки, має обмеження від обертання, але може вільно переміщуватися вздовж осі гвинта. При обертанні гвинта гайка за рахунок зчеплення з різьбою здійснює лінійний рух, і, відповідно, разом із нею переміщується і рухома частина виконавчого механізму, закріплена на гайці. Така конструкція забезпечує прямолінійне переміщення робочої платформи або виконавчого елемента без потреби в додаткових напрямних або передачах.

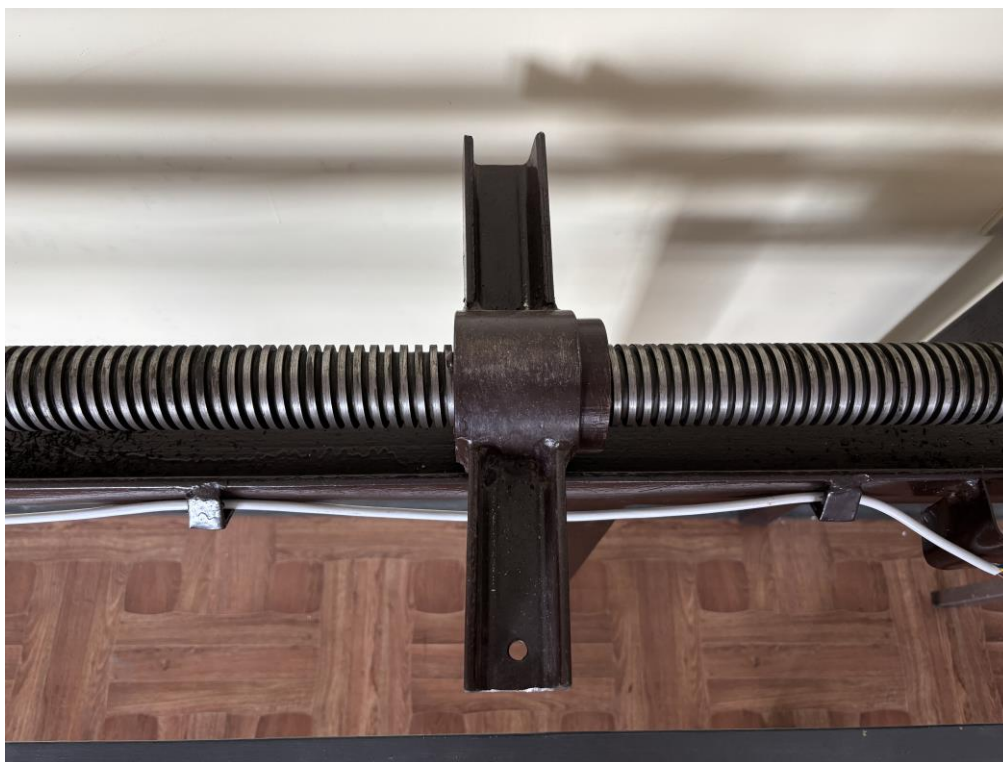


Рисунок 2.5 Рухома гайка виконавчого механізму

У представленому навчальному стенді передача руху від двигуна до виконавчого механізму реалізована через класичну пасову (ремінну) передачу, що з'єднує вал АД зі шківом, закріпленим на обертовому гвинті. Такий спосіб передавання крутного моменту є простим, надійним і зручним у технічному обслуговуванні, а також має низку функціональних переваг, які роблять його особливо придатним для використання в навчальних стендах.

Зокрема, пасова передача виконує декілька ключових функцій:

- Редукція обертів: ремінна передача дозволяє зменшити швидкість обертання гвинта відносно вала двигуна, що є необхідним для досягнення

оптимальної швидкості поступального переміщення гайки без перевантаження механізму або втрати точності позиціонування;

- Поглинання вібрацій: еластичність ременя виконує роль демпфера, що зменшує передавання пульсацій, ударів або коливань від двигуна до виконавчого механізму, тим самим знижуючи загальний рівень шуму і зносу вузлів;
- Захист двигуна: у випадку заклинювання або перевантаження виконавчого механізму ремінь може проскочити, частково виконувавши роль запобіжного елемента, що захищає двигун від механічного пошкодження;
- Гнучкість передаточного числа: заміна шківів дозволяє легко змінити передаточне число без складних конструктивних змін, що відкриває можливість налаштування швидкісних характеристик стенду під різні експериментальні задачі.

Таким чином, використання пасової передачі в даному стенді забезпечує баланс між простотою реалізації, функціональністю та довговічністю експлуатації, що є особливо важливим у контексті навчального застосування.

Обертовий рух передається на гвинт із прямокутною різьбою, який закріплений в опорах. По гвинту переміщується гайка, яка жорстко з'єднана з платформою виконавчого механізму. Таким чином, під дією обертового моменту від двигуна забезпечується поступальний рух платформи вздовж напрямної. Стенд дозволяє студентам практично ознайомитися з принципами роботи механічного приводу, особливості динаміки виконавчого механізму, зокрема змінність навантаження під час руху, що є характерним для реальних промислових систем, дослідити вплив частоти обертання двигуна на лінійну швидкість переміщення, а також оцінити кінематичні й силові параметри системи в реальному часі [6, 7].

2.2 Вибір компонентів стенду

2.2.1 Частотний перетворювач

Частотні перетворювачі (ЧП), або інвертори, є ключовими пристроями в системах автоматизованого електроприводу. Їх функція полягає у перетворенні стандартної мережевої змінної напруги фіксованої частоти у напругу змінної частоти та амплітуди, яка подається на електродвигун. Це дозволяє не лише змінювати швидкість обертання двигуна, але й значно знижувати енерговитрати в системі.

Для реалізації системи керування асинхронним двигуном змінного струму використовується ЧП моделі E500-4T0015(B) виробництва компанії Simphoenix Electric (рис. 2.6). Застосування частотного перетворювача дозволяє здійснювати гнучке керування швидкістю обертання електродвигуна, забезпечуючи при цьому необхідну плавність, точність та адаптивність у роботі виконавчого механізму [8].



Рисунок 2.6 ЧП Simphoenix Electric E500-4T0015(B)

Модель E500-4T0015(B) була обрана для реалізації стенду з огляду на її технічні характеристики, функціональність, підтримку промислових інтерфейсів та доступність на ринку. Пристрій забезпечує ефективне керування та повністю відповідає вимогам стенду.

Основні технічні характеристики частотного перетворювача E500-4T0015(B):

- Тип живлення: трифазне, 380 В AC $\pm 15\%$, 50/60 Гц
- Номінальна потужність: 1.5 кВт
- Номінальний струм: 4.2 А
- Тип двигуна: асинхронний двигун змінного струму
- Діапазон вихідної частоти: 0.00–650.00 Гц
- Метод керування: V/F керування, векторне керування без зворотного зв'язку (SVC), моментне керування
- Перевантажувальна здатність: 150 % від номінального струму протягом 60 секунд
- Інтерфейс зв'язку: вбудований Modbus RTU (RS-485)
- Цифрові входи: 6 (програмовані)
- Аналогові входи: 2 (0–10 В, 4–20 мА)
- Цифрові виходи: 1 реле + 1 транзисторний
- Захист: захист від перенавантаження, перегріву, короткого замикання, втрати фази тощо
- Робоча температура: $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (без зниження параметрів)



Рисунок 2.7 Паспортна табличка частотного перетворювача Simphoenix E500-4T0015(B)

Після вибору частотного перетворювача наступним важливим етапом є його правильне підключення до елементів системи автоматизованого управління. Оскільки перетворювач виступає центральною ланкою у контурі регулювання частоти обертання АД, важливо забезпечити коректне електричне з'єднання як з живленням і навантаженням, так і з пристроєм керування. У контексті лабораторного стенду керування виконавчим механізмом типу "гвинт-гайка" така інтеграція виконується з урахуванням специфіки використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi, цифрових інтерфейсів зв'язку та загальних вимог безпеки експлуатації.

На рисунку 2.8 зображена схема базового підключення частотного перетворювача, яка охоплює всі основні типи управління та контролю.

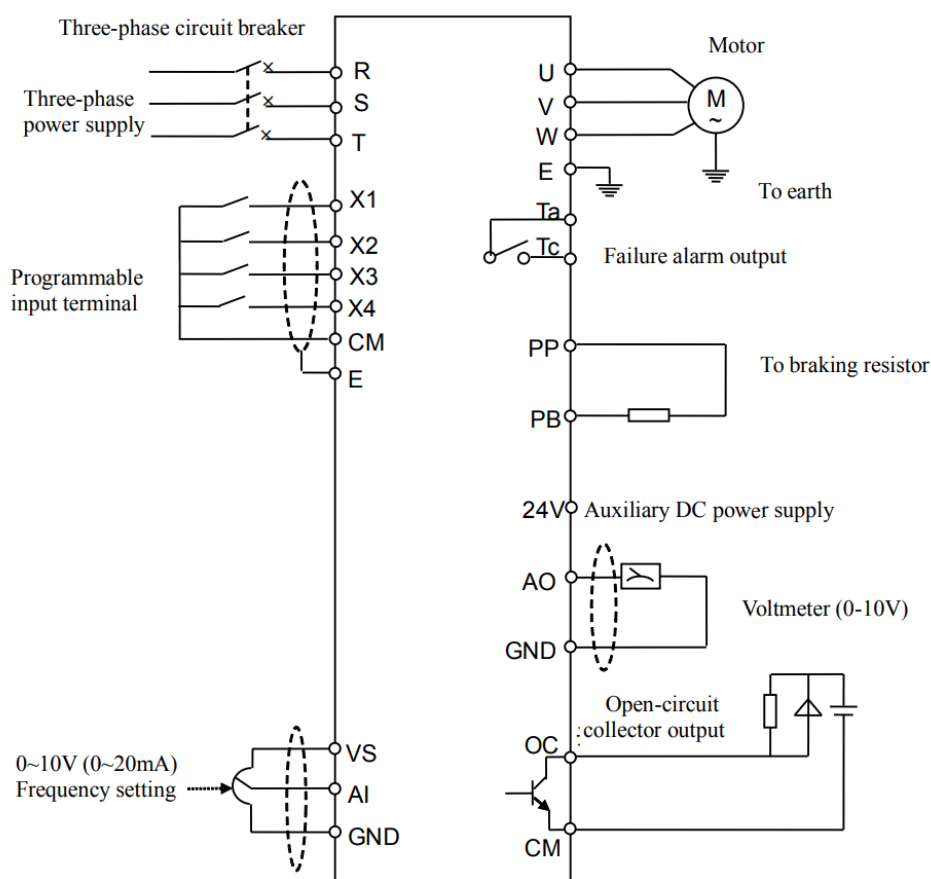


Рисунок 2.8 Загальна схема базового підключення ЧП

ЧП підключається до трифазної мережі живлення через автоматичний вимикач на клеми R, S, T, а керування обертами трифазного АД здійснюється через

вихідні клеми U, V, W. Для реалізації аналогового керування частотою передбачено вхід AI (аналоговий сигнал 0–10 В або 4–20 мА), з потенціалом, що задається через клеми VS (опорна напруга) та GND (загальна земля). Це дає змогу регулювати швидкість обертання двигуна за допомогою зовнішнього потенціометра або модуля керування.

Додатково присутні програмовані цифрові входи X1–X4, які можуть бути налаштовані для реалізації логіки керування: запуск, зупинка, реверс, перемикання режимів тощо. Ці входи мають спільну землю CM. Додатково для реалізації керування програмованими цифровими входами X1–X4 частотного перетворювача було спроектовано блок кнопок, що містить перемикачі фіксованої та нефіксованої дії (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 Блок кнопок фіксованої та нефіксованої дії для керування входами X1–X4 ЧП

Для зворотного зв'язку передбачено аналоговий вихід АО (0–10 В) для моніторингу поточних параметрів, наприклад, вихідної частоти або швидкості двигуна, який можна підключити до вольтметра або АЦП мікроконтролера. Присутній і вихід ОС - відкритий колектор - що слугує для передачі сигнальної інформації про стан інвертора (наприклад, помилка, аварія тощо).

Вбудоване джерело живлення 24V дозволяє жити зовнішні схеми управління. Для гальмування двигуна передбачені клеми PP та PV, до яких може бути підключений гальмівний резистор. Додатково виведено контакти Та-Тс для формування сигналу аварійного реле.

Таким чином, дана схема демонструє можливість реалізації як аналогового, так і дискретного керування, а також зчитування стану ЧП для побудови замкненого циклу керування.

Рисунок 2.10 ілюструє схему підключення живлення до частотного перетворювача E500-4T0015(B) та з'єднання з трифазним асинхронним двигуном. На схемі показано основні силові клеми пристрою: клеми R, S, T для підключення трифазної мережі живлення 380 В, клеми U, V, W - для підключення навантаження (двигуна), а також гвинтову клему заземлення E. Додатково представлено можливість підключення гальмівного резистора до клем PP і PB. Схема також включає захист мережі за допомогою трифазного автоматичного вимикача.

Applicable models : E500-2S00015(B)~E500-2S0022(B) &
E500-4T00007(B)~E500-4T0022 (B)

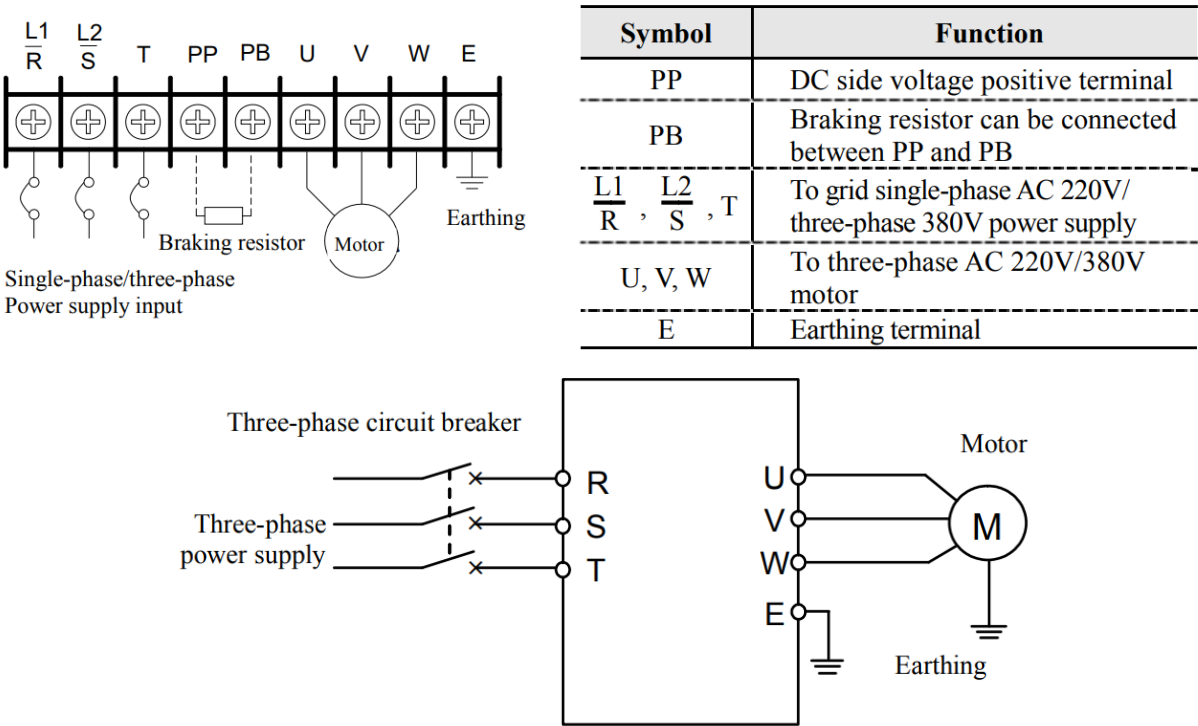


Рисунок 2.10 Схема підключення живлення та двигуна до ЧП E500-4T0015(B)

Однією з головних переваг E500-4T0015(B) є вбудований інтерфейс RS-485, для отримання команд встановлення частоти від верхнього комп'ютера або головного інвертора через послідовний порт, що забезпечує зручну інтеграцію з

мікрокомп'ютером Raspberry Pi, який виступає керуючим вузлом у системі. Для реалізації зв'язку з ЧП за допомогою послідовного інтерфейсу RS-485 використовуються клеми RS+ (A) та RS- (B), що розташовані на панелі терміналів керування пристроєм (рис. 2.11). Завдяки підтримці відкритого протоколу Modbus RTU, можлива реалізація повноцінного обміну даними: встановлення частоти, запуск або зупинка двигуна, зчитування діагностичної інформації, контроль температури, струму, напруги та ін.

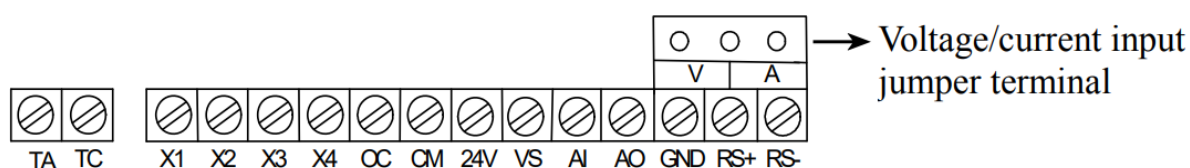


Рисунок 2.11 Схема терміналу контуру керування

Принципова конструкція перетворювача включає зручну фронтальну панель із цифровим індикатором, кнопками керування, регулятором частоти та інтерфейсом індикації параметрів роботи (струм, напруга, частота) (рис 2.12 і рис 2.13) . На рисунку 2.14 подано габаритні розміри пристрою у двох проекціях - фронтальній та боковій, що дозволяє врахувати необхідний простір для монтажу на робочому місці лабораторного стенду.

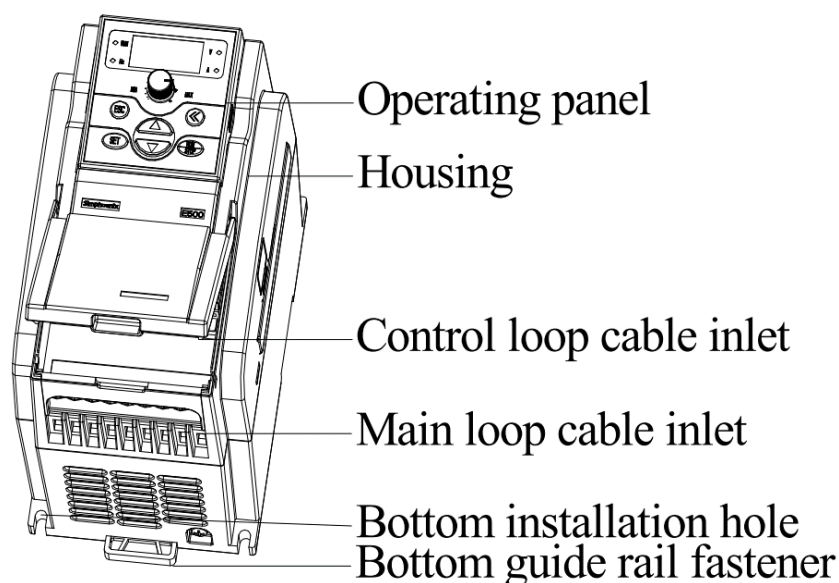


Рисунок 2.12 Елементи конструкції ЧП

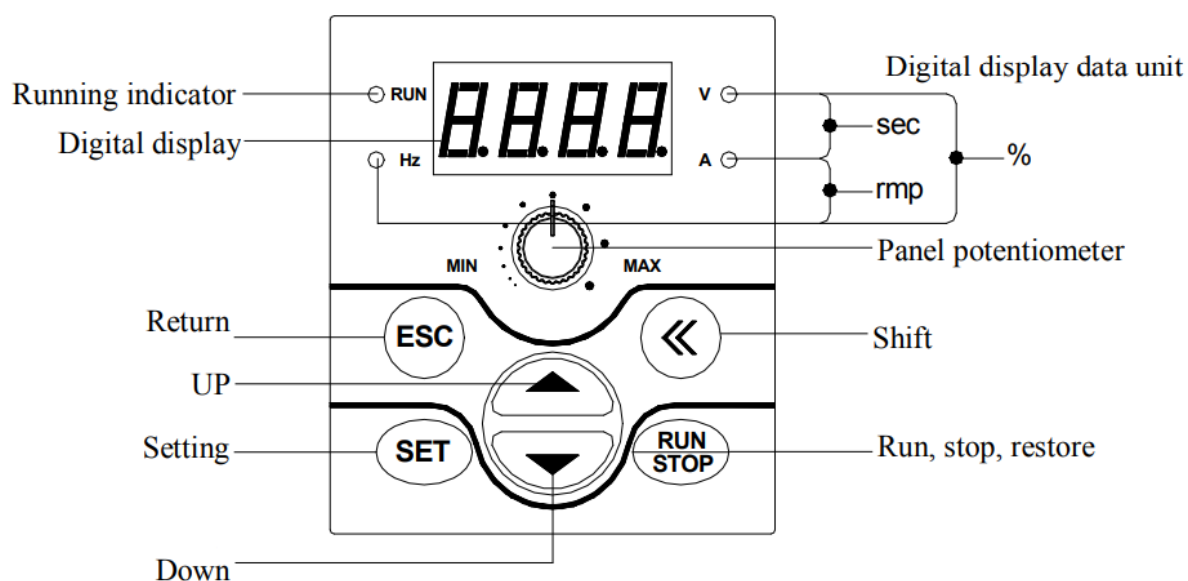


Рисунок 2.13 Панель керування ЧП

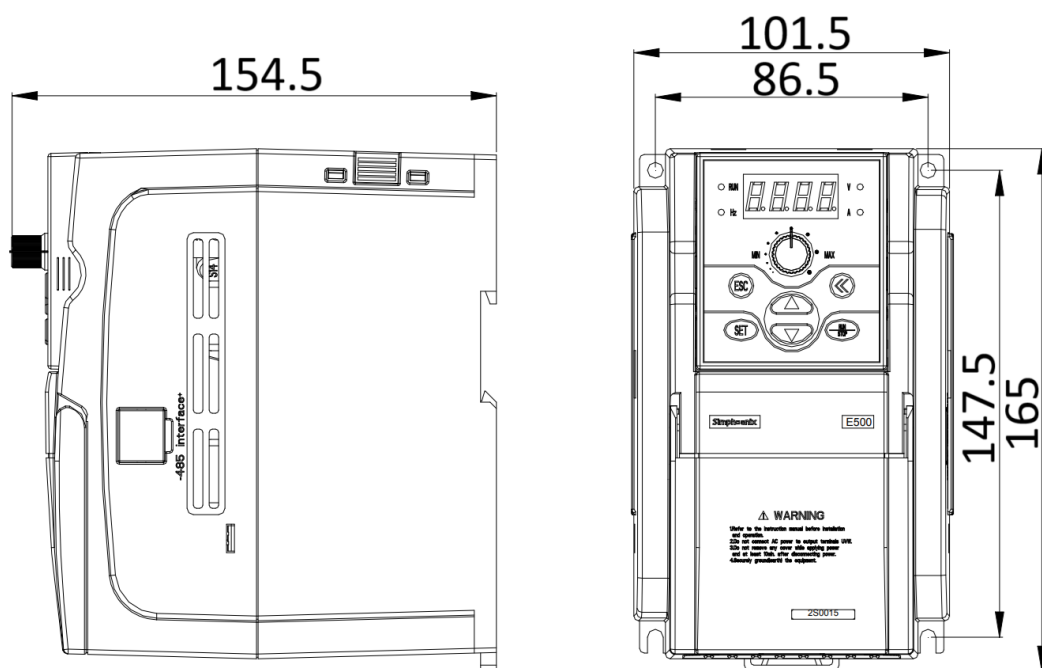


Рисунок 2.14 Габаритні розміри та компонування ЧП

Переваги використання ЧП у навчальному стенді:

1. Гнучке регулювання швидкості обертання: завдяки зміні частоти живлення двигуна досягається точне регулювання поступального переміщення гайки виконавчого механізму типу "гвинт-гайка";

2. Інтеграція з цифровими системами керування: підтримка Modbus RTU дозволяє здійснювати зв'язок з Raspberry Pi та іншими мікропроцесорними пристроями із використанням компактного RS-485/UART перетворювача сигналів;

3. Підвищення енергоефективності: частотне регулювання дозволяє знизити споживання електроенергії при роботі з низькими навантаженнями або в режимі очікування;

4. Захист двигуна: вбудовані функції захисту продовжують термін служби двигуна, захищаючи його від перегріву, перевантаження та короткого замикання;

5. Зручність у налаштуванні: інтуїтивно зрозуміла панель керування з цифровим дисплеєм дозволяє змінювати параметри прямо з пристрою, а також вести ручне управління під час налагоджувальних робіт або демонстраційних занять;

6. Надійність та компактність: перетворювач має компактні розміри та придатний для настінного або вбудованого монтажу, що важливо для лабораторних умов.

Використання у навчальному процесі: У рамках роботи зі стендом студенти мають змогу на практиці:

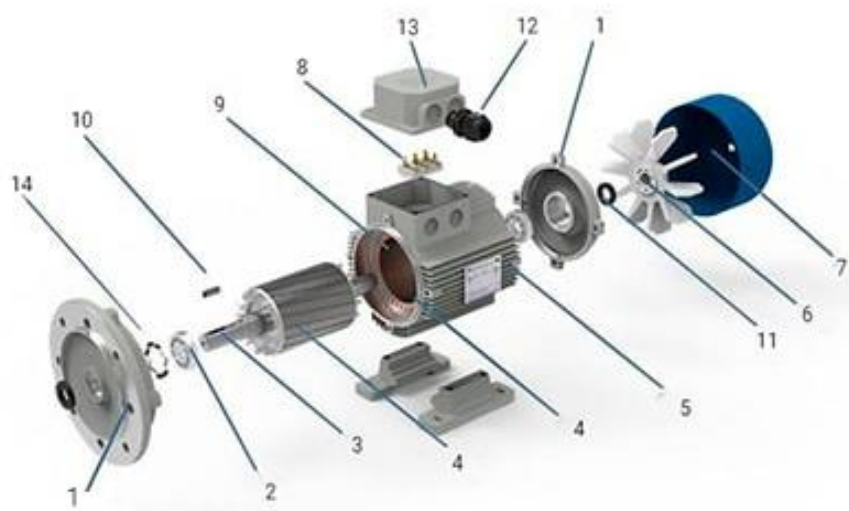
- встановлювати та змінювати частоту обертання двигуна;
- зчитувати параметри роботи електроприводу через Python-інтерфейс;
- налаштовувати комунікацію по протоколу Modbus;
- спостерігати вплив частоти на швидкість та динаміку руху виконавчого механізму;
- відлагоджувати алгоритми запуску, зупинки, аварійного відключення.

Таким чином, застосування частотного перетворювача E500-4T0015(B) забезпечує не лише функціональність і надійність стенду, а й є важливим інструментом для набуття практичних компетентностей у сфері цифрового електроприводу, промислової автоматизації та систем реального часу.

2.2.2 Двигун змінного струму

Однією з ключових складових у складі лабораторного стану є електричний двигун, що слугує джерелом обертального руху для приводу виконавчого механізму. Вибір типу двигуна напряму впливає на технічні характеристики стану, такі як стабільність, динаміка руху, енергоспоживання та наочність експлуатації. З огляду на навчальні цілі та вимоги до експлуатаційної надійності, у проєкті реалізовано використання двигуна змінного струму, що дозволяє ефективно імітувати умови реального промислового середовища.

Для забезпечення обертального руху в лабораторному стенді було обрано трифазний АД типу АИР80А2 У2, який є одним із найпоширеніших типів електромеханічних приводів у промисловості. АД з короткозамкненим ротором вирізняються простою та надійною конструкцією (рис 2.15), невисокою вартістю, низьким рівнем обслуговування і стійкістю до перевантажень, що



1. Підшипникові шти – чавун
2. Шарикопідшипник
3. Вал зі шпонковим пазом
4. Ротор з мідною обмоткою
5. Корпус із поздовжніми охолодними ребрами
6. Вентилятор (крильчатка)
7. Кожух, алюмінієвий сплав – силумін

8. Клемна панель
9. Статор – мідні обмотки, електротехнічна сталь.
10. Шпонка
11. Манжета
12. Кабельний ввід
13. Клемна коробка (борно)
14. Стопорне кільце

Рисунок 2.15 Конструктивна будова асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

робить їх оптимальними для лабораторних і навчальних задач. Технічні параметри електродвигуна, наведені на рисунку 2.16 та в таблиці 2.1, повністю узгоджуються з експлуатаційними вимогами до лабораторного стенду, та забезпечують його ефективну та стабільну роботу.



Рисунок 2.16 Паспортна табличка асинхронного електродвигуна

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики електродвигуна АИР80А2

Характеристики електродвигуна АИР80А2		Значення
Група значень	Найменування характеристики	
Вихідні параметри	Потужність P , кВт	1.5
	Фактична частота обертання валу N_{ϕ} , об/хв	2850
Параметри живлення	Тип мережі, частота	Трифазна, 50 Гц
	Напруга живлення U_{Δ}/Y , Вольт	220/380
	Номінальна сила струму I_n при 220В/380В, Ампер	5.9/3.46
	Співвідношення пускового струму та номінального I_p/I_n	7.0
Паспортні данні	Принцип дії	Асинхронний
	Коефіцієнт потужності $\cos \phi$	0.84
	ККД, %	78.5
	Число полюсів	2
	Момент інерції, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0.0011
	Вага, кг	11.5

Експлуатаційні обмеження	Режим роботи	тривалий S1
	Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54
	Термічний клас ізоляції обмоток (нагрівостійкість), °C	F – до 150
	Рівень шуму, Дб	до 72
Обертаючий момент	Номінальний крутний момент, Нм	4.974
	Відношення максимального моменту, що крутить, до номінального M_{MAX} / M_H	2.3
	Відношення пускового моменту, що крутить, до номінального M_P / M_H	2.2
ДСТУ	Ступені захисту, забезпечувані цілісною конструкцією обертових електричних машин (IP-код)	ДСТУ IEC60034-5:2005

Двигун розміщено в нижній частині металевої рами станду та встановлено на спеціальну платформу, яка забезпечує жорстке кріплення та точне позиціонування (рис. 2.17). Такий підхід дозволяє уникнути паразитних вібрацій і забезпечити надійну передачу моменту. Вал двигуна з'єднаний зі



Рисунок 2.17 Конструктивне закріплення трифазного двигуна в системі приводу станду

шківом пасової передачі, що, у свою чергу, передає обертальний момент на шків, закріплений на гвинті виконавчого механізму. Завдяки використанню клинопасової передачі досягається плавний запуск і зупинка, а також часткове демпфування механічних навантажень, що виникають під час зміни напрямку або швидкості обертання. Це рішення підвищує довговічність вузлів і дозволяє більш точно моделювати умови реальної експлуатації електроприводу.

Для забезпечення живлення трифазного асинхронного електродвигуна типу АИР80А2 У2 використовується стандартне підключення до трифазної електромережі з номінальною напругою 380 В. Підключення здійснюється за схемою «зірка» або «трикутник» залежно від режиму експлуатації та параметрів мережі. З'єднання проводиться через клемну панель, де до затискачів підключаються фазні провідники, а корпус двигуна заземлюється відповідно до вимог електробезпеки. Для правильного під'єднання на внутрішній стороні кришки клемної панелі зображено схему під'єднання обмоток статора (U1, V1, W1, U2, V2, W2) (рис 2.18). У лабораторному стенді застосовується схема підключення «зірка», що є типовим варіантом для двигунів з номінальною напругою 380 В при частоті 50 Гц (рис 2.19). Такий спосіб підключення забезпечує стабільну роботу приводу та дозволяє здійснювати його керування через частотний перетворювач.



Рисунок 2.18 Схема з'єднання обмоток електродвигуна "зірка" та "трикутник" на кришці клемної коробки

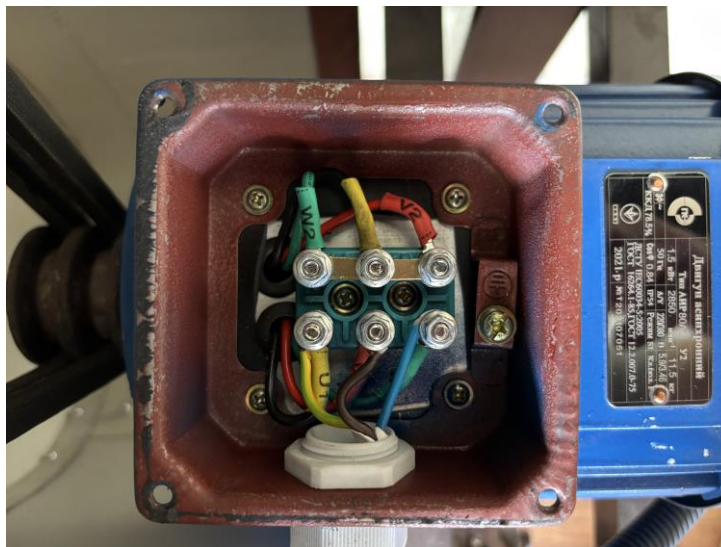


Рисунок 2.19 Підключення обмоток електродвигуна за схемою "зірка" у клемній панелі

Таким чином, використання асинхронного електродвигуна типу АИР80А2 У2 у складі лабораторного стенду є технічно обґрунтованим рішенням, що забезпечує необхідний рівень надійності, ефективності та безпеки при моделюванні обертального руху виконавчого механізму. Вибраний двигун відповідає параметрам частотного перетворювача і демонструє стійку роботу в лабораторних умовах. Простота обслуговування, доступність у промисловості та відповідність сучасним стандартам робить цей тип приводу оптимальним для використання в освітніх і навчально-дослідницьких цілях.

2.2.3 Безпека, кнопки та індикатори

Система безпеки лабораторного стенду є важливим елементом конструкції, що забезпечує не лише безпечне підключення та експлуатацію обладнання, а й захист користувача від ураження електричним струмом та аварійного пошкодження обладнання. Реалізована схема, що зображена на рисунку 2.20, охоплює ключові вузли комутації, індикації, аварійної зупинки та ручного керування.

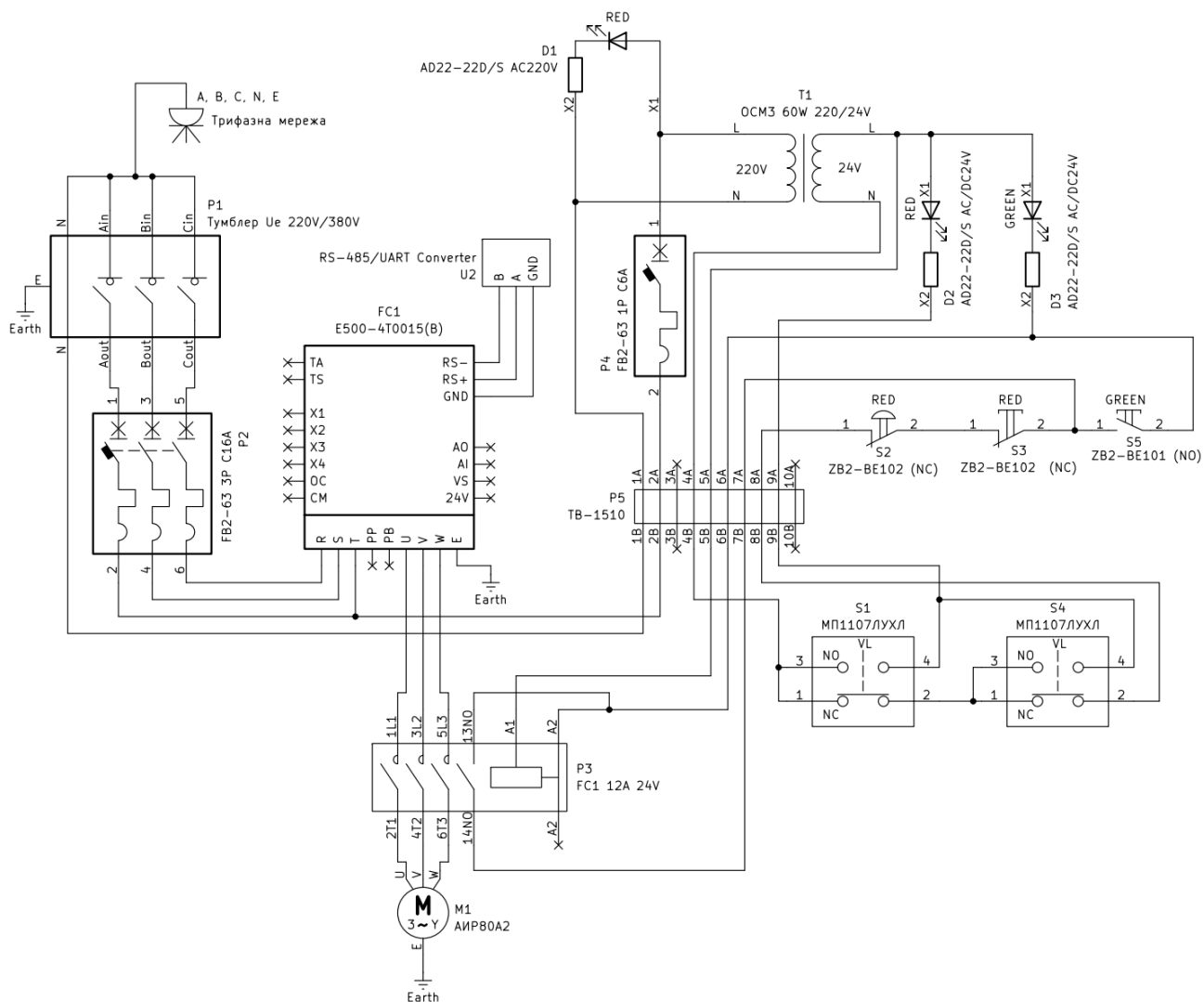


Рисунок 2.20 Принципова електрична схема живлення, керування та захисту лабораторного станду

Для реалізації системи живлення, керування та безпеки лабораторного станду було обрано відповідні електротехнічні компоненти, кожен з яких виконує визначену функцію в загальній структурі станду.

- P1 - тумблер 220V/380V (рис 2.21), використовується як головний комутаційний елемент для подачі або зняття напруги живлення на вхідну частину електричної схеми станду.
- P2 - автоматичний вимикач FB2-63 3P C16A забезпечує захист трифазного силового кола від перевантажень і коротких замикань, гарантуючи безпечну експлуатацію частотного перетворювача та двигуна.

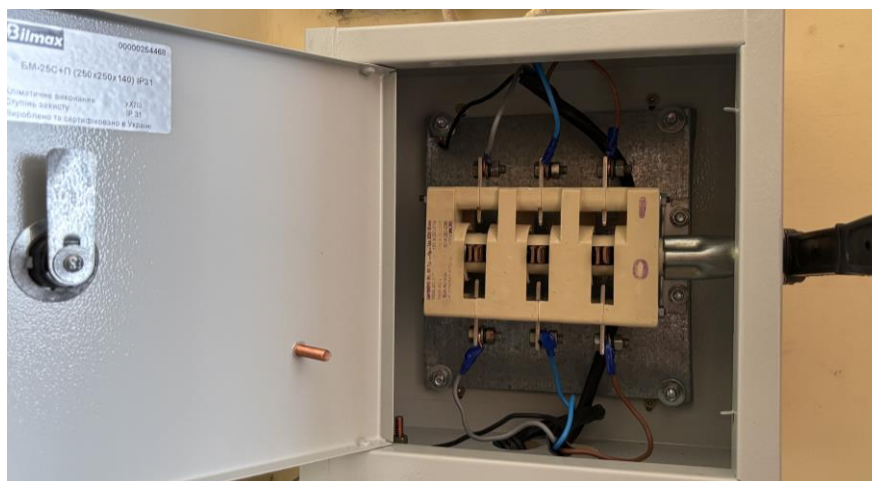


Рисунок 2.21 Тумблер 220V/380V

- P3 - магнітний пускач FC1 на струм 12 А з котушкою 24 В виконує функцію вмикання та вимикання двигуна. Він також бере участь у схемі аварійного відключення.
- P4 - автоматичний вимикач FB2-63 1P C6A встановлюється у колі живлення для первинної обмотки понижуючого трансформатора 24В і забезпечує захист низьковольтної частини схеми (керування, індикація).
- P5 - клемна колодка ТВ-1510 використовується для зручного та впорядкованого з'єднання провідників у схемі керування, забезпечуючи простоту монтажу й обслуговування.
- Т1 - понижуючий трансформатор ОСМ3 60 Вт (220/24 В) знижує напругу з 220 В до безпечного рівня 24 В для живлення системи керування, індикаторів, кнопок і пускачів.
- D1 - світлодіодний індикатор AD22-22D/S AC220V сигналізує про наявність напруги у силовій частині стенду, що підвищує наочність і безпеку експлуатації.
- D2, D3 - Світлодіодний індикатор AD22-22D/S AC/DC24V використовується у низьковольтному колі для індикації режимів роботи (наприклад, включення, аварія).
- S1, S4 - кінцеві вимикачі МП1107ЛУХЛ, що мають нормально замкнуту і нормально розімкнуту пари, виконують функцію апаратного обмеження

ходу виконавчого механізму, забезпечуючи його автоматичну зупинку при досягненні крайніх положень.

- S2, S3 - кнопка ZB2-BE102 (NC) - це нормально замкнута кнопка (розмикання при натисканні), яка використовується для аварійного вимкнення або зупинки.
- S5 - кнопка ZB2-BE101 (NO) - це нормально розімкнута кнопка (замикання при натисканні), яка використовується для запуску двигуна активувавши магнітний пускач.
- Раніше розглянуті у підрозділах 2.2.1 і 2.2.2 трифазний асинхронний двигун АИР80А2 (на схемі - М1) та ЧП E500-4T0015(B) (на схемі - FC1), що служить для регулювання частоти і напруги, забезпечуючи змінну швидкість обертання вала згідно з програмним керуванням.

Зазначені компоненти формують повноцінну систему електроживлення, індикації, аварійного захисту та ручного керування, яка відповідає вимогам безпеки та функціональності лабораторного стенду.

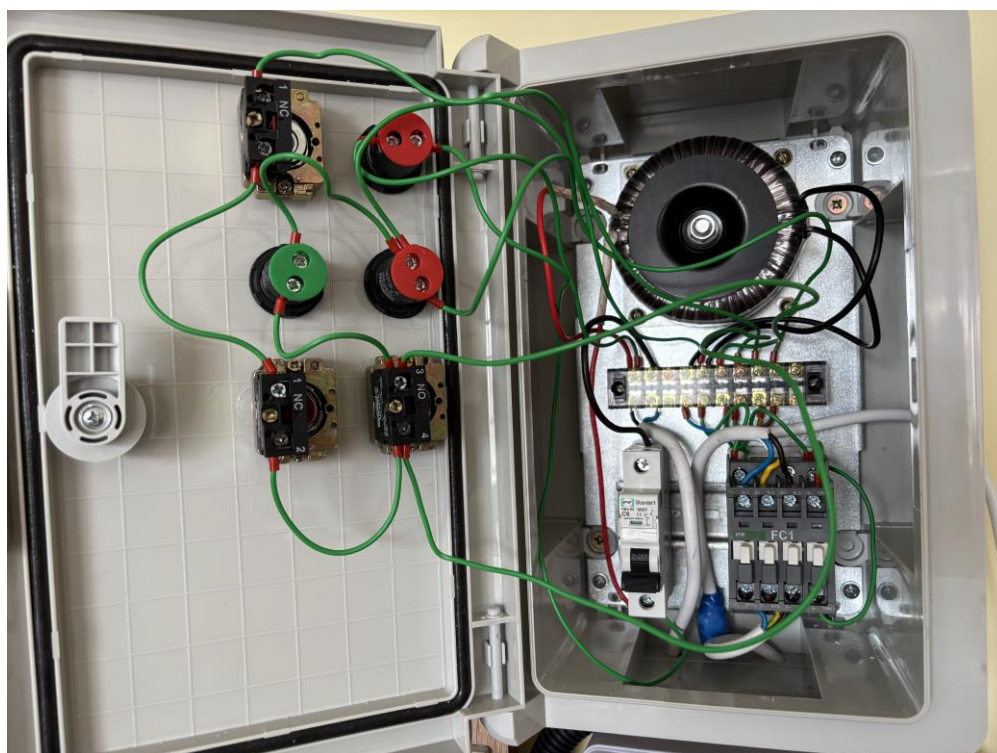


Рисунок 2.22 Реалізація внутрішнього монтажу елементів системи безпеки та індикації

Подача електроживлення до лабораторного стенду починається з увімкнення тумблера Р1, що слугує головним комутаційним елементом, через який надходить напруга живлення з трифазної мережі (380 В). Після цього електроенергія надходить на трифазний автоматичний вимикач Р2, який виконує функцію захисту силового кола від перевантажень і коротких замикань.

Від вхідного автоматичного вимикача паралельно знімається одна з фаз та нуль для формування допоміжного кола живлення блоку індикації та системи керування. Фаза додатково проходить через однополюсний автомат Р4, який забезпечує захист ланцюгів низької напруги, після чого підключається до живлення індикатора D1, що сигналізує про наявність напруги в мережі. Одночасно ця ж фаза подається на первинну обмотку понижувального трансформатора Т1, який знижує напругу до 24 В змінного струму для використання в колі керування.

Вихідна напруга трансформатора використовується для живлення магнітного пускача Р3 (котушка на 24 В), а також ланцюгів індикації аварійного стану й готовності до роботи. Один із полюсів вторинної обмотки трансформатора з'єднаний з загальною точкою схеми за допомогою клемної колодки Р5 (контакти 4А і 4В), тоді як інший – розгалужується на три основні напрямки:

1. Ланцюг індикації аварійного стану: напруга подається на анод світлодіодного індикатора D2, катод якого підключено до кінцевих вимикачів S1 і S4, що замикають коло на загальну точку контакту 4В клемної колодки Р5 лише в аварійній ситуації (наприклад, при досягненні крайніх положень виконавчого механізму). Таким чином, індикатор D2 загоряється лише за умови спрацювання одного з кінцевиків, вказуючи на аварійний стан системи, при якому подальша робота стає неможливою.

2. Ланцюг індикації готовності до роботи: напруга з трансформатора подається на нормально розімкнуту кнопку S5. При її натисканні коло замикається, і напруга надходить на котушку магнітного пускача Р3. Одночасно активується індикатор D3, який сигналізує про готовність двигуна

до роботи. Після активації пускач РЗ замикає власні контакти, формуючи самоутримувальне коло через додаткову групу контактів 13NO і 14NO – за умови, що не спрацювали кнопки аварійного зупинення.

3. Ланцюг аварійного вимкнення: у колі самоутримання магнітного пускача послідовно встановлено дві нормально замкнуті кнопки S2 і S3 – відповідно, аварійна кнопка типу «грибок» та стандартна кнопка зупинки. При натисканні будь-якої з них коло розривається, котушка магнітного пускача знеструмлюється, і він повертається у вимкнений стан, розмикаючи силове коло живлення двигуна та сигналізуючи про зупинку.

Після активації магнітного пускача контакти силового кола замкнені, і частотний перетворювач FC1 передає напругу на трифазний асинхронний двигун М1, що забезпечує обертальний рух. Уся логіка ввімкнення, аварійного реагування та сигналізації реалізована через елементи на низькій напрузі (24 В), що підвищує рівень електробезпеки.

Таким чином, розглянута схема забезпечує не лише базове живлення приводу, а й реалізує повноцінну систему індикації станів, аварійного зупинення, автоматичного блокування роботи при аваріях, що гарантує безпечну та контрольовану експлуатацію лабораторного стенду.

2.2.4 Мікрокомп'ютер

Для реалізації інтелектуального керування лабораторним стендом, а також для забезпечення гнучкого інтерфейсу користувача, як центральний обчислювальний вузол було обрано мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B (рис. 2.23). Завдяки поєднанню компактності, високої продуктивності та широких можливостей розширення, цей пристрій є ідеальним вибором для навчальних і лабораторних автоматизованих систем [9].

Raspberry Pi 4 - це четверте покоління популярної серії одноплатних мікрокомп'ютерів, розроблених Raspberry Pi Foundation. У даній конфігурації використовується модель Raspberry Pi 4 Model B з 4 ГБ оперативної пам'яті, що забезпечує достатній обсяг ресурсів для одночасного виконання задач збору

даних, комунікації через Modbus RTU, обробки команд користувача та візуалізації параметрів.

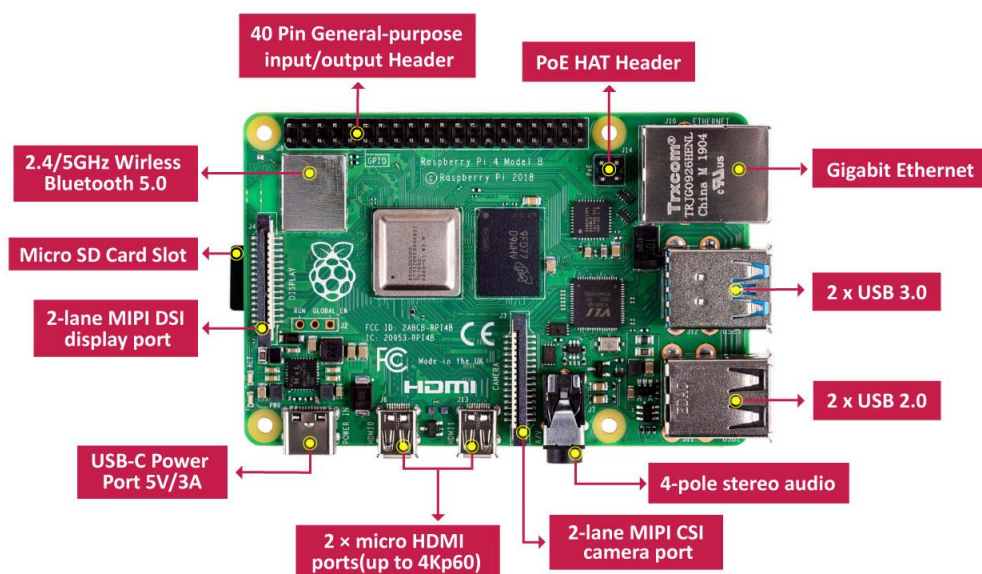


Рисунок 2.23 мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B

Основні технічні характеристики:

- Процесор: Broadcom BCM2711, 4-ядерний ARM Cortex-A72 (64-bit), 1.5 ГГц;
- Оперативна пам'ять: 4 ГБ LPDDR4 SDRAM;
- Графіка: VideoCore VI GPU, підтримка OpenGL ES 3.0;
- Порти USB: 2×USB 3.0, 2×USB 2.0;
- Підключення дисплея: 2×Micro HDMI (до 4K);
- Зберігання даних: microSD (підтримка UHS-I);
- Мережеві інтерфейси: Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0;
- GPIO: 40 контактів для підключення зовнішніх пристроїв;
- Живлення: USB-C, 5 В, до 3 А.

У межах розробленого лабораторного стенду мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 виконує низку важливих функцій, зокрема: виступає майстром протоколу Modbus RTU для обміну даними з ЧП E500-4T0015(B) через USB-UART/RS-485

перетворювач; забезпечує роботу користувацького інтерфейсу, реалізованого мовою Python із застосуванням бібліотеки CustomTkinter; здійснює прийом сигналів від кнопок, кінцевих вимикачів та інших елементів керування (рис. 2.24); а також може виконувати функції реєстрації та збереження робочих параметрів у базу даних (наприклад, SQLite) або у форматі JSON для подальшої обробки.

Такий підхід дозволяє реалізувати універсальну, гнучку й масштабовану платформу для керування та моніторингу виконавчого механізму в навчальному процесі, як це реалізовано на подібному стенді [10].

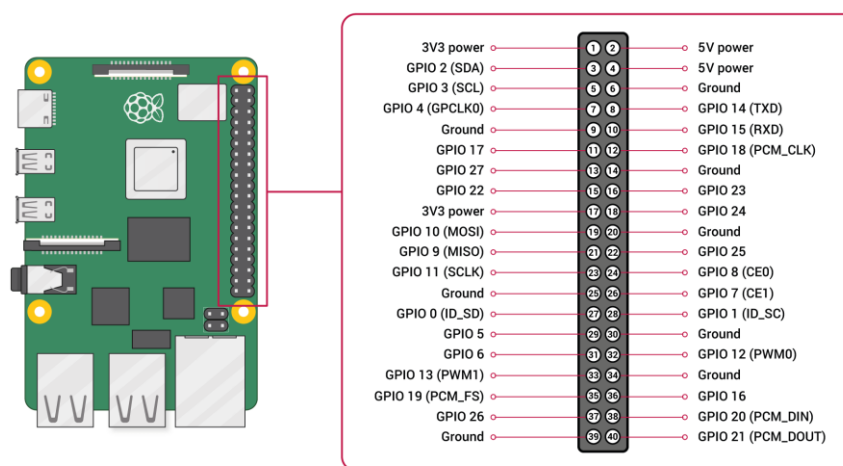


Рисунок 2.24 Схема розташування контактів GPIO на платі Raspberry Pi 4 Model B

Завдяки вбудованому Wi-Fi, система може бути доповнена функціоналом віддаленого доступу, що особливо актуально для дистанційних лабораторних занять або адміністрування стенду.

Приклад, у дослідженні [11] використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi у задачах автоматизованого моніторингу бджолиних сімей демонструє високий потенціал мікрокомп'ютера для реальних IoT-рішень і наукових досліджень, що підтверджує доцільність її застосування в інженерних розробках.

Використання Raspberry Pi 4 у складі стенду дозволяє значно розширити функціонал системи без додаткових витрат. Його обчислювальні ресурси й відкритість до програмування роблять можливим подальше доповнення

функціоналу системи, наприклад, введення журналювання параметрів, підключення до хмарних сервісів або побудову веб-інтерфейсу.

2.3 Комунікація мікрокомп'ютера з частотним перетворювачем

Надійна та завадостійка передача даних між пристроями є критичним елементом у системах автоматизації, особливо коли мова йде про зв'язок між мікроконтролерами та виконавчими механізмами. На коротких відстанях підключення до виконавчих пристроїв часто реалізується через інтерфейси з окремою синхронізуючою лінією, де передача інформації узгоджується з тактовими імпульсами — типовими прикладами таких протоколів є RS-232 та RS-485 [12]. Для забезпечення взаємодії між мікрокомп'ютером Raspberry Pi 4 та ЧП Simphoenix E500-4T0015(B) у лабораторному стенді реалізовано послідовну комунікацію за протоколом Modbus RTU, що функціонує поверх фізичного інтерфейсу RS-485.

Інтерфейс RS-485 (Recommended Standard 485) є широко використовуваним стандартом для послідовної передачі даних у промислових автоматизованих системах керування. Його основною перевагою є можливість реалізації диференційованого передавання сигналу, що забезпечує високу завадостійкість. RS-485 підтримує напівдуплексний режим роботи, де передавання й приймання даних відбуваються по одній парі провідників (А і В), що дозволяє підключати до однієї шини до 32 (а в деяких випадках — до 128 і більше) пристроїв.

Інтерфейс дозволяє передавати дані зі швидкістю до 10 Мбіт/с на коротких відстанях, при цьому зберігаючи цілісність сигналу завдяки низькому рівню електромагнітних спотворень. Його використання є ідеальним для середовищ із високим рівнем електричних завад, таких як промислові установки, де розміщено численні двигуни, реле та інше силове обладнання. Саме тому RS-485 часто застосовується у протоколах типу Modbus RTU, де необхідна стабільна та точна передача команд і даних між головним

мікроконтролером (наприклад, Raspberry Pi) та виконавчими пристроями, такими як частотні перетворювачі або контролери.

Передача даних між мікрокомп'ютером і частотним перетворювачем здійснюється через USB-UART адаптер з підтримкою RS-485, що на апаратному рівні базується на мікросхемі MAX485, яка реалізує диференціальний інтерфейс. Для цього використовується стандартна пара ліній RS+ (A) та RS- (B). Адаптер підключено до USB-порту Raspberry Pi, який, у свою чергу, програмно ініціалізується як /dev/ttyUSB0 або подібний порт.

Обмін даними здійснюється за допомогою протоколу Modbus RTU (Remote Terminal Unit), який є бінарним протоколом із суворою структурою кадру (рис. 2.25). Кожне повідомлення (кадр) у цьому протоколі має чітко визначений формат, що дозволяє пристроям-учасникам (майстер–слейв) точно ідентифікувати, обробляти та відповідати на запити. Основні поля кадру Modbus RTU включають:

1. Slave ID (1 байт) - це адреса пристрою, до якого надсилається запит. У нашій системі це зазвичай значення 0x01, що означає, що звернення здійснюється до одного конкретного пристрою (частотного перетворювача). Кожен пристрій у мережі RS-485 має унікальний ідентифікатор, і лише той пристрій, чия адреса відповідає вказаній у кадрі, обробляє запит і надсилає відповідь.

2. Function Code (1 байт) - визначає, яку саме операцію слід виконати. Наприклад:

- 0x03 - читання кількох регістрів, а саме: функціональних параметрів, стану роботи, параметрів моніторингу та повідомлень про несправності кількох інверторів, а також максимум 6 параметрів інвертора з безперервною адресою одночасно.
- 0x06 - запис одного регістра
- 0x10 - запис кількох регістрів.

Цей код визначає подальшу структуру поля Data, оскільки кожна функція вимагає різного обсягу інформації, що і зображено на рисунках 2.26 - 2.28.

3. Data (2 байт) - це поле містить додаткову інформацію, потрібну для виконання функції, вказаної в Function Code. Наприклад, при читанні даних тут буде:

- 2 байти - адреса початкового регістра,
- 2 байти - кількість регістрів для зчитування.

При записі одного регістра - це:

- 2 байти - адреса регістра,
- 2 байти - значення, яке потрібно записати.

Таким чином, вміст і довжина цього поля залежать від типу операції.

4. CRC (Cyclic Redundancy Check, 2 байти) - контрольна сума, що розраховується за алгоритмом CRC-16 (із поліномом 0xA001). CRC забезпечує перевірку цілісності всіх попередніх байтів повідомлення. Цей механізм критично важливий у промислових умовах, де можливі електромагнітні завади - будь-яка зміна бодай одного біта у кадрі призведе до невірного CRC і відкидання повідомлення пристроєм-приймачем.

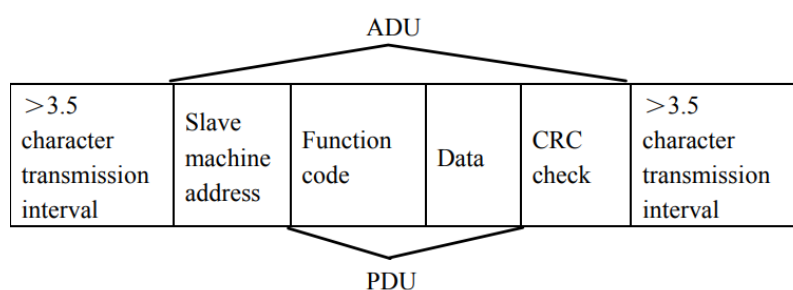


Рисунок 2.25 Структура кадру протоколу Modbus RTU

Sent by main machine:

PDU PART	03	Register initial address		Number of registers	
		High	Low	High	Low
Data length (Byte)	1	1	1	1	1

Slave machine response:

PDU PART	03	Number of reading bytes (2*Number of registers)	Reading content
Data length (Byte)	1	1	2*Number of registers

Рисунок 2.26 Структура кадрів запиту та відповіді для функції 03

Sent by main machine:

PDU PART	06	Register initial address		Register data	
		High	Low	High	Low
Data length (Byte)	1	1	1	1	1

Slave machine response:

PDU PART	06	Register initial address		Register data	
		High	Low	High	Low
Data length (Byte)	1	1	1	1	1

Рисунок 2.27 Структура кадрів запиту та відповіді для функції 06

Sent by main machine:

PDU PART	10	Register initial address		Number of registers		Content byte count	Register content
		High	Low	High	Low		
Data length (Byte)	1	1	1	1	1	1	2*Number of registers

Slave machine response:

PDU PART	10	Register initial address		Number of registers	
		High	Low	High	Low
Data length (Byte)	1	1	1	1	1

Рисунок 2.28 Структура кадрів запиту та відповіді для функції 10

Завдяки цій структурі протокол Modbus RTU дозволяє створювати надійну і ефективну систему зв'язку між головною машиною та інвертором, включаючи надсилання команди роботи до інвертора, встановлення робочої частоти, перезапис параметра функціонального коду, зчитування робочого стану інвертора, параметрів моніторингу, повідомлення про несправність та параметр функціонального коду [8].

2.4 Проєктування прикладного програмного забезпечення для управління стендом

Для забезпечення ефективної взаємодії користувача з лабораторним стендом та реалізації функцій керування частотним перетворювачем необхідно розробити спеціалізоване прикладне програмне забезпечення, яке виконуватиметься на мікрокомп'ютері Raspberry Pi 4. Цей пристрій буде обрано завдяки своїй компактності, енергоефективності, широким можливостям введення/виведення та підтримці повноцінної операційної системи Linux, Raspberry Pi OS, що забезпечить зручне середовище для розробки, тестування та розгортання програмного продукту [13, 14].

Під час проєктування програмного забезпечення слід передбачити модульну архітектуру, яка умовно розділятиме програму на три основні рівні: графічний інтерфейс користувача (GUI), логіку керування та обробки даних, а також апаратний рівень взаємодії через інтерфейс RS-485. Така структура забезпечить високу масштабованість, зручність підтримки та можливість подальшого розвитку системи. Між модулями повинна бути реалізована чітка система викликів і передачі параметрів, яка унеможливить перехресні конфлікти та полегшить відлагодження.

Розробка програмного забезпечення здійснюватиметься мовою Python, оскільки вона є однією з найзручніших для побудови прототипів, інтеграції з апаратною частиною, розробки графічних інтерфейсів, а також має детально структуровану офіційну документацію, що забезпечує ефективну підтримку розробника на всіх етапах реалізації [15].

Для створення GUI планується використати бібліотеку CustomTkinter, яка дозволить створити сучасне віконне середовище з кастомізованими віджетами, кнопками, формами введення, вкладками тощо [16]. Це дозволить реалізувати зручну навігацію між основними сторінками: головною, налаштувань параметрів, моніторингу стану, керування частотою, командам операцій та повідомленням про помилки.

Для реалізації функції позиціонування необхідно врахувати можливість фізичного визначення крайніх положень виконавчого механізму. З цією метою

до Raspberry Pi 4 підключаються кінцеві вимикачі типу ME-8169, які з'єднуються з GPIO-портами через резисторні дільники, що забезпечують захист та стабільність сигналу. На рисунку 2.29 представлено схему підключення двох кінцевиків до контактів GPIO20 та GPIO21 через резистори обмеження струму та підтягування. Кожен кінцевий вимикач має як нормально відкриті (NO), так і нормально закриті (NC) контакти, що дозволяє програмно відстежувати момент досягнення крайнього положення - початкової або кінцевої позиції. Програмне забезпечення повинно періодично перевіряти стани цих входів і при активації одного з них зупиняти переміщення, фіксуючи відповідну позицію. Такий підхід підвищує безпеку позиціонування та виключає перевищення межі ходу виконавчого механізму.

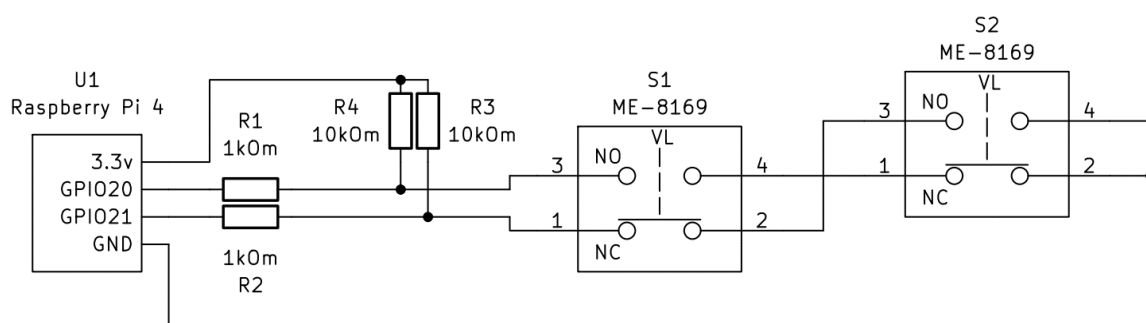


Рисунок 2.29 Схема підключення кінцевих вимикачів до Raspberry Pi 4 для контролю положення

Для зберігання інформації про параметри зчитування, формат подання значень (HEX/DEC), масштабні коефіцієнти та інші конфігурації буде використано вбудовану реляційну базу даних SQLite. Ця система не потребує окремого сервера, що є зручним для вбудованих систем на кшталт Raspberry Pi. Дані з БД зчитуватимуться при завантаженні відповідної сторінки та оновлюватимуться після змін користувачем.

Передбачається реалізувати обмін із ЧП Simphoenix E500 через протокол Modbus RTU. Передача даних відбуватиметься через USB-UART/RS-485 перетворювач, який фізично з'єднує Raspberry Pi з ЧП. Для цього буде створено окремий модуль communication.py, який відповідатиме за побудову кадрів

згідно з протоколом (включаючи адресацію Slave ID, функціональний код, дані та CRC-контрольну суму). Окремий модуль `crc.py` реалізовуватиме обчислення контрольної суми згідно з алгоритмом CRC-16.

CRC CHECK:

CRC CHECK	CRC Low	CRC High
Data length (Byte)	1	1

CRC CHECK function is shown as below:

```
unsigned int crc_chk_value(unsigned char *data_value, unsigned char length)
{
    unsigned int crc_value=0xFFFF;
    int i;
    while(length--)
    {
        crc_value^=*data_value++;
        for(i=0;i<8;i++)
        {
            if(crc_value&0x0001)
                crc_value=(crc_value>>1)^0xA001;
            else
                crc_value=crc_value>>1;
        }
    }
    return(crc_value);
}
```

Рисунок 2.30 Алгоритм обчислення CRC-16 для перевірки цілісності даних у протоколі Modbus RTU

На рисунку 2.30 зображено таблицю формату CRC-перевірки (двобайтовий контрольний код CRC Low та CRC High) та реалізацію функції обчислення CRC-16 у вигляді прикладу на мові C. Алгоритм використовує стандартну поліноміальну маску `0xA001` та початкове значення `0xFFFF`. Ця функція послідовно обробляє кожен байт вхідного масиву `data_value`, зсувом і умовним XOR, щоб отримати остаточне 16-бітове контрольне значення, яке прикріплюється до Modbus RTU кадру з метою перевірки цілісності переданих даних.

Зчитування параметрів з ЧП буде організоване у вигляді циклічного опитування: користувач відзначатиме в GUI потрібні регістри, а програма надсилатиме запити типу:

[→] 01 03 D006 0001 CRC

та прийматиме відповідь, яку далі аналізуватиме з урахуванням масштабного коефіцієнта. Наприклад, значення 123 у регістрі D006 буде інтерпретовано як 12.3 Гц, якщо коефіцієнт дорівнює 0.1. Результати зчитування будуть відображені у вікні моніторингу в реальному часі.

Програмне забезпечення також включатиме режим ручного введення Modbus-команд, реалізований у вигляді консолі на головній сторінці. Всі запити користувача (наприклад 01 06 1001 0001 для запуску) та відповіді пристрою повинні виводитись у цій області, що дасть змогу проводити діагностику і тестування без змін основного інтерфейсу.

Особливу увагу необхідно приділити багатопотоковості. Усі операції зчитування та запису мають бути винесені у фонові потоки, щоб не блокувати головний потік, в якому працює GUI. Для безпечного оновлення елементів інтерфейсу з інших потоків слід використовувати метод `after()`, рекомендований для Tkinter. Також важливо реалізувати механізми безпечної зупинки опитування при зміні вкладки, натисканні кнопки "Стоп" або завершенні роботи додатку.

Програма повинна мати логічно поділену структуру: окремі файли для реалізації GUI кожної сторінки, окремі модулі для обробки бази даних, CRC, формування Modbus-запитів, а також логіку взаємодії з периферією. Такий підхід дозволить у майбутньому легко масштабувати проєкт, додавати нові функції або адаптувати його під інші типи ЧП без повного переписування програми.

Таким чином, успішне проєктування прикладного програмного забезпечення вимагатиме продуманого поділу на логічні шари, обґрунтованого вибору інструментів розробки, врахування вимог до інтерфейсу та стабільної роботи з апаратними пристроями через інтерфейс RS-485. Очікується, що отримане рішення забезпечить гнучкий, інтуїтивний інтерфейс та надійне керування лабораторним стендом у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Структура прикладного програмного забезпечення та принцип його роботи

Розроблене прикладне програмне забезпечення виконує функцію інтерактивного інструменту для управління лабораторним стендом, основними компонентами якого є асинхронний електродвигун, частотний перетворювач типу SIMPHOENIX E500 та елементи системи зворотного зв'язку (кінцевики, кнопки, індикатори тощо). Програма забезпечує повноцінну взаємодію користувача з обладнанням через інтерфейс RS-485 на базі протоколу Modbus RTU у режимі реального часу.

У процесі розробки прикладного ПЗ було враховано основні принципи, викладені в методичних матеріалах [17], зокрема структуру циклічної програми, механізми взаємодії з апаратними засобами через таймери, опитування та обробку подій, що дозволяє підвищити стабільність і передбачуваність виконання керуючих дій у системах, які не є RTOS, але реалізують принципи квазіреального часу.

На першому етапі роботи здійснюється узгодження параметрів зв'язку між програмою та частотним перетворювачем. У відповідності до документації SIMPHOENIX E500 Series, вручну налаштовуються регістри групи F4, що визначають протокол комунікації. Зокрема:

1. F4.00 - встановлює параметри протоколу зв'язку: швидкість обміну (19200 біт/с), перевірка парності, формат кадру, тощо;
2. F4.01 - локальна адреса пристрою в мережі (у нашому випадку: 1);
3. F4.02 - затримка відповіді після отримання кадру, встановлена в 5 мс;
4. F4.03 - налаштування режиму роботи інвертора (підлеглий, поведінка при збої тощо), обране значення - 0010;
5. F4.04 - таймер втрати зв'язку (1.0 с);

6. F4.05 - коефіцієнт передачі частоти від головного до підлеглого інвертора (1.0, якщо стенд працює автономно).

Після узгодження параметрів зв'язку запускається GUI. У випадку першого запуску програми або втрати/видалення бази даних, першим етапом є заповнення вкладок: "Параметри функцій", "Моніторинг стану", "Команди операцій", "Налаштування частоти", "Поточний стан інвертора", "Повідомлення про помилку". Кожна з цих вкладок містить таблиці, в які необхідно занести адреси регістрів, текстові описи, одиниці виміру, коди команд, можливі повідомлення про помилки, значення коефіцієнтів масштабування та формат відображення даних (HEX або DEC). Важливо зазначити, що деякі регістри повинні зчитуватись або записуватись виключно у HEX-форматі, без перетворення у десяткову систему, тому правильне заповнення кожного поля згідно з технічною документацією на частотний перетворювач SIMPHOENIX E500 є критично важливим для коректної роботи всієї системи. Дані автоматично структуруються у таблицях у вбудованій базі даних sqlite3, після чого програма потребує її перезапуску для ініціалізації оновлених параметрів.

Після повторного запуску ПЗ автоматично визначається COM-порт з доступним з'єднанням до частотного перетворювача, здійснюється завантаження конфігурації з бази даних. Програма послідовно зчитує всі наявні у таблиці registers параметри, ініціалізуючи початковий стан GUI. Через низьку швидкість обміну (19200 біт/с) процес ініціалізації займає деякий час, проте дозволяє уникнути помилок та отримати актуальні значення.

Основна логіка управління реалізована за принципом подієво-орієнтованої архітектури. Інтерфейс програми реагує на дії користувача - введення частоти, вибір напрямку, натискання кнопок запуску/зупинки - та запускає відповідні функції. Наприклад:

1. введення частоти в поле – створення та відправка запиту 0x06 на запис у регістр частоти;

2. вибір напрямку – відповідна команда на встановлення режиму FWD/REV;

3. натискання “Пуск” – послідовна відправка всіх необхідних команд (частота, напрямок, запуск);

4. натискання “Стоп” – команда зупинки інвертора.

Окрім базових функцій запуску та зупинки двигуна, програмне забезпечення реалізує режим позиціонування, який дозволяє керувати виконавчим механізмом у напрямку до початкової або кінцевої позиції. Для цього доступні кнопки плавного переміщення вліво та вправо, а також окремі команди на перехід у встановлені крайні точки. Стан позицій контролюється через кінцеві вимикачі, підключені до GPIO Raspberry Pi, що дозволяє точно зупинити механізм при досягненні меж.

Щоб забезпечити стійку та безперебійну роботу в режимі реального часу, у програмі реалізовано багатопотокову архітектуру. Уся взаємодія з частотним перетворювачем, включаючи надсилання та зчитування даних, здійснюється в окремих фонових потоках, що дозволяє повністю розвантажити основний графічний потік. Головний потік програми відповідає виключно за відображення та взаємодію з GUI, а моніторинг параметрів виконується у фоновому потоці, що опитує пристрій із визначеним інтервалом. Оскільки CustomTkinter не підтримує пряме оновлення від сторонніх потоків, дані передаються до інтерфейсу через механізм `after()`, що дозволяє синхронно оновлювати елементи GUI без зависань або помилок. Такий підхід гарантує, що користувач має змогу змінювати вкладки, натискати кнопки та взаємодіяти з додатком навіть під час активного обміну даними з ЧП.

Після надсилання команди запуску двигуна автоматично активується моніторинг основних параметрів частотного перетворювача, таких як встановлена частота, поточна частота, струм та напруга. Ці значення зчитуються з фіксованим інтервалом у фоновому потоці та відображаються у відповідних блоках головної сторінки інтерфейсу. Окремо реалізовано функціональність повноцінного моніторингу за вибором користувача: у відповідній вкладці можна відзначити потрібні параметри зі списку, вказати коефіцієнти масштабування та самостійно розпочати або зупинити зчитування. Це дозволяє отримати доступ до широкого спектру даних частотника, зокрема

для цілей експериментів, запису результатів чи віддаленої діагностики. Опитування зупиняється автоматично при переході на іншу вкладку або після надсилання команди зупинки двигуна, що виключає потенційні конфлікти при доступі до послідовного порту й підвищує стабільність роботи в цілому.

Окрім основного моніторингу, у програмі реалізовано періодичне фонове опитування частотного перетворювача на наявність активного стану роботи та повідомлень про помилки. Цей механізм функціонує незалежно від запуску моніторингу і виконується з інтервалом приблизно один запит кожні 3 секунди. Таким чином, навіть у стані очікування або під час переходу між вкладками, система постійно контролює, чи перебуває двигун у робочому режимі, і чи не виникла аварійна ситуація, що дозволяє оперативно реагувати на збої та забезпечує додатковий рівень безпеки.

Завдяки поділу на три рівні логіки - GUI, логіка обробки та комунікаційний рівень - забезпечується стабільна, керована структура ПЗ. Інтерфейс реалізовано на основі бібліотеки CustomTkinter, комунікація - через модулі serial, crc та protocol, обробка - через функціональні класи та словники, які структурують Modbus-запити. Бібліотека sqlite3 відповідає за зберігання всіх даних без потреби у зовнішньому сервері чи окремому конфігу.

Формування кадрів Modbus RTU виконується згідно стандарту: адреса пристрою, код функції, адреса регістру, значення (у разі запису) і контрольна сума CRC. У відповідь система очікує дані того ж формату, здійснює перевірку на довжину, цілісність та правильність CRC. У разі помилки або відсутності відповіді вчасно - запит ігнорується, але інтерфейс продовжує роботу без блокування.

Таким чином, створене прикладне програмне забезпечення забезпечує ефективний двосторонній зв'язок із частотним перетворювачем, гнучку настройку параметрів через БД, зручне управління і стабільний моніторинг, що відповідає вимогам до інструментів реального часу в лабораторних стендах для навчання та досліджень.

3.2 Інтерфейс користувача та функціональні можливості програми

Ефективність взаємодії оператора з автоматизованою системою управління значною мірою залежить від зручності та інформативності програмного інтерфейсу. Інтерфейс користувача повинен забезпечувати інтуїтивно зрозумілу навігацію, чітке відображення параметрів технологічного процесу та доступ до необхідних функцій у режимі реального часу. При цьому важливою умовою є стабільність роботи програми, наочність індикації, а також мінімізація людських помилок під час керування обладнанням.

На рисунку 3.1 зображено головну сторінку програми, де реалізовано ключові функції управління частотним перетворювачем та моніторингу параметрів. У верхній частині інтерфейсу розташовано блок моніторингу основних параметрів: встановленої частоти, вихідної частоти струму, вихідного струму інвертора та поточної вихідної напруги. Це дозволяє в реальному часі контролювати стан електроприводу, оперативно оцінювати його навантаження та ефективність роботи.

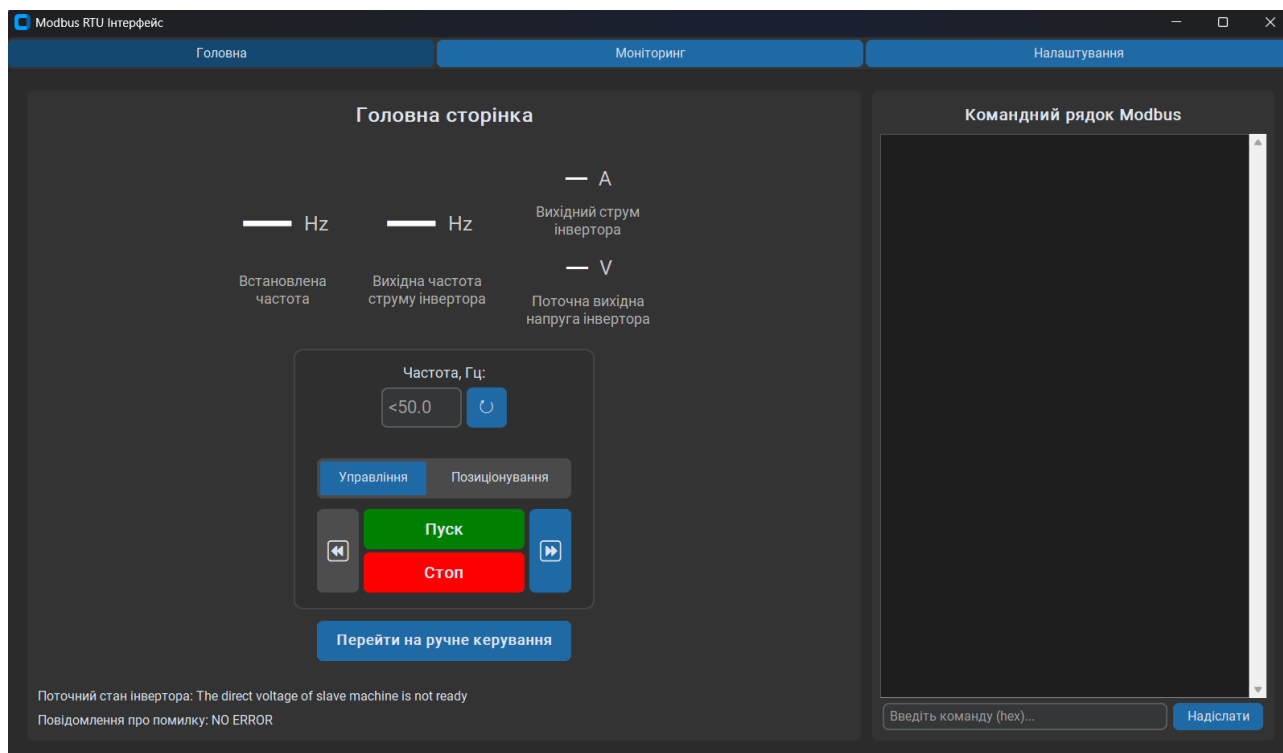


Рисунок 3.1 Інтерфейс головної сторінки програми керування

У нижній частині сторінки відображається поточний стан частотного перетворювача, зокрема активність двигуна та повідомлення про наявність або відсутність помилки. Завдяки цьому користувач має змогу оперативно реагувати на аварійні ситуації або нестандартну поведінку системи. Поруч розташовано поле введення частоти, де користувач може вручну вказати необхідне значення в герцах і натиснути кнопку оновлення для передачі команди в інвертор через Modbus RTU.

Однією з ключових функцій головної сторінки є перемикач режимів - "Управління" та "Позиціонування". Він дозволяє змінювати логіку взаємодії з виконавчим механізмом: безперервне керування швидкістю або точне позиціонування. У відповідності до обраного режиму активуються відповідні елементи керування.

Для запуску або зупинки приводу реалізовано кнопки "Пуск" та "Стоп", які надсилають відповідні Modbus-команди. Напрямок обертання двигуна можна задати за допомогою стрілок, що перемикають режим між FWD (вперед) та REV (назад). Це забезпечує зручне та інтуїтивне керування напрямком руху без потреби введення команд вручну.

Поряд з основними кнопками передбачено блок керування позиціонуванням виконавчого механізму (рис. 3.2). Він включає кнопки плавного переміщення, а також фіксовані команди на перехід до початкової або кінцевої позиції. Цей інструмент є корисним для точного налаштування меж руху або виконання калібрування.

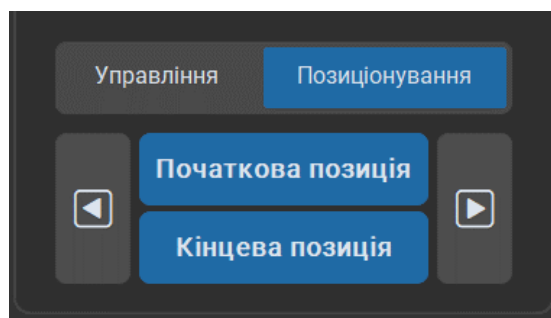


Рисунок 3.2 Блок вибору режиму та позиціонування виконавчого механізму

У правій частині вікна розташовано командний рядок Modbus. Він містить консоль для відображення журналу обміну повідомленнями та поле

ручного введення Modbus-команд у шістнадцятковому форматі. Це дозволяє користувачу вручну надсилати запити до частотного перетворювача, аналізувати відповіді та виконувати діагностику безпосередньо з інтерфейсу програми.

На рисунку 3.3 зображено сторінку «Моніторинг», де представлено зручний інтерфейс для спостереження за основними параметрами роботи частотного перетворювача. У таблиці відображаються дані щодо поточної частоти, струму, напруги, обертів двигуна, стану аналогових і цифрових входів, що дозволяє користувачеві оперативно оцінювати стан системи. Для кожного параметра вказано його код, зміст, поточне значення, одиницю виміру та масштабуючий коефіцієнт, який можна змінювати відповідно до потреб. Користувач має можливість самостійно обирати, які саме параметри підлягають моніторингу, активуючи відповідні чекбокси перед запуском автоматичного опитування. Такий підхід дозволяє оптимізувати навантаження на систему та зосередитись на найважливіших показниках роботи інвертора.

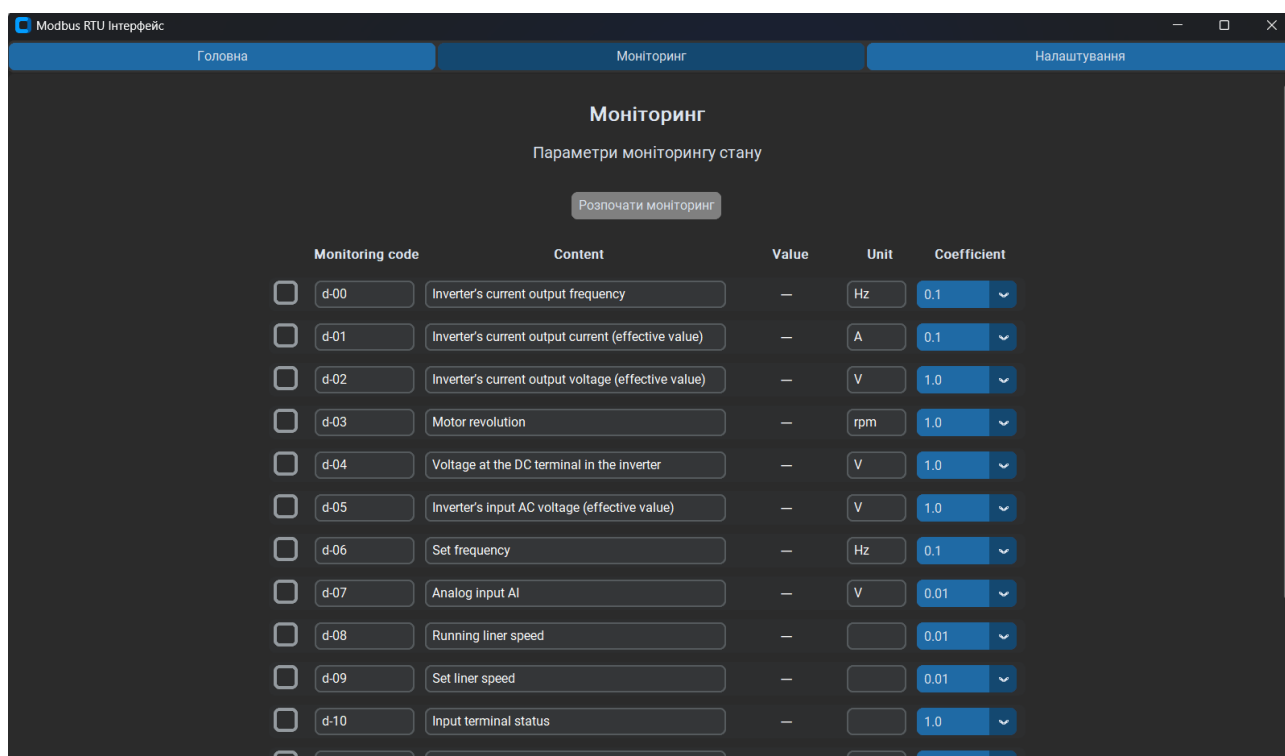


Рисунок 3.3 Сторінка моніторингу параметрів стану інвертора

На рисунку 3.4 зображено сторінку "Налаштування", де реалізовано інтерфейс для конфігурації функціональних параметрів частотного перетворювача. Кожен параметр представлено у вигляді окремого блоку, який містить назву реєстру, діапазон можливих значень з поясненням (Setting Range and Description), поле для введення значення, вибір формату (десятковий або шістнадцятковий), а також коефіцієнт масштабування. Це дозволяє гнучко адаптувати роботу перетворювача під конкретні умови експлуатації. Наприклад, можна задати канал введення частоти, цифрове значення заданої частоти або режим прийому команд. Завдяки інтерактивному відображенню опису кожного параметра користувач має змогу швидко зорієнтуватися у його призначенні без необхідності звертатися до технічної документації. Такий підхід спрощує процес налаштування та мінімізує ймовірність помилок при конфігуруванні.

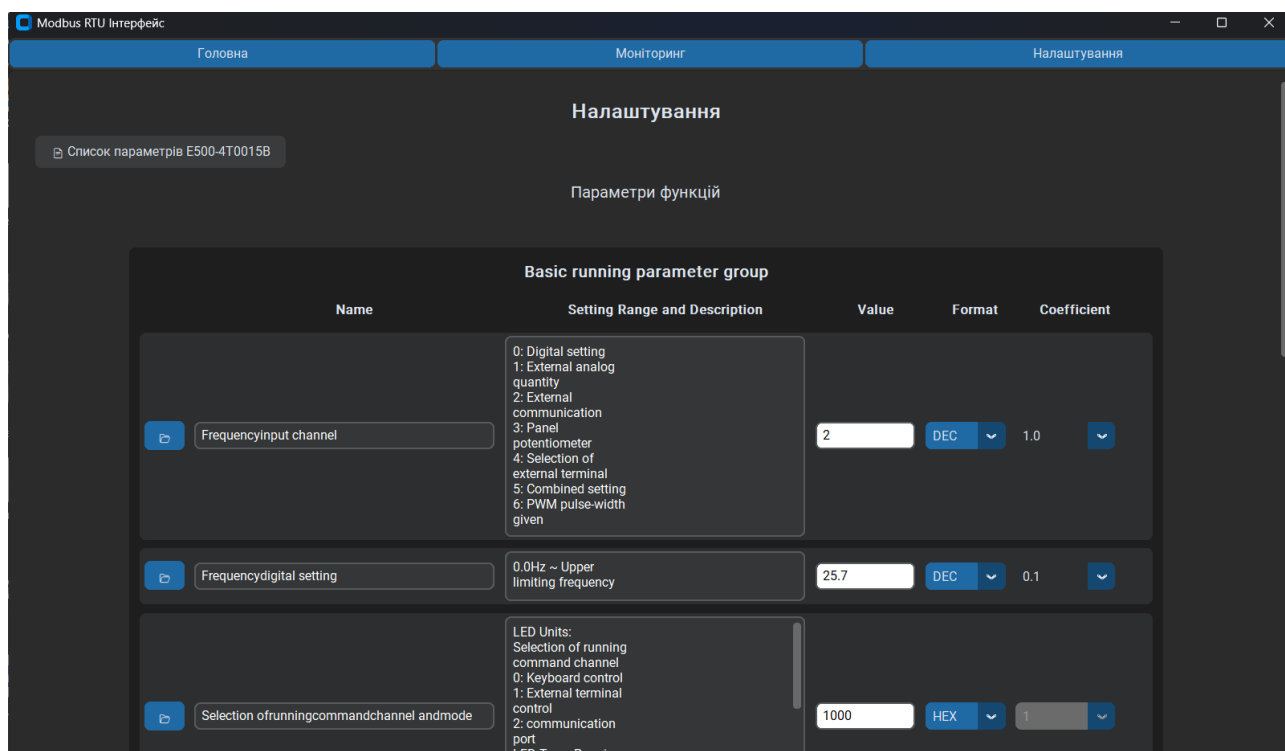


Рисунок 3.4 Сторінка налаштування параметрів частотного перетворювача

На рисунку 3.5 зображено сторінку «Список параметрів», що забезпечує зручний перегляд і редагування параметрів частотного перетворювача згідно зі структурою його документації. Інтерфейс дозволяє обирати категорію

параметрів, переглядати їхні характеристики, а також за потреби додавати нові записи до бази даних - з указанням функціонального коду, HEX-коду, назви, діапазону значень, формату, одиниць та інших супутніх даних. Завдяки цьому користувач може швидко орієнтуватися в параметрах інвертора без потреби постійного звернення до технічного опису, що значно підвищує ефективність роботи.

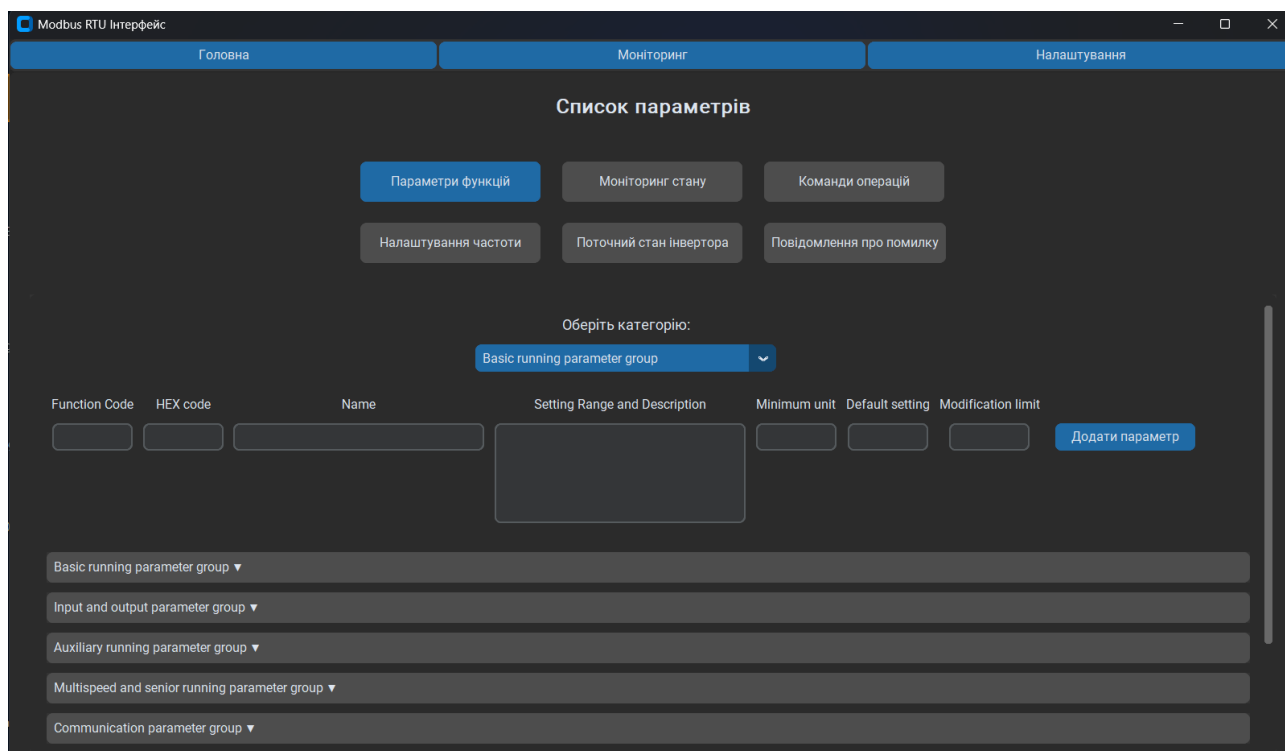


Рисунок 3.5 Інтерфейс сторінки управління параметрами та базою даних

Таким чином, реалізований інтерфейс користувача забезпечує зручне, інтуїтивне керування частотним перетворювачем, надаючи доступ до основних функцій управління, моніторингу та налаштування параметрів у режимі реального часу. Наявність візуальних підказок, адаптивних елементів керування та журналу обміну робить роботу з програмою ефективною та доступною навіть для користувачів без глибокої технічної підготовки.

3.3 Робота програмного забезпечення в складі лабораторного стенду

Програмне забезпечення розроблене для інтеграції з лабораторним стендом, який імітує керування виконавчим механізмом типу «гвинт-гайка» з

асинхронним двигуном. У складі стенду реалізовано можливість моніторингу, налаштування та керування частотним перетворювачем через протокол Modbus RTU.

На рисунку 3.6 зображено загальний вигляд лабораторного стенду. Видно монітор з активною програмою керування, частотний перетворювач, кнопки керування з індикаторами стану, а також механічну частину виконавчого пристрою та кінцеві вимикачі.



Рисунок 3.6 Загальний вигляд лабораторного стенду з активованим інтерфейсом програми

Головна сторінка програмного забезпечення демонструє повністю реалізовану та працездатну систему керування (рис 3.7). Встановлені та вихідні параметри частотного перетворювача зчитуються й відображаються коректно, всі елементи керування функціонують стабільно. Передача команд через протокол Modbus RTU здійснюється без помилок, що підтверджується журналом обміну справами. Реалізовано повну підтримку позиціонування -

встановлення початкової та кінцевої позицій (рис 3.8), рух між ними, а також автоматичне зупинення на кінцевих положеннях.

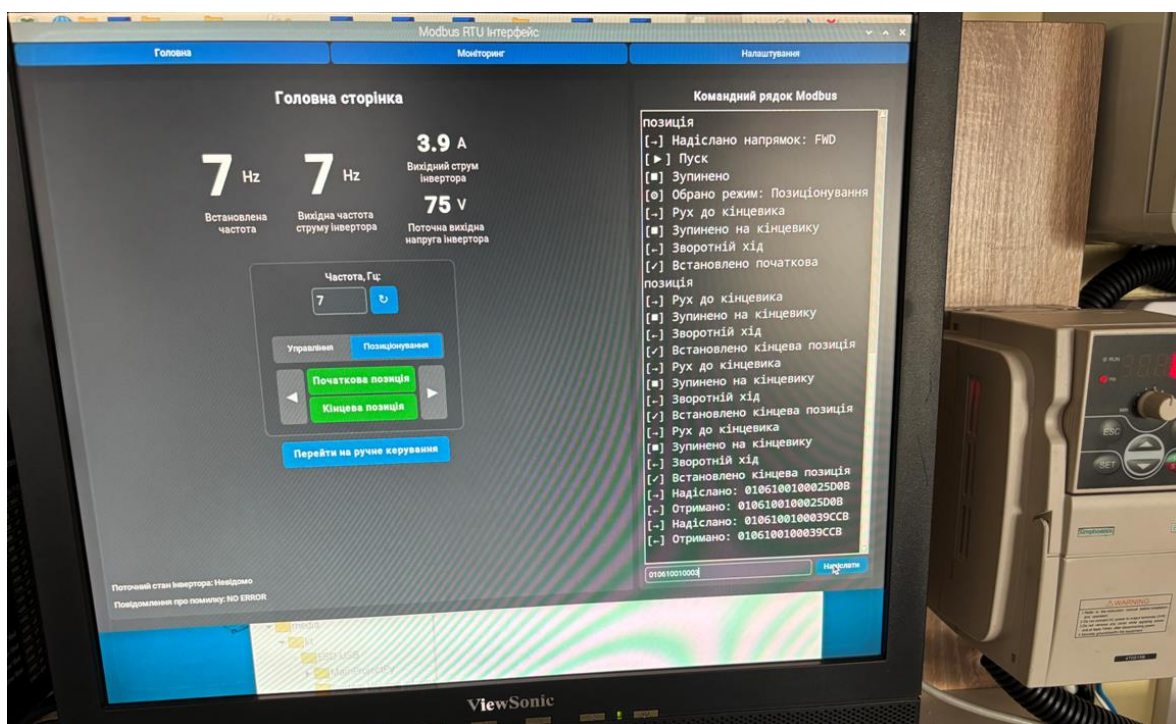


Рисунок 3.7 Тестування основних функцій програмного забезпечення



Рисунок 3.8 Позиція виконавчого механізму після встановлення у початкову точку

На рисунку 3.9 представлено екран сторінки моніторингу, яка успішно виконує свої функції з відображення параметрів частотного перетворювача в реальному часі. Користувач має змогу обрати потрібні параметри для виводу, переглядати їх значення, одиниці вимірювання та змінювати масштабуючі коефіцієнти. Інтерфейс працює стабільно, а кнопка «Моніторинг активний» підтверджує наявність активного з'єднання з пристроєм. Такий функціонал забезпечує зручне й ефективне відстеження технічного стану інвертора без необхідності залучення зовнішніх приладів або додаткових засобів аналізу.

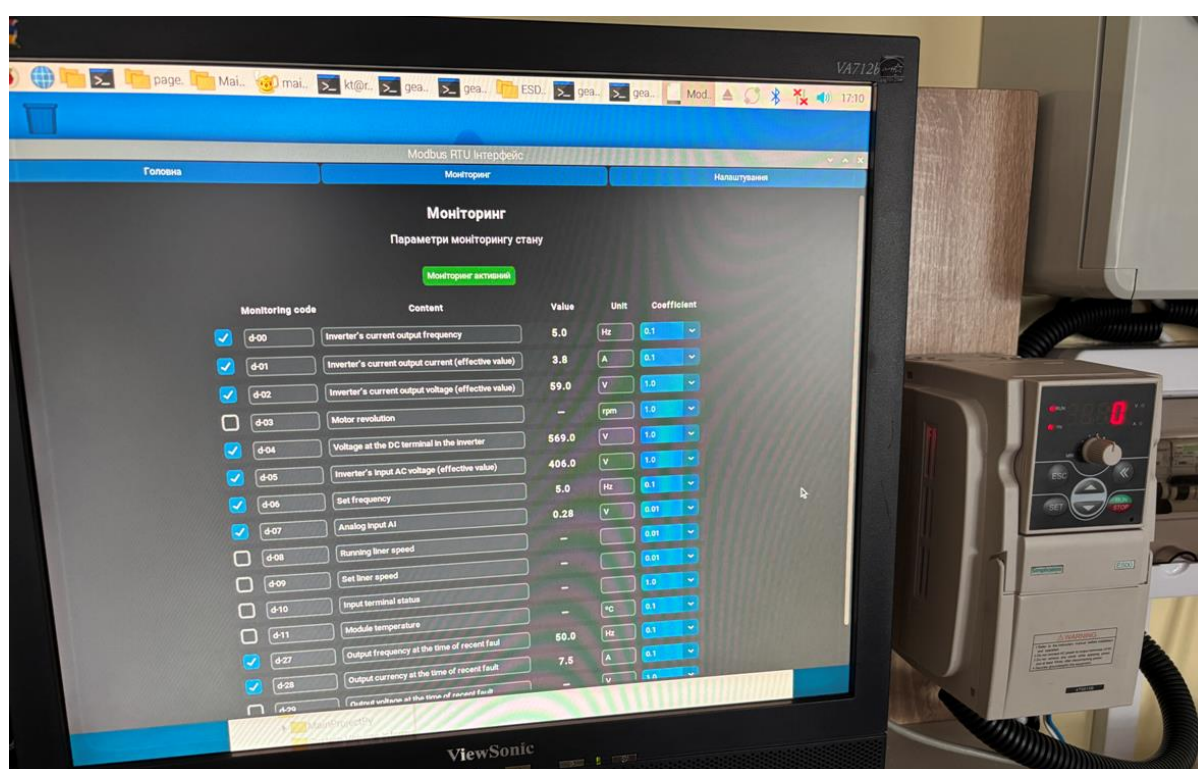


Рисунок 3.9 Моніторинг параметрів інвертора в реальному часі

Отже, програмне забезпечення успішно випробувано у складі лабораторного стенду. Усі функції працюють стабільно: забезпечено керування частотним перетворювачем через Modbus RTU, реалізовано базове позиціонування виконавчого механізму, а також зручний моніторинг основних параметрів. Система повністю відповідає поставленим вимогам і придатна для використання в навчальному процесі та дослідницьких задачах.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Долікарська допомога при ураженні електричним струмом

Ураження електричним струмом належить до критичних невідкладних станів і є однією з найнебезпечніших травм у виробничих умовах. Вплив електроструму на організм людини може викликати тяжкі наслідки: зупинку серця, параліч дихання, ураження нервової системи, глибокі опіки, судоми м'язів та втрату свідомості. Надання своєчасної, правильної долікарської допомоги в перші хвилини після інциденту має вирішальне значення для збереження життя та подальшого стану потерпілого.

Згідно з Порядком надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом або блискавкою [18], перше, що повинен зробити той, хто надає допомогу, - переконатися у відсутності небезпеки для себе, потерпілого та оточуючих. Лише після цього можна приступати до дій.

Насамперед необхідно припинити дію електричного струму. Це здійснюється шляхом вимкнення напруги (використовуючи рубильник, автоматичний вимикач, вилку з розетки), або за допомогою ізолювальних засобів - сухої деревини, гумових виробів, пластикових предметів тощо. У жодному разі не можна торкатися постраждалого голими руками, особливо якщо джерело струму не вимкнено.

У випадках, коли відключення струму неможливе, необхідно використати захисні засоби: діелектричні рукавиці, килимки, ізолюючі штанги або інші ізолюючі предмети. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, слід врахувати небезпеку падіння після знеструмлення, тому важливо забезпечити його безпечне приземлення або страховку.

Звільнивши потерпілого від джерела струму, оцінюють його стан:

- якщо він у свідомості, слід покласти його горизонтально, забезпечити спокій, розстебнути одяг у ділянці ший і грудей. Потрібно постійно спостерігати за його станом до прибуття бригади швидкої допомоги.

- якщо потерпілий без свідомості, але дихає, необхідно забезпечити прохідність дихальних шляхів, покласти його на бік, викликати екстрену допомогу та слідкувати за станом.

- якщо потерпілий не дихає або дихає уривчасто, потрібно негайно почати серцево-легеневу реанімацію.

Штучне дихання виконується за методами "рот у рот" або "рот у ніс" [19]. Перед цим очищають дихальні шляхи від сторонніх тіл, слизу, крові. Голова постраждалого максимально відкидається назад для забезпечення прохідності дихальних шляхів. Дихальні рухи здійснюють кожні 5–6 секунд. Якщо пульс не відчувається, виконують зовнішній непрямий масаж серця, натискаючи на грудину з частотою 100–120 компресій за хвилину. Комбінація дій: 30 компресій на 2 вдихи.

Під час реанімації важливо не припиняти дії до відновлення дихання та серцебиття або до прибуття медиків. Ознаками ефективності є поява пульсу, самостійного дихання, звуження зіниць.

У разі ураження електричним струмом на відкритій місцевості або при обриві проводу необхідно враховувати небезпеку крокової напруги. Пересуватися в такій зоні потрібно дрібними кроками, не відриваючи ноги одна від одної. Потерпілого виносять із небезпечної зони лише після повного знеструмлення.

Відповідно до нормативних джерел виділяють три клінічні стани потерпілого після дії струму [20]:

- I стан: потерпілий при свідомості - забезпечується спокій і медичне спостереження.

- II стан: втрата свідомості, але збережене дихання - горизонтальне положення, нашатирний спирт, контроль стану.

- III стан: відсутність дихання, пульсу - негайне проведення реанімаційних заходів.

Надання допомоги не повинно супроводжуватись панікою або діями без впевненості. Якщо рятівник не має належного навчання або ситуація виходить

за межі його можливостей, необхідно діяти в межах інструкцій та обов'язково викликати екстрену медичну допомогу за номером 103.

Наявність базових знань з долікарської допомоги, вміння орієнтуватися у критичній ситуації та доступ до засобів захисту значно підвищують шанси на порятунок потерпілого при ураженні електричним струмом.

4.2 Система захисного вимкнення в установці

Захисне вимкнення є важливою частиною будь-якої електротехнічної установки, оскільки дозволяє своєчасно усувати небезпечні режими роботи, запобігати ураженню електричним струмом персоналу, уникати коротких замикань та аварійних ситуацій, що можуть призвести до пошкодження обладнання. Основною метою системи захисного відключення є автоматичне знеструмлення окремих ділянок електричного кола в разі виникнення ненормованих або небезпечних умов.

Одним із важливих елементів локального захисту в установках є кінцеві вимикачі, які виконують функцію обмеження ходу виконавчого механізму. Вони встановлюються на крайніх позиціях рухомих частин і спрацьовують у разі досягнення граничного положення. При спрацюванні кінцевого вимикача замикається або розмикається електричне коло, що призводить до негайного припинення подачі сигналу керування або повного відключення живлення приводу. Таким чином, ці пристрої запобігають механічному перевантаженню, заклинюванню або пошкодженню механізму, забезпечуючи додатковий рівень безпеки як для обладнання, так і для обслуговуючого персоналу.

У загальному випадку система захисного відключення базується на використанні таких основних елементів: автоматичних вимикачів, диференційних вимикачів (УЗО), реле контролю напруги та фаз, а також програмованих пристроїв (наприклад, реле часу або мікроконтролерів), які аналізують сигнали від сенсорів і формують команду на вимкнення.

Один із найпоширеніших і водночас ефективних методів реалізації захисного відключення - використання пристрою захисного відключення (ПЗВ), який реагує на витік струму через ізоляцію. Такі пристрої встановлюються у ланцюг живлення і постійно порівнюють струм, що входить у фазний провід, зі струмом, який повертається через нейтраль. У випадку, якщо виникає різниця (наприклад, частина струму «витікає» через людину на землю), ПЗВ миттєво відключає живлення, запобігаючи ураженню.

Іншим важливим елементом є автоматичний вимикач, який забезпечує захист від коротких замикань та перевантажень. Вимикачі підбираються відповідно до номінального струму споживачів, типу навантаження та характеристик захисту (тип В, С або D). Наприклад, для навантаження з високими пусковими струмами (електродвигуни) доцільно використовувати автоматичні вимикачі з характеристикою типу D, тоді як для більшості електронних пристроїв достатньо типу В або С.

З метою підвищення надійності та безпеки система захисного вимкнення може також включати реле контролю напруги, яке спрацьовує при перевищенні або зниженні напруги в мережі за допустимі межі. Такі реле особливо ефективні у випадках нестабільного живлення або при живленні критичного обладнання, чутливого до коливань напруги.

Ключовим етапом проєктування захисту є правильний розрахунок номіналів пристроїв. Наприклад, ПЗВ повинно мати номінальний струм не менше, ніж у ланцюзі живлення, а струм спрацьовування - не більше 30 мА для захисту життя людини. У промислових системах допускається використання пристроїв з порогом 100 або 300 мА, коли необхідно захистити обладнання від пожежі, а не людей.

Захист живлення може бути також інтегрований із логікою контролера. Наприклад, при виявленні аварійного стану (перевантаження, перегрів, втрата фази), контролер видає команду на реле відключення. Це дозволяє реалізувати селективний захист і зменшити ймовірність загального знеструмлення всієї системи.

На рисунку 4.1 представлено спеціальне електричне з'єднання металевих частин, які можуть випадково опинитися під напругою, із нульовим захисним провідником. Такий захід застосовується для запобігання ураженню електричним струмом у разі пошкодження ізоляції або однофазного короткого замикання в мережах до 1000 В із заземленою нейтраллю [21].

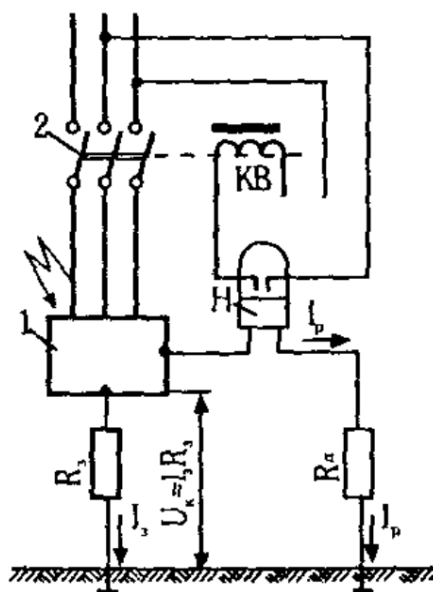


Рисунок 4.1 Принципова схема пристрою захисного вимкнення, котрий реагує на напругу корпусу відносно землі:

1 - корпус, 2 - автоматичний вимикач, KB - котушка вимикаюча; Н - реле напруги максимальне, R_3 - опір захисного заземлення, R_d - опір допоміжного заземлення

Таким чином, грамотна реалізація системи захисного відключення базується на поєднанні пасивних і активних елементів безпеки. Вона враховує особливості обладнання, середовища експлуатації, вимоги до безперервності процесу та необхідність запобігання прямому контакту з електричними колами. Дотримання нормативів [22] при проєктуванні та впровадженні таких систем є критично важливим з погляду інженерної відповідальності.

4.3 Заходи з техніки безпеки при експлуатації обладнання

Експлуатація електротехнічного обладнання у виробничому середовищі пов'язана з підвищеною небезпекою через наявність електричного струму, рухомих частин механізмів, теплових і механічних навантажень. Тому дотримання правил охорони праці є необхідною умовою збереження життя і здоров'я персоналу. Працівники повинні бути поінформовані про потенційні небезпеки та мати відповідні знання щодо безпечної експлуатації обладнання.

Перед початком роботи з будь-яким електрообладнанням слід виконати перевірку його технічного стану. Забороняється використовувати пристрої з пошкодженими елементами корпусу, ізоляції або роз'ємів. Оператор повинен ознайомитись із паспортною документацією обладнання, вивчити інструкцію з експлуатації, мати навички роботи з приладом і пройти відповідний інструктаж з охорони праці, закріпити знання щодо правил безпечної експлуатації технологічного обладнання [19].

На робочому місці не повинно бути зайвих предметів, джерел рідини або легкозаймистих матеріалів. Робоча поверхня має бути сухою, чистою, зручною для роботи, а освітлення - достатнім для точного виконання всіх операцій.

Категорично забороняється:

- виконувати будь-які монтажні або демонтажні роботи під час подачі напруги;
- допускати присутність сторонніх осіб у зоні обслуговування пристроїв;
- торкатися струмопровідних частин руками або інструментом без засобів захисту;
- залишати обладнання під напругою без нагляду.

Обладнання повинно бути заземленим, а всі доступні для дотику металеві частини - з'єднані з контуром захисного заземлення. Робота з електричними колами ведеться тільки у справних діелектричних рукавичках та з використанням інструментів із ізольованими ручками. В особливо небезпечних умовах (наявність вологи, металевих конструкцій, пилу) необхідно використовувати гумові килимки або підставки.

Під час технічного обслуговування електрообладнання важливо дотримуватись наступної послідовності:

- Вимкнути напругу, переконавшись у відсутності залишкової енергії.
- Встановити попереджувальні таблички “Не вмикати - працюють люди”.
- Виконати перевірку ізоляції, герметичності, справності контактних груп.
- Після завершення робіт знову перевірити правильність підключень перед подачею напруги.

У зонах з можливим ураженням струмом необхідно забезпечити наявність засобів першої допомоги: аптечки, плакатів із правилами надання домедичної допомоги, а також інструкцій щодо дій при ураженні електрострумом.

Під час експлуатації обладнання, особливо електроустановок, слід враховувати ризик займання внаслідок коротких замикань, перевантажень або несправностей. Для мінімізації пожежної небезпеки обладнання має встановлюватись на вогнестійкій основі. Поруч необхідно розміщувати вогнегасники відповідного класу (вуглекислотні, порошкові), приміщення повинні бути обладнані датчиками задимлення та системами оповіщення. Усі електричні елементи мають бути сертифіковані відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1.

Значну роль у забезпеченні безпеки роботи відіграють сигнальні пристрої, які оперативно інформують персонал про зміну стану обладнання, наявність відхилень у роботі або про виникнення небезпечної ситуації. Візуальні сигнали (світлодіодні індикатори, маячки, екрани) дозволяють швидко зорієнтуватися в поточному режимі роботи обладнання, а звукові сигнали (сирени, зумери) попереджають про аварії, помилки оператора чи досягнення граничних значень. Колірна індикація повинна відповідати встановленим стандартам: червоний – аварійне повідомлення, жовтий – попередження, зелений – нормальна робота.

Особливої уваги потребує встановлення кінцевих вимикачів, які забезпечують безпечну зупинку виконавчих механізмів при досягненні кінцевих положень. Такі вимикачі є надійним захистом від перевантаження,

механічного пошкодження або неконтрольованого руху елементів обладнання. Кінцеві вимикачі можуть бути механічними або індуктивними, а їх спрацювання повинно автоматично блокувати подальше керування рухомими частинами системи. Встановлення дублюючих кінцевих вимикачів додатково підвищує рівень безпеки та забезпечує резервування на випадок неспрацювання основного.

Контрольно-запобіжні пристрої включають в себе широкий спектр елементів, які слугують для попередження аварій і забезпечення нормального функціонування обладнання. До них належать аварійні реле тиску, датчики перевантаження, температурні обмежувачі, реле контролю фаз і реле часу. Такі пристрої автоматично реагують на відхилення від нормальних параметрів та ініціюють зупинку системи або подачу сигналу оператору. Їх застосування є особливо актуальним у системах, де можуть виникати критичні навантаження або небезпека для людини в разі порушення робочих умов.

Ще одним важливим елементом системи безпеки є огорожувальні пристрої, які фізично обмежують доступ до небезпечних частин обладнання. Огородження може бути постійним або знімним, прозорим або глухим, однак у будь-якому випадку повинно унеможливлювати випадковий контакт оператора з рухомими або струмонебезпечними елементами. У разі необхідності доступу для обслуговування, такі огороження обладнуються блокуванням, що вимикає обладнання при відкриванні. Деякі огорожувальні елементи додатково обладнуються магнітними або механічними датчиками стану, які інформують систему керування про наявність або відсутність захисного бар'єру.

Таким чином, ефективна система техніки безпеки в автоматизованих системах включає не лише нормативно закріплені методи захисту, а й цілий комплекс технічних засобів, які працюють у реальному часі для запобігання виникненню аварійних ситуацій. Лише грамотне поєднання організаційних заходів і технічного забезпечення дозволяє створити умови безпечної експлуатації сучасного промислового обладнання в умовах автоматизованого виробництва.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було реалізовано повнофункціональний лабораторний стенд для керування виконавчим механізмом типу «гвинт-гайка» з асинхронним двигуном і частотним перетворювачем. Основною метою роботи було створення програмного забезпечення з графічним інтерфейсом для взаємодії з частотним перетворювачем через протокол Modbus RTU. Реалізоване рішення забезпечує стабільну передачу команд, зчитування даних, позиціонування та моніторинг основних параметрів.

У першому розділі було проаналізовано сучасні підходи до побудови навчальних лабораторних стендів у галузі автоматизації, визначено актуальність створення стенду для керування виконавчими механізмами типу «гвинт-гайка», а також сформульовано основну мету, завдання й методичні принципи його побудови. Одержані результати дозволили обґрунтувати необхідність розробки такого стенду для практичної підготовки фахівців у сфері автоматизованого керування.

У другому розділі було детально розглянуто технічні аспекти побудови системи керування лабораторного стенду. Надано обґрунтування вибору основних елементів, таких як асинхронний електродвигун, частотний перетворювач, кінцеві вимикачі, елементи захисту та мікрокомп'ютер, що реалізує функції керування. Також представлено електричну схему підключення та описано принцип дії системи, який базується на управлінні через протокол Modbus RTU. Особливу увагу приділено опису прикладного програмного забезпечення, реалізованого мовою Python із використанням бібліотек CustomTkinter для побудови графічного інтерфейсу та sqlite3 для зберігання параметрів. Розроблене ПЗ забезпечує всі необхідні функції: запуск і зупинку двигуна, зміну напрямку обертання, налаштування частоти, позиціонування виконавчого механізму та моніторинг ключових параметрів у реальному часі.

У третьому розділі описано перевірку працездатності розробленої системи у складі реального лабораторного стенду. Проведено тестування взаємодії програмного забезпечення з частотним перетворювачем через інтерфейс RS-485, що показало стабільність передачі даних та відсутність збоїв у процесі управління. Верифіковано точність виконання команд, таких як встановлення частоти, запуск, реверс та позиціонування виконавчого механізму. Крім того, графічний інтерфейс забезпечує інтуїтивно зрозуміле керування, зручний перегляд параметрів та контроль стану пристрою. Усі функції працюють узгоджено, що забезпечує безпечну й ефективну роботу стенду під час практичних занять або досліджень.

У загальному підсумку, створена система повністю реалізує поставлені цілі проєкту - керування виконавчим механізмом типу «гвинт-гайка» за допомогою частотного перетворювача з можливістю позиціонування, моніторингу та налаштування параметрів у реальному часі. Вона відповідає сучасним вимогам до навчального лабораторного обладнання в галузі автоматизації технологічних процесів. Отримані результати свідчать про високу практичну цінність реалізованого рішення, яке може бути використане як у навчальних цілях, так і як основа для подальшого вдосконалення систем автоматизованого керування електроприводами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Посібник з лекцій із дисципліни «Автоматизовані системи керування технологічними процесами» напрям підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / укладач : В.В. Карташов. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 148 с.

2. Р. І. Королюк Стенд управління асинхронним двигуном з допомогою одноплатного комп'ютера Raspberry Pi / Р. І. Королюк, І. В. Булич, М. В. Гаврилюк, І. С. Дідич // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 29-31 травня 2024 року. - Т. : ТНТУ, 2024. - С. 37–38.

3. Р. І. Королюк. Специфіка розроблення електронного курсу дисципліни «Сучасні пошукові системи та бібліографія» для вищих навчальних закладів - Імідж сучасного педагога, 2024. Вип. 1 (214). С. 26-30.

4. В. Б. Савків. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / укл. : В. Б. Савків, О.К. Шкодзінський, В. П. Пісьціо. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с.

5. Р. Слободян, А. С. Васюра. Методи та засоби управління виконавчими трифазними асинхронними двигунами, Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 22-24 березня 2017 р. Режим доступу : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/allfksa/all-fksa-2017/paper/view/2289> (дата звернення: 29.05.2025).

6. Золотий Р. З. Оптимізація керування сипким гнучким транспортером з асинхронним приводом / Р. З. Золотий, Є. П. Басістий, Т. М. Бурда // Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 28-29 листопада 2018 року. - Т. : ТНТУ, 2018. - Том 2. - С. 43. - (Комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку).

7. Золотий Р. З. Розробка математичної моделі для дослідження давачів магнітного потоку асинхронних двигунів / Р. З. Золотий, Н. О. Бабій // Збірник

тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17-18 листопада 2016 року. - Т. : ТНТУ, 2016. - Том II. - С. 45.

8. User Manual of E500 Series Universal Low-Power Inverter. SHENZHEN SIMPHOENIX ELECTRIC TECHNOLOGYCO., Ltd.: веб-сайт. URL: <https://www.simphoenix.com/uploads/70bf71791.pdf> (дата звернення: 29.05.2025).

9. Стенд управління кроковим двигуном з допомогою одноплатного комп'ютера Raspberry Pi / Р. І. Королюк, І. В. Булич, А. М. Литвин, А. Г. Микитишин // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 29-31 травня 2024 року. - Т. : ТНТУ, 2024. - С. 39.

10. Стенд візуалізації параметрів роботи систем контрольованих Raspberry Pi та Raspberry Pico / Р. І. Королюк, І. В. Булич, О. В. Смолій, А. А. Станько // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 29-31 травня 2024 року. - Т. : ТНТУ, 2024. - С. 40

11. Automated monitoring of bee colony movement in the hive during winter season / Veronika Soyka and Dmytro Tymoshchuk, Rostyslav Koroliuk, Vyacheslav Nykytyuk, Vitaliy Tymoshchuk // Proceedings of the 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024) – С. 147-156.

12. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник. Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.

13. Documentation Raspberry Pi OS. Raspberry Pi: веб-сайт. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html> (дата звернення: 30.05.2025).

14. Getting started with your Raspberry Pi. Raspberry Pi: веб-сайт. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html#setting-up-your-raspberry-pi> (дата звернення: 30.05.2025).

15. The official documentation for Python 3.12.10. Python: веб-сайт. URL: <https://docs.python.org/3.12/> (дата звернення: 31.05.2025).

16. CustomTkinter Documentation Introduction. CustomTkinter: веб-сайт. URL: <https://customtkinter.tomschimansky.com/documentation/> (дата звернення: 31.05.2025).

17. Чихіра І.В. "Програмування систем реального часу" : консп. лекц. / І. В. Чихіра , А.Г. Микитишин. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. - 73 с.

18. Про затвердження порядків надання домедичної допомоги особам при невідкладних станах. (n.d.). Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0356-22#n769> (дата звернення: 11.06.2025).

19. В. Г. Грибан, О. В. Негодченко. Охорона праці: навч. посібник. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. Г. Грибан, О. В. Негодченко — К.: Центр учбової літератури, 2009. — 280 с. — ISBN 978-966-364-832-3.

20. O. Bernas, M., Mykytyshyn, A., Kartashov, V., Levytskyi, V. & Martjanov, D. (2023) The Role of Cyber-Physical Systems and Internet of Things in Development of Smart Cities for Industry 4.0. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3468,. P. 91–102.

21. Березюк. Безпека життєдіяльності: навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.

22. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Основи охорони праці. — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.

23. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT). Зі зміною: затв. наказом від 21.12.2015 № 203 Про прийняття нормативних документів України, гармонізованих з міжнародними та європейськими нормативними документами, та скасування нормативних документів України - Київ (ДП «УкрНДНЦ») 2017. – 82 с.