

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

«Автоматизована система аналізу споживання енерговитрат комплексу
моделювання транспортно-розвантажувальних операцій на базі
SCARA-роботу»

Виконала ст. гр. АКІТР-24-1м. _____ Рожкова Е. О.

Керівник _____ Щокін В. П.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

«15» липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-24-1м. Рожковій Еліні Олегівні

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система аналізу споживання енерговитрат комплексу моделювання транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-роботу»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 70с., презентація у MS PowerPoint (слайдів) в електронному та друкованому вигляді.

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2-3

доц. Щокін В. П.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.02.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.07.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.11.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>20.11.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ / Щокін В. П./

7. Запевнення: Я, Рожкова Еліна Олегівна, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомена.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Рожкова Е. О./

АНОТАЦІЯ

Рожкова Е. О. Автоматизована система аналізу споживання енерговитрат комплексу моделювання транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-роботу : кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістр за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 70 с.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 70 сторінок, з яких основний зміст викладено на 57 сторінці.

Об'єктом дослідження є робототехнічний комплекс моделювання транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-маніпулятора.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та практична реалізація автоматизованої програмно-апаратної системи збору, обробки та візуалізації енергетичних параметрів у реальному часі.

У першому розділі виконано аналіз предметної області, розглянуто особливості енергоспоживання об'єкту дослідження та проаналізовано сучасні підходи до підвищення енергоефективності робототехнічних систем.

У другому розділі визначено основні фактори формування енергетичного балансу та обґрунтовано застосування прямого експериментального вимірювання.

У третьому розділі реалізовано автоматизовану систему аналізу енергоспоживання з використанням мікроконтролерної платформи, Node-RED, InfluxDB та Grafana.

Ключові слова:

SCARA-РОБОТ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, NODE-RED, INFLUXDB, GRAFANA.

ANNOTATION

Rozhkova E. O. Automated System for Analysing Energy Consumption of a Modelling Complex for Transport-and-Handling Operations Based on a SCARA Robot: Qualification Paper for the Degree of Master of Automated Control and Computer-Integrated Technologies and Robotics, Specialty 174. Kryvyi Rih: Kryvyi Rih National University, 2025. 70 p.

The paper consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references and appendices. Its total volume is 70 pages, of which 57 pages contain the main content.

The object of research is a robotic modelling complex for transport-and-handling operations based on a SCARA manipulator.

The aim of the qualification paper is to develop and practically implement an automated software-and-hardware system for collecting, processing and visualising energy parameters in real time.

In Chapter 1 the subject area is analysed, the specific features of the object's energy consumption are considered, and modern approaches to improving the energy efficiency of robotic systems are examined.

Chapter 2 identifies the main factors forming the energy balance and substantiates the use of direct experimental measurements.

Chapter 3 presents the implementation of an automated energy-consumption analysis system using a microcontroller platform, Node-RED, InfluxDB and Grafana.

Key words: SCARA ROBOT, ENERGY CONSUMPTION, AUTOMATED SYSTEM, NODE-RED, INFLUXDB, GRAFANA.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ	9
1.1 Характеристика об'єкта дослідження та технологічного процесу.....	9
1.1.1 Об'єкт дослідження: кінематичні та функціональні особливості SCARA-маніпулятора.....	9
1.1.2 Технологічний процес транспортно-розвантажувальних операцій та його енергетична складова.....	10
1.1.3 Аналіз сучасних підходів до оптимізації енергоспоживання промислових роботів.....	10
1.1.4 Навчальний стенд як експериментальна база дослідження.....	11
1.2 Аналіз літературних джерел за напрямом досліджень.....	12
1.3 Патентний пошук за напрямом досліджень.....	17
1.4 Недоліки та переваги існуючих рішень, методів.....	24
1.5 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень.....	26
Висновки до розділу.....	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОГО СТЕНДА.....	29
2.1 Вихідні дані та структура стенда.....	29
2.2 Теоретичні основи оцінки енергоспоживання.....	30
2.2.1. Електромеханічна модель приводу.....	32
2.2.2. Динамічні навантаження та їх вплив на енергоспоживання.....	33
2.2.3. Вплив траєкторії та алгоритмів керування.....	34
2.2.4. Експериментальні особливості вимірювання на стенді.....	35
2.3 Енергоспоживання конвеєрної підсистеми.....	35
2.3.1. Фізичні основи та модель потужності приводу конвеєра.....	36
2.3.2. Стратегії оптимізації енергоспоживання конвеєра.....	38
2.4 Сумарний енергетичний баланс системи.....	38
2.4.1 Ключові закономірності та точки неефективності.....	40

2.4.2	Інтегральні показники енергоефективності.....	40
2.4.3	Висновки для експериментального дослідження.....	41
	Висновки до розділу.....	41
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.....		42
3.1	Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення.....	42
3.1.1	Аналіз вимог до системи збору даних.....	42
3.1.2	Вибір апаратного забезпечення.....	43
3.1.3	Сумісність з існуючим стендом.....	46
3.2	Схема підключення та структура системи збору даних.....	47
3.2.1	Структурна схема технічних засобів автоматизації системи моніторингу.....	47
3.2.2	Функціональна структура системи моніторингу.....	49
3.2.3	Схема інформаційних потоків і передача даних через Wi-Fi.....	50
3.2.4	Апаратно-технологічна схема підсистеми моніторингу.....	51
3.3	Алгоритмічне забезпечення.....	53
3.3.1	Алгоритм вимірювання та обробки сигналів від сенсорів.....	53
3.3.2	Алгоритм формування пакетів даних та передача через Wi-Fi.....	55
3.3.3	Алгоритм публікації даних у Node-RED.....	56
3.4	Програмна реалізація.....	57
3.4.1	Програмне забезпечення Raspberry Pi Pico 2 WH.....	57
3.4.2	Конфігурація потоків у Node-RED та створення бази даних.....	58
3.4.3	Візуалізація енергоспоживання у Grafana.....	61
	Висновки до розділу.....	63
ВИСНОВОК.....		65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....		66
ДОДАТОК А. Детальна схема підключень розробленої підсистеми.....		71
ДОДАТОК Б. Специфікація розробленої підсистеми.....		72
ДОДАТОК В. Повний код прошивки для Raspberry Pi Pico 2 WH.....		74
ДОДАТОК Г. Код потоку Node-RED.....		80

ВСТУП

Сучасне виробництво, орієнтоване на принципи Industry 4.0, змушене еволюціонувати у напрямку синергії двох ключових вимог: підвищення операційної ефективності та зниження ресурсних витрат. У цьому контексті автоматизація транспортно-розвантажувальних процесів за допомогою робототехнічних комплексів, зокрема маніпуляторів типу SCARA, стала стандартом де-факто завдяки їхній неперевершеній продуктивності, точності та швидкості. Однак, масова роботизація неминуче веде до зростання енергетичних апетитів підприємств. Таким чином, на тлі перманентного подорожчання електроенергії та посилення екологічних імперативів, задача розумного енергоменеджменту з суто економічної перетворюється на стратегічну.

Виходячи з цього, головною метою даного дослідження є розробка та апробація методики аналізу енергетичної ефективності SCARA-робота в рамках моделювання типових транспортно-розвантажувальних операцій. На відміну від існуючих підходів, що часто зосереджені на узагальнених показниках, дана робота пропонує комплексне рішення, спрямоване на отримання детального профілю споживання енергії на рівні окремих операцій. Досягнення поставленої мети передбачає послідовне вирішення низки ключових завдань.

Перше, провести системний аналіз архітектури та принципів функціонування SCARA-роботів, зокрема дослідити вплив кінематики, динаміки приводів та циклограмми роботи на формування сумарного енергоспоживання.

Друге, вивчити та порівняти наявні методики та апаратні засоби (на кшталт прецизійних енергетичних аналізаторів) для експериментального збору показників електроспоживання роботизованих комплексів із високою дискретизацією.

Третє, здійснити огляд сучасних алгоритмічних рішень для оптимізації енергетичних витрат промислових роботів (наприклад, шляхом траєкторного планування чи адаптивного управління), оцінивши потенційну придатність їх застосування для маніпуляторів SCARA-типу.

Четверте, реалізувати програмно-апаратний комплекс, що здатний фіксувати, агрегувати та візуалізувати дані про енергоспоживання в прив'язці до фази виконання технологічного завдання.

Актуальність дослідження зумовлена браком інструментарію для низькорівневого аналізу енерговитрат, без якого неможливо виявити неефективність у конкретних ділянках робочого циклу. Практичний внесок роботи полягатиме в тому, що впровадження запропонованої системи дозволить не лише провести детальний аудит, а й сформулювати конкретні інженерні та програмні рекомендації щодо мінімізації енергетичних витрат без компромісів щодо продуктивності та точності виконання операцій.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Характеристика об'єкта дослідження та технологічного процесу

1.1.1 Об'єкт дослідження: кінематичні та функціональні особливості SCARA-маніпулятора

Як об'єкт дослідження обрано маніпулятор кінематичного типу SCARA, архітектура якого є оптимальною для задач швидкого і точного переміщення вантажів у горизонтальній площині. Його відмінною рисою є селективна податливість: висока жорсткість у вертикальній осі забезпечує стабільність при маніпуляціях, тоді як обумовлена конструкцією податливість у горизонтальній площині компенсує незначні похибки позиціонування, що є ключовим для операцій збірки та вставки, що підтверджується результатами дослідження [14].

З точки зору динаміки та енергетики, слід зазначити наступне:

- Кінематична структура зумовлює переважно інерційний характер навантажень на приводи, що є вирішальним для формування режимів енергоспоживання.
- Висока швидкість та повторюваність роботи, будучи основною технологічною перевагою, що вказано в статтях [7-9], одночасно створює значне навантаження на електроприводи в режимах розгону та гальмування, де енерговитрати є найбільшими, що відзначають автори дослідження [11], та що демонструється у [13, табл. 2].

Саме циклічний характер роботи та динамічні навантаження роблять SCARA-роботи перспективними для застосування методів енергооптимізації.

1.1.2 Технологічний процес транспортно-розвантажувальних операцій та його енергетична складова

Аналізований технологічний процес «pick-and-place» є типовий для логістичних та виробничих систем і складається з низки детермінованих етапів, кожен з яких вносить свій внесок у загальний баланс енергоспоживання.

1) Ідентифікація та позиціонування вантажу. На цьому етапі використовуються допоміжні системи, енерговитрати яких, як правило, є постійними і не залежать від циклу роботи маніпулятора, як описано у джерелі [7].

2) Захоплення вантажу. Активується захватний пристрій, що призводить до стрибкоподібного збільшення споживання потужності.

3) Траєкторія «pick-and-place». Це найбільш енергоємний етап, оскільки саме тут електроприводи робота виконують основну роботу з розгону, стабільного руху та гальмування маси власних ланок разом із масою корисного вантажу.

4) Розвантаження та репозиціонування. Після розмикання захвату робот повертається у вихідну позицію для початку нового циклу. Енерговитрати на цьому етапі можуть бути значно зменшені за рахунок рекуперативного гальмування, якщо це передбачено апаратною платформою, як, наприклад, у роботі [13].

5) Функціонування конвеєрної лінії. Важливою складовою досліджуваного комплексу є конвеєр, який забезпечує подачу та відведення деталей у зону роботи SCARA-маніпулятора. Конвеєр споживає енергію у більш стабільному режимі, проте його частка загалом може сягати 20-40%, залежно від маси та кількості деталей [9].

1.1.3 Аналіз сучасних підходів до оптимізації енергоспоживання промислових роботів

На сьогодні існує кілька ключових напрямів енерговитрат, які знайшли своє відображення в сучасних дослідженнях [10-13]. Їх можна класифікувати наступним чином:

1) Програмно-алгоритмічні методи. Цей підхід є найбільш універсальним, оскільки не вимагає змін у апаратній частині. Його суть полягає в оптимізації траєкторії руху. Замість мінімізації часу циклу (time-optimal control) авторами [9-12] пропонуються методи, що знаходять компроміс між швидкістю та енергоефективністю, згладжуючи профіль прискорень.

2) Апаратні методи. Ці рішення вимагають модифікації конструкції або використання спеціалізованих компонентів: впровадження регенеративних приводів, пружних елементів чи накопичувальних систем, які дають можливість частково повертати енергію у систему живлення, як зазначає публікація [13].

3) Системна інтеграція. Важливо підкреслити, що промисловий робот у більшості випадків не функціонує ізольовано, а є складовою виробничого комплексу. Значний внесок у сумарні енерговитрати формують допоміжні підсистеми, зокрема конвеєрні лінії. Як показано у дослідженнях [37, 40], конвеєр може створювати стабільне навантаження на енергобаланс системи, що іноді перевищує частку маніпулятора.

1.1.4 Навчальний стенд як експериментальна база дослідження

Експериментальною базою роботи є навчальний стенд №3 (Рисунок 1.1) з лабораторного комплексу маніпуляторно-конвеєрних установок. Даний стенд обрано завдяки його доступності та відповідності до задач дослідження.



Рисунок 1.1 - Загальний вигляд комплексу моделювання транспортно-розвантажувальних робіт на базі SCARA-робота

Ключові елементи стенду, важливі для аналізу енергоспоживання:

1) SCARA-подібний маніпулятор на базі трьох крокових двигунів BYJ, що забезпечують обертальні рухи «плеча» та «ліктя», а також вертикальний рух захвату. Це дозволяє відтворювати базовий цикл «pick-and-place» з характерними для промислових SCARA-роботів режимами розгону, стабільного руху та гальмування.

2) Електромагнітний захват для маніпуляцій з деталями. Його робота створює імпульсні навантаження на систему живлення, що доцільно враховувати при побудові енергетичного профілю циклу.

3) Конвеєрний модуль з електроприводом, який моделює транспортну частину процесу та водночас формує власне стабільне навантаження на систему живлення. Він дозволяє дослідити енергетичні втрати при переміщенні деталей між позиціями «завантаження» та «розвантаження».

4) Система керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 (CPU 1215C) та привідних модулів SINAMICS G120. Використання промислового контролера забезпечує можливість детального збору даних, у тому числі щодо режимів роботи виконавчих механізмів.

5) Оптичні датчики положення для фіксації крайніх точок руху. Вони не є суттєвими споживачами енергії, проте важливі для коректності реалізації циклу.

1.2 Аналіз літературних джерел за напрямом досліджень

Дослідження [14] присвячено мікроконтролерним системам, проте є надзвичайно корисним з методичної точки зору. Автори детально описують експериментальний підхід до побудови емпіричних моделей енергоспоживання, досліджуючи вплив тактової частоти, напруги живлення та режимів очікування.

Переваги: Цінний практичний досвід організації енергоаудиту на низькому апаратному рівні; методика може бути адаптована для моніторингу споживання окремих контролерів робота; чіткий акцент на емпіричному підході.

Недоліки: Об'єкт дослідження значно простіший за складну роботизовану систему; не враховуються механічні та динамічні фактори, що є вирішальними для робота.

Документ [15] є практичним керівництвом, що пропонує системний погляд на енергоменеджмент на рівні цілого підприємства. Він охоплює широкий спектр питань: від організаційних заходів та енергетичних аудитів до впровадження систем енергетичного менеджменту (EnMS) згідно з міжнародними стандартами.

Переваги: Надає готовий каркас для побудови системи енергоменеджменту; містить перелік конкретних інструментів та підходів; акцентує увагу на економічній складовій та організації процесів.

Недоліки: Має загальний, характер без прив'язки до робототехніки; відсутні технічні деталі щодо впровадження моніторингу автоматизованого обладнання.

Дослідження [16] українських вчених акцентує увагу на макроекономічному плануванні енергоспоживання великого промислового підприємства.

Переваги: Демонструє важливість часового планування навантаження (load shifting) для зниження витрат; пропонує модель, що може бути інтегрована в систему керування підприємством; враховує економічні фактори.

Недоліки: Модель працює на рівні всього підприємства і не призначена для оптимізації окремих одиниць обладнання; враховує тільки сумарне споживання.

Дослідження [17] демонструє застосування економіко-математичного апарату для аналізу та прогнозування динаміки енергоспоживання цілого виробничого комплексу. Автор будує модель, що враховує взаємозв'язок між обсягами виробництва, технологічними параметрами процесів та питомими витратами енергії, що дозволяє виявляти аномалії та прогнозувати навантаження.

Переваги: Практично орієнтована модель, що може бути основою для системи прийняття рішень; демонструє підхід до виявлення неефективності через відхилення від моделі; враховує технологічні та економічні фактори.

Недоліки: Модель макrorівня, не призначена для аналізу окремих одиниць обладнання; складність отримання вхідних даних для побудови та калібрування моделі; не розглядає реально-часову оптимізацію.

Автор роботи [18] пропонує оригінальний підхід до формального опису та моделювання енергоспоживання складних систем, заснований на апараті мереж Петрі. Цей метод дозволяє наочно відобразити дискретні стани системи, умови переходів між ними та енерговитрати, пов'язані з кожним станом.

Переваги: Наочність та формальна строгість моделювання; добре підходить для опису циклічних і дискретних технологічних процесів, типових для автоматизації; дозволяє виявляти логічні помилки та «вузькі місця» в алгоритмах роботи.

Недоліки: Модель більше орієнтована на логіку роботи та стани системи, ніж на безперервні динамічні процеси (наприклад, розгін приводу); може бути громіздкою для дуже складних систем; не враховує безперервні зміни потужності всередині одного стану.

Стаття [19] є оглядовою та актуалізує поняття енергетичного менеджменту в сучасних умовах, зокрема в контексті цифровізації та впровадження технологій Industry 4.0. Автор аналізує еволюцію від класичного обліку енергоресурсів до прогностичного аналізу та адаптивного управління на основі даних з IoT-сенсорів, роблячи акцент на кібербезпеці таких систем.

Переваги: Забезпечує актуальний концептуальний контекст для дослідження; розкриває тренди та майбутні напрями розвитку енергоменеджменту.

Недоліки: Має виключно оглядовий та концептуальний характер; не містить конкретних методик, алгоритмів чи практичних інструкцій щодо впровадження.

Робота [20] безпосередньо досліджує тему енергозбереження для мобільного робота. Досліджено алгоритми керування, спрямовані на мінімізацію енерговитрат при переміщенні шляхом оптимізації траєкторії руху та параметрів приводу.

Переваги: Безпосередньо відповідає темі енергозбереження в робототехніці; пропонує конкретні алгоритмічні рішення; демонструє повний цикл дослідження: від постановки задачі до моделювання.

Недоліки: Об'єкт дослідження має принципово іншу кінематику, динаміку та характер енерговитрат, порівняно зі стаціонарним маніпулятором, що обмежує пряме застосування результатів.

Публікація [21] демонструє сучасний інструментарій моделювання (MATLAB/Simulink) для створення детальних симуляційних моделей енергоспоживання. Автори на конкретному прикладі показують переваги середовища Simulink для моделювання динаміки системи та розрахунку енерговитрат.

Переваги: Використання потужного та стандартного інструменту моделювання; наявність верифікації моделі на реальному прикладі; модель враховує електромеханічні характеристики приводів.

Недоліки: Залежність від комерційного програмного забезпечення; модель потребує точних вхідних даних (параметрів двигунів, моментів інерції).

Публікація [22] пропонує конкретний математичний апарат для планування оптимальної за енерговитратами траєкторії руху SCARA-робота. Використано методи оптимізації для знаходження балансу між часом виконання циклу та енергоефективністю в контексті завдань пакування.

Переваги: Висока практична спрямованість; прив'язка до конкретного застосування; кількісна оцінка економії енергії; чіткий алгоритм.

Недоліки: Реалізація алгоритмів може вимагати потужних обчислювальних ресурсів; складність інтеграції в існуючі системи керування в реальному часі.

Дослідження [23] розглядає перспективну архітектуру для енергоменеджменту, засновану на інтеграції IoT та хмарних обчислень. Запропонована концепція передбачає передачу даних для машинного аналізу з метою прогнозування пікових навантажень та аномалій у споживанні.

Переваги: Масштабованість; прогностичний потенціал; можливість централізованого моніторингу парку обладнання.

Недоліки: Затримки в передачах даних (latency) роблять неможливим використання для швидкої оптимізації; висока складність та вартість впровадження, питання кібербезпеки.

Оглядний документ [24] систематизує відомі методи енергозбереження в промисловій робототехніці, класифікуючи їх за рівнями впливу: керування, привід, планування траєкторій та технологічний процес.

Переваги: Всебічне охоплення проблемами, чітка структуризація знань; визначення трендів; ідеальне джерело для формування загального контексту.

Недоліки: Як і в будь-якому огляді, пропущено деякі специфічні деталі; відсутні результати власного дослідження; швидко застаріває.

Загальний огляд

Проведений аналіз наукових публікацій дозволяє сформувати цілісне уявлення про сучасний стан досліджень в галузі енергоефективності промислових роботів та виокремити ключові вектори для власного наукового пошуку.

Сформована теоретико-методична база та її застосовність

Джерела [14-20] мають найбільшу пряму методичну цінність. Дослідження емпіричного моделювання мікроконтролерних систем [14] надає ключовий інструментарій для реалізації апаратної частини системи моніторингу. Робота [20] демонструє повний цикл розробки та перевірки енергозберігаючих алгоритмів для робота, що є взірцем для власного дослідження, навіть з огляду на відмінності.

На системному рівні джерела [15, 18-19] розкривають сучасні підходи до енергоменеджменту. Практичний посібник [15] пропонує готові інструменти та стандартизовані підходи для організації енергоаудиту. Моделювання на основі мереж Петрі [16] є надзвичайно корисним для формального опису та аналізу дискретних станів робота та пов'язаних з ними енерговитрат. Огляд [19] актуалізує поняття енергоменеджменту в контексті Industry 4.0.

Джерела [21-23, 24] становлять прямий науковий фундамент. Дослідження [21] та [24] пропонують конкретні інструменти (Simulink) та методи для моделювання та оптимізації енергоспоживання саме промислових роботів, включаючи SCARA. Огляд [24] систематизує усі відомі методи енергозбереження, що дозволяє чітко позиціонувати власний внесок у існуючий ландшафт знань.

Недоліки та прогалини в існуючих дослідженнях в контексті теми

Головний недолік проаналізованої бази – це відрив теоретичних та макромоделей від конкретної практичної реалізації для SCARA-роботів. Економіко-математичні моделі [16-17] працюють на надто високому рівні абстракції для оптимізації окремого маніпулятора. Більшість джерел розглядають

підходи ізольовано: або моніторинг [14], або алгоритми [20], або планування на рівні підприємства [16], але не їхню інтеграцію.

Крім того, існує брак досліджень, що пов'язують динамічні параметри руху з миттєвим енергоспоживанням саме для циклічних операцій, характерних для логістики. Джерело [16] пропонує описати стани, але не динаміку всередині них, а джерело [24] оптимізує траєкторію, але без глибокої інтеграції з системою моніторингу в реальному часі.

Окремо слід відзначити недостатню увагу до транспортних підсистем, зокрема конвеєрів. Хоча вони забезпечують безперервність виробничого процесу, конвеєрні лінії формують сталу частку енергоспоживання, яка може бути співставною з витратами на сам маніпулятор [37, 40]. Наявні дослідження здебільшого ігнорують комплексну взаємодію «робот-конвеєр».

Висновки та вектор для власного дослідження

Аналіз виявляє головну прогалину: відсутність комплексного рішення, що поєднує високочастотний моніторинг, динамічне моделювання та оптимізацію алгоритмів керування в контексті циклічних операцій.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що найбільш перспективним для даної роботи є інтегративний підхід. Наукова новизна може полягати не у відкритті принципово нового методу, а в комбінуванні та адаптації існуючих підходів саме для SCARA-роботів у контексті транспортно-розвантажувальних операцій.

1.3 Патентний пошук за напрямом досліджень

Патент [25] описує метод і систему для підвищення енергоефективності роботизованих маніпуляторів, зокрема SCARA-роботів, шляхом оптимізації керування рухами та використання стратегій рекуперації енергії. Особлива увага приділена мінімізації пікових навантажень на двигуни, що дозволяє знизити загальне енергоспоживання системи без зменшення продуктивності.

Переваги: Патент пропонує комплексний підхід до підвищення енергоефективності за рахунок комбінованого використання рекуперативного гальмування та оптимізованого керування рухами.

Недоліки: Реалізація такої системи вимагає додаткових апаратних ресурсів, таких як накопичувачі енергії або спеціалізовані приводи. Крім того, ефективність енергозбереження залежить від точності роботи алгоритмів керування, що потребує адаптації під конкретні виробничі процеси.

Патент [26] описує метод компенсації довжини плеча маніпулятора для SCARA-робота, що дозволяє підвищити точність його позиціонування. Система використовує попередньо збережені відповідності між довжинами двох сегментів (перший параметр) і вимірювання координат кінцевої точки маніпулятора (другий параметр) за допомогою системи вимірювання зміщень. Після цього обчислюються реальні довжини сегментів, які інтегруються в систему керування робота для корекції його рухів. Такий підхід дозволяє мінімізувати відхилення кінцевої точки маніпулятора від заданих координат, підвищуючи точність виконання операцій.

Переваги: Основною перевагою є підвищення точності управління SCARA-роботом без необхідності модифікації його механічної конструкції. Менше зайвих рухів означає менше витрат електроенергії, а також зниження навантаження на приводи.

Недоліки: Реалізація цього методу потребує додаткової системи вимірювання зміщень, що може ускладнити апаратну частину. Щодо енергоефективності, метод не спрямований безпосередньо на зниження споживання енергії, але може непрямо покращувати його за рахунок зменшення зайвих рухів.

Запропонований метод [27] управління SCARA-роботом з камерою, встановленою на другому плечі, спрямований на підвищення точності позиціонування камери шляхом компенсації механічних похибок та деформацій конструкції. Основна ідея методу полягає у вимірюванні нахилу оптичної осі камери щодо третьої осі та реєстрації відповідного корекційного значення у параметрах орієнтації між сегментами робота.

Переваги: Щодо енергоефективності, метод може скоротити надмірне споживання енергії, оскільки компенсовані механічні похибки дозволяють уникати зайвих коригувальних рухів.

Недоліки: Реалізація такого підходу вимагає додаткових вимірювальних сенсорів або систем, що ускладнює конструкцію робота та може збільшити вартість виробництва.

Запропонований патент [28] описує систему SCARA-робота, що включає механізм корекції позиціонування шляхом врахування закручуванням та прогину компонентів. Основним елементом є блок управління, що коригує рухи компонентів на основі коефіцієнтів кручення та прогину. Ці коефіцієнти зберігаються в пам'яті та дозволяють компенсувати відхилення, що виникають через навантаження та власні деформації роботизованої конструкції. Зокрема, система враховує вагу робочого інструменту або захопленого об'єкта для точного коригування положення вала.

Переваги: Основна перевага цієї системи – значне підвищення точності позиціонування завдяки автоматичній компенсації викривлень, що виникають через навантаження або механічні особливості конструкції. Використання моделей для розрахунку коефіцієнтів дозволяє зменшити необхідний обсяг пам'яті, що покращує швидкодію системи.

Недоліки: Складність алгоритмів корекції може збільшити обчислювальне навантаження на блок управління, що потребуватиме потужнішого процесора та відповідних енергетичних витрат. Висока точність корекції залежить від правильності моделей і точності сенсорів, тому помилки в калібруванні можуть призвести до збоїв у позиціонуванні, що може збільшити загальні енерговитрати.

Запропонований патент [29] описує метод управління траєкторією руху роботизованого маніпулятора. Основна ідея полягає у визначенні послідовності конфігурацій робота, що відповідають обробці множини об'єктів (субстратів). Система генерує план руху, що включає дані про швидкість і прискорення для кожного сегмента траєкторії, після чого роботизований маніпулятор виконує рухи відповідно до цього плану.

Переваги: Головна перевага цієї технології – підвищена точність і ефективність руху маніпулятора завдяки попередньому розрахунку траєкторії. Використання даних про швидкість і прискорення дозволяє мінімізувати інерційні навантаження, зменшуючи механічний знос компонентів та покращуючи енергоефективність роботи.

Недоліки: Реалізація такого алгоритму потребує високої обчислювальної потужності для безперервного розрахунку траєкторії у реальному часі, що може вимагати використання продуктивних процесорів або графічних прискорювачів.

Патент [30] пропонує методику управління енергоспоживанням промислових роботів шляхом динамічного регулювання параметрів роботи приводів залежно від реальних виробничих умов. Алгоритм передбачає інтеграцію прогнозних моделей, що враховують навантаження, швидкість та траєкторію руху. Важливим елементом є використання сенсорів для збору даних щодо навантаження, тертя та позиціонування, що дозволяє алгоритмам прогнозувати пікові енерговитрати та компенсувати їх.

Переваги: Суттєве зниження енергоспоживання без зменшення продуктивності; подовження строку служби електромеханічних вузлів за рахунок оптимізованих режимів; адаптивність до різних виробничих завдань та навантажень; можливість інтеграції в існуючі системи автоматизації завдяки програмному підходу.

Недоліки: Високі вимоги до сенсорної інфраструктури та обчислювальних ресурсів; ускладнення процесу налагодження через необхідність точного математичного моделювання; потенційна залежність ефективності від якості вхідних даних та їх достовірності.

У патенті [31] запропоновано інноваційний підхід до автоматизованої генерації людино-машинних інтерфейсів для систем керування промисловими процесами, включно з робототехнічними комплексами. Метод полягає у використанні цифрових інженерних креслень, що містять опис структури, топології та функціональних елементів обладнання.

Переваги: автоматизація процесу створення НМІ, що значно знижує трудові та часові витрати; забезпечення відповідності між інженерною моделлю та інтерфейсом; підвищення точності й зменшення кількості людських помилок; гнучке масштабування й швидка адаптація при модифікації креслень.

Недоліки: Метод залежить від якості та стандартизації цифрових креслень; при відсутності структурованих вихідних даних автоматична генерація може бути неефективною; можлива обмежена гнучкість для індивідуального налаштування НМІ, де потрібен креативний дизайн.

Патент [32] описує систему енергозбереження в роботизованих маніпуляторах шляхом динамічної оптимізації керування приводами. Алгоритм дозволяє розподіляти навантаження між електродвигунами залежно від поточного стану механізму та прогнозованої траєкторії руху. Особливу увагу приділено зворотному енергопотoku. Система забезпечує повторне використання цієї енергії для живлення інших вузлів або її накопичення в буферних елементах живлення.

Переваги: Головна перевага полягає у зниженні загального енергоспоживання до 20-30% завдяки рекуперації та оптимальному розподілу навантаження.

Недоліки: Впровадження такої технології потребує складних програмно-апаратних рішень і високоточної сенсорної системи для оцінки навантаження.

У патенті [33] представлено метод спільного керування кількома роботизованими маніпуляторами в рамках однієї виробничої лінії. Основний принцип полягає у створенні централізованого координатора, що розподіляє завдання між роботами та синхронізує їхні рухи, щоб уникнути зіткнень і оптимізувати використання простору. Передбачено можливість врахування енергоспоживання кожного робота:

Переваги: рішення дозволяє збільшити ефективність роботи виробничої лінії, підвищити рівень безпеки завдяки уникненню колізій, а також знизити сумарне енергоспоживання шляхом оптимізації розкладу виконання завдань. Використання централізованого контролю покращує масштабованість системи та дозволяє легко інтегрувати нових роботів.

Недоліки: централізований підхід створює ризик «єдиної точки відмови», оскільки збій у координаторі може призвести до зупинки всієї системи.

Патент [34] описує методику зниження енергоспоживання роботизованих комплексів на основі машинного навчання. Система аналізує історичні дані про роботу маніпуляторів і будує предиктивну модель. На основі цих прогнозів алгоритм автоматично пропонує оптимальні параметри руху – швидкість, прискорення, послідовність виконання завдань. У патенті розглядається інтеграція такого підходу у «розумні фабрики», де енергоспоживання виступає одним із ключових показників ефективності.

Переваги: використання машинного навчання дає змогу адаптувати систему до конкретних виробничих умов і поступово покращувати її ефективність без ручного втручання. Такий підхід дозволяє досягати економії енергії до 15–25% у залежності від типу операцій.

Недоліки: система потребує великої кількості даних для початкового навчання, а також високої обчислювальної потужності для роботи алгоритмів. У разі недостатньо якісного датчика або неповних даних ефективність оптимізації знижується.

Загальний огляд

Розробки охоплюють різні аспекти – від базового управління траєкторією і компенсації похибок конструкції [25-26] до оптимізації енергоспоживання на основі алгоритмів машинного навчання та рекуперації [30, 32-33]. Значна увага приділяється також багатороботним системам і їх синхронізації у патенті [33], що відображає сучасний тренд до інтеграції роботів у масштабовані виробничі комплекси. У цьому контексті все частіше розглядається і взаємодія роботів з транспортними підсистемами, насамперед конвеєрними лініями.

Хоча багато патентів орієнтовані на широке застосування у промисловості, вони формують цінний технічний і методичний фундамент для роботи з SCARA-роботами, зокрема у напрямку моніторингу енергоспоживання та оптимізації.

Сформована техніко-методична база та її застосовність

Компенсація похибок та базове управління. Патенти [25-29] демонструють широкий спектр методик, спрямованих на точність роботи SCARA-маніпуляторів: компенсація похибки довжини ланок [26], методи керування з урахуванням кінематики [25], системні рішення для координації роботи [28] та планування траєкторій [29]. Ці підходи забезпечують базу для коректного моделювання руху та дозволяють інтегрувати енергозберігаючі алгоритми без втрати точності.

Джерела [30, 32, 34] пропонують різні механізми енергозбереження: прямі алгоритми оптимізації енерговитрат [30], інтеграцію в «енергетичні платформи» з RPA [32], а також інтелектуальні методики з використанням машинного навчання [34]. Ці рішення є найближчими до завдань роботи та можуть бути адаптовані для SCARA-робота в частині розробки системи динамічного моніторингу.

Патент [33] пропонує використання алгоритмів рою (ant colony optimization) для навчання та керування SCARA-роботом. Подібні підходи добре узгоджуються з ідеєю використання еволюційних та евристичних алгоритмів у плануванні енергоефективних траєкторій. Також патент [33] є ключовим прикладом інтеграції кількох роботів у єдину систему з урахуванням енерговитрат, що може бути поширено і на сценарії взаємодії «робот-конвеєр».

Інтерфейси та інтеграція з виробництвом. Окрему нішу займає патент [32], який описує генерацію НМІ безпосередньо з цифрових креслень. Це відкриває шлях до автоматизації впровадження енергоефективних рішень у виробничих середовищах без додаткових витрат на інтеграцію.

Недоліки та прогалини в існуючих розробках

Фрагментарність рішень. Більшість патентів охоплюють або точність позиціонування [25-29], або енергозбереження [30, 32, 34], але не їх інтеграцію в єдину комплексну систему.

Відсутність орієнтації на SCARA-роботів у контексті циклічних логістичних операцій. Навіть спеціалізовані рішення [26–28] більше зосереджені на кінематиці, ніж на динамічних енерговитратах.

Обмеженість у реальному моніторингу. Хоча патенти [32, 34] пропонують використання машинного навчання, відсутня детальна інтеграція з сенсорними системами для збору даних у реальному часі на рівні окремих приводів.

Складність впровадження. Деякі методики потребують значних апаратних ресурсів і не завжди доцільні для компактних SCARA-роботів.

Висновки та вектор для власного дослідження

Аналіз патентів виявляє ключову прогалину: відсутність цілісного рішення, яке поєднує високу точність управління, динамічне моделювання енергоспоживання та адаптивні алгоритми оптимізації саме для SCARA-роботів у задачах «pick-and-place».

Звідси випливає найбільш перспективний вектор дослідження:

1) Інтегрувати рішення з патентів [30, 32, 34] для моніторингу та прогнозування енергоспоживання, але у вузькому контексті циклічних операцій, де динаміка (швидкість/прискорення) безпосередньо впливає на витрати.

2) Забезпечити взаємодію на рівні HMI [31], щоб отримані енергозберігаючі алгоритми могли бути безпосередньо впроваджені у виробничі системи.

3) Розширити аналіз на транспортні підсистеми, зокрема конвеєри, інтегруючи їх енергоспоживання у комплексну модель «робот конвеєр».

1.4 Недоліки та переваги існуючих рішень, методів

Аналіз сучасних наукових досліджень та практичних розробок у сфері енергоефективності робототехнічних систем дозволяє виділити низку методів та підходів, що застосовуються для зниження енергоспоживання SCARA-роботів та комплексів транспортно-розвантажувальних операцій.

Математичне та імітаційне моделювання енергоспоживання

До найбільш поширених методів належать математичні моделі та імітаційне моделювання, зокрема на основі середовища Simulink, як у праці [21].

Переваги: можливість прогнозування енергоспоживання на етапі проектування; відносна простота реалізації; гнучкість моделі при зміні параметрів роботи робота та конвеєра.

Недоліки: спрощення реальних умов, що призводить до розбіжності між теоретичними результатами та практикою; необхідність детального налаштування параметрів моделі для кожного конкретного випадку, що впливає з джерел [17-19].

Методи оптимізації траєкторій руху

У роботах [22, 24] пропонується мінімізувати енерговитрати за рахунок оптимального планування траєкторій руху маніпулятора.

Переваги: значне зниження енергоспоживання за рахунок плавності рухів; зменшення зносу приводів та механічних вузлів; можливість інтеграції в системи реального часу.

Недоліки: потреба у високій обчислювальній потужності контролера; складність у поєднанні оптимальних траєкторій з вимогами до швидкодії у виробничому процесі [22].

Використання енергоефективних алгоритмів керування

Застосування ПД-регуляторів та методів MPC дозволяє підвищити ефективність SCARA-роботів, як зазначено у джерелі [11]. Також перспективним є використання слайдінг-режимів керування, досліджених у роботі [12].

Переваги: можливість зниження пікових навантажень на приводи; адаптивність до змін навколишнього середовища; забезпечення більшої точності виконання завдань.

Недоліки: складність налаштування параметрів керування; підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів; у випадку ПД-регуляторів – недостатня гнучкість при складних сценаріях роботи [11-12].

Використання відновлювальних та регенативних приводів

Дослідження [13] зазначає, що одним із підходів є впровадження регенеративних приводів та пружних елементів, що дозволяють накопичувати й

повертати частину енергії. Для конвеєрів регенативні рішення також мають потенціал.

Переваги: суттєве зниження енергоспоживання; можливість використання в комплексах з високою інтенсивністю циклів.

Недоліки: ускладнення конструкції; підвищена вартість обладнання; потреба у додатковому технічному обслуговуванні.

Інтеграція IoT та хмарних технологій

Сучасні рішення, як у досліді [25], передбачають застосування IoT-сенсорів та хмарних платформ для збору й аналізу даних щодо енергоспоживання.

Переваги: можливість реалізації предиктивного обслуговування; централізований контроль та аналітика у масштабі підприємства; потенціал для інтеграції з системами енергоменеджменту.

Недоліки: залежність від якості мережевої інфраструктури; ризики кібербезпеки; збільшення затримок при обробці даних у хмарі.

Використання енергетичних KPI

Запровадження ключових показників ефективності (KPI) для моніторингу енергоспоживання робототехнічних систем, як зазначено у джерелах [35-36], дозволяє здійснювати постійний контроль.

Переваги: можливість кількісної оцінки результатів заходів з енергозбереження; інтеграція з системами управління виробництвом.

Недоліки: потреба у розробці методики вибору оптимальних KPI для конкретного виробництва; додаткові витрати на збір та аналіз даних, що підкреслюється у статті [35]. Нині відсутні загальноприйняті KPI для комплексів «робот-конвеєр», що є перспективним напрямком досліджень.

1.5 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень

Проведений аналіз наукових публікацій та технічних рішень показав, що жоден із існуючих методів оптимізації енергоспоживання промислових роботів не є універсальним. Одні з них орієнтовані виключно на алгоритмічні аспекти, інші –

на апаратні, тоді як більшість практичних реалізацій вимагають поєднання цих підходів.

У межах даної роботи як об'єкт дослідження використовується навчальний стенд із SCARA-подібним маніпулятором, конвеєром та системою керування на базі ПЛК. Для такого комплексу ключовим завданням є не розробка нового промислового рішення, а створення інструменту вимірювання, аналізу та подальшої оптимізації енергоспоживання. Це визначає специфіку вибору методів.

Причини відмови від існуючих рішень

Методи оптимізації траєкторій робіт [22, 24], хоча й забезпечують економію енергії, потребують складних обчислювальних алгоритмів та високопродуктивного апаратного забезпечення. Для навчального стенду це є надлишковим.

Апаратні рішення у вигляді рекуперативних приводів, як в дослідженні [13], малопридатні в умовах експериментальної установки через складність та високу вартість інтеграції.

IoT- та хмароорієнтовані методи моніторингу роботи [25] більш релевантні для промислових масштабів, але в навчальному стенді не забезпечують додаткової користі, оскільки головна мета – безпосередній енергоаудит.

Більшість існуючих методів також не враховують транспортні системи. Конвеєр, що працює синхронно з маніпулятором, створює власне стабільне навантаження на енергобаланс.

Таким чином, на стенді доцільно застосовувати методи прямого вимірювання споживаної електроенергії приводами та виконавчими механізмами з подальшою обробкою отриманих даних.

Обґрунтування обраного методу

У якості основного методу обрано метод прямого моніторингу енергоспоживання з використанням сенсорів струму та напруги з подальшою обробкою даних у мікроконтролері та аналізом профілю енергоспоживання.

Переваги підходу: дозволяє отримати реальні експериментальні дані, а не лише теоретичні моделі; забезпечує деталізацію по фазах циклу «pick-and-place» маніпулятора та транспортних фазах конвеєра, що дозволяє локалізувати найбільш

енерговитратні етапи; простий і недорогий у реалізації, що особливо важливо для навчального комплексу; методика легко масштабується: її можна адаптувати як для лабораторного стенду, так і для промислових роботів.

Недоліки у вигляді необхідності інтеграції додаткових сенсорів та калібрування системи вимірювання компенсуються простотою апаратного виконання та високою достовірністю результатів.

Очікувані результати

Запропонований підхід дозволить: побудувати деталізовані енергетичні профілі для окремих етапів роботи маніпулятора та конвеєра; виявити пікові режими споживання та потенційні «вузькі місця» системи; сформувати основу для подальшої оптимізації на програмному чи апаратному рівні, спираючись на фактичні дані.

Висновки до розділу

У першому розділі виконано системний аналіз предметної області дослідження, пов'язаної з енергоспоживанням робототехнічних комплексів транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-маніпуляторів. Розглянуто кінематичні та функціональні особливості SCARA-роботів, які визначають характер їхніх динамічних навантажень і, відповідно, формування енергетичного профілю під час виконання циклічних операцій типу «pick-and-place».

Проведений аналіз виявив фрагментарність існуючих рішень та недостатню кількість комплексних підходів, які поєднують високочастотний моніторинг енергоспоживання, аналіз динаміки руху та врахування транспортних підсистем у межах єдиного робототехнічного комплексу. На основі цього обґрунтовано доцільність використання методу прямого експериментального вимірювання енергоспоживання з подальшою програмною обробкою та візуалізацією даних.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОГО СТЕНДА

2.1 Вихідні дані та структура стенда

Дослідження виконуватиметься на основі навчально-дослідного стенда, що моделює транспортно-розвантажувальні операції із застосування SCARA-робота. Комплекс включає в себе кілька основних підсистем, серед яких провідне місце займає маніпулятор на базі трьох крокових двигунів BYJ48 із драйверами TB6560 V2.

Конструкція даного маніпулятора дозволяє реалізувати базові операції типу «pick-and-place», що відтворюють у спрощеному масштабі характерні режими роботи промислових SCARA-роботів.

Другим важливим компонентом є конвеєрна підсистема, оснащена електроприводом постійного струму, яка забезпечує подачу та відведення деталей у зону дії маніпулятора. На відміну від імпульсного режиму споживання маніпулятора, конвеєр характеризується стабільним енергоспоживанням, що може становити суттєву частку загальних витрат комплексу.

Керування усіма виконавчими механізмами здійснює контролер Siemens S7-1200 (CPU 1215C), який координує роботу маніпулятора і конвеєра, а також забезпечує можливість збору даних для подальшого аналізу енергетичних процесів.

Для живлення та регулювання приводів застосовуються модулі SIMATICS G120 у складі CU240E-2 PN та силового модуля PM240-2, які виконують функції перетворення енергії та підтримують конкретні режими роботи в умовах розгону та гальмування.

Додатково до складу комплексу входить модуль IoT2000 разом із RFID-рідером RF180C, що забезпечують інтеграцію сенсорних систем та реалізацію ідентифікації об'єктів перед їх захопленням. Для коректності роботи циклограми використовуються оптичні датчики положення, які фіксують крайні точки руху

механічних вузлів і гарантують правильність виконання операцій. Таким чином, стенд поєднує у собі як маніпуляторно-транспортні вузли, так і елементи промислової автоматики, створюючи експериментальну базу для аналізу енергоспоживання в умовах, наближених до виробничих.

Згідно зі специфікацією обладнання, крокові двигуни 28BJ38-12-300-01 працюють у парі з драйверами TB6560 V2, забезпечуючи обертальні рухи плеча і ліктя маніпулятора, а також вертикальне переміщення захвата. Блок живлення LOGO!Power (6EP3310-6SB00-0AY0) формує стабілізоване живлення 5 В для периферійних пристроїв, тоді як силовий модуль SINAMICS PM240-2 живить приводи маніпулятора від мережі 200-240 В. Блок керування CU240E-2 PN оснащений цифровими та аналоговими входами і виходами та має інтерфейс PROFINET для інтеграції в систему керування. Комунікаційний модуль CSM 1277 використовується як промисловий Ethernet-комутатор для обміну даними між контролером, приводами та IoT-модулем. SIMATIC IOT2000 має у своєму складі цифрові та аналогові входи і виходи (10DO, 2AI, 2AO), що дозволяє реалізувати збирання додаткових параметрів, у тому числі енергетичних характеристик. Конвеєрний електропривід живиться від джерела постійного струму PM1207 з напругою 24 В та струмом до 2,5 А, що визначає його середнє споживання на рівні десятків ват. У сукупності наведені характеристики створюють підґрунтя для подальшого аналізу енергоспоживання комплексу та визначення найбільш енергоємних його підсистем.

2.2 Теоретичні основи оцінки енергоспоживання

Теоретичний базис оцінки енергоспоживання робототехнічних комплексів, до яких належить досліджуваний стенд, ґрунтується на фундаментальних принципах електротехніки та механіки. Основним показником, що підлягає вимірюванню та аналізу, є електрична потужність, споживана окремими виконавчими органами системи – приводами маніпулятора, конвеєра, системою керування та допоміжними модулями.

Для ланцюгів змінного струму, від яких живляться такі компоненти стенда, як силовий модуль SINAMICS G120 та блок живлення LOGO!Power, миттєва потужність визначається як добуток миттєвих значень напруги та струму. Однак для практичних розрахунків енергоефективності використовується середнє за період значення повної потужності (S), яка обчислюється за формулою:

$$S = U * I \quad (2.1)$$

де U – діюче значення напруги (V), I – діюче значення струму (A). Для обладнання з реактивною потужністю, як-от електродвигуни, ключовим параметром стає активна потужність (P), що безпосередньо визначає виконану роботу та теплові втрати:

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (2.2)$$

де $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності, що характеризує співвідношення між активною та повною потужністю в системі.

Енергія (W), спожита системою або її окремим компонентом за проміжок часу Δt , визначається інтегруванням миттєвої потужності:

$$W = \int P(t)dt \quad (2.3)$$

Саме ця величина, що вимірюється у $Вт*год$, є кінцевим об'єктом аналізу в рамках енергетичного аудиту.

Для компонентів стенда, що живляться від джерел постійного струму, - таких як конвеєрний привід, що отримує живлення 24 В DC від джерела PM1207, а також крокові двигуни 28BJ48-12-300-01 з драйверами TB6560 V2 – розрахунок спрощується. У цьому випадку активна потужність визначається без урахування $\cos\varphi$:

$$P = U * I \quad (2.4)$$

Енергоспоживання маніпулятора типу SCARA, що моделюється на стенді, має чітко виражений циклічний характер, пов'язаний із фазами технологічного циклу «pick-and-place». Як показано в роботах [11, 20], основним джерелом втрат у таких системах є динамічні режими роботи приводів – розгін та гальмування ланок маніпулятора разом із корисним вантажем. Енерговитрати в цих режимах

значно перевищують витрати на переміщення зі сталою швидкістю. Тому для побудови точного енергетичного профілю необхідно фіксувати не сумарне споживання за цикл, а динаміку потужності з високою роздільною здатністю за часом, прив'язуючи її до траєкторії руху.

Теоретичний підхід до оцінки енергоспоживання стенда передбачає комбінацію методів безперервного моніторингу електричних параметрів (струму, напруги) на ключових виконавчих пристроях з подальшим обчисленням потужності та енергії, а також кореляцію отриманих даних із станами та фазами роботи технологічного циклу, використовуючи, зокрема, формальні методи опису дискретних станів системи, подібні до наведених у [16].

2.2.1. Електромеханічна модель приводу

Основним споживачем електроенергії в маніпуляторі є його приводи. На стенді використовуються крокові двигуни 28BJ48-12-300-01 драйверами ТВ6560 V2. Енергетичний баланс для кожного приводного модуля може бути представлений, як зазначено в джерелах [21, 41], у вигляді:

$$P_{el}(t) = P_{mee}(t) + P_{ju}(t) + P_{th}(t) \quad (2.5)$$

де: $P_{el}(t)$ – миттєва електрична потужність, що споживається з мережі живлення; $P_{mee}(t)$ – механічна потужність на валу двигуна, корисна витрата; $P_{ju}(t)$ – потужність втрат в обмотках двигуна (джоулеві втрати); $P_{th}(t)$ – потужність інших втрат, включаючи магнітні втрати в сталі та механічне тертя.

Механічна потужність на валу двигуна i -го ланки маніпулятора визначається як [41, с. 145]:

$$P_{me(I)}(t) = \tau_I(t) * \omega_I(t) \quad (2.6)$$

де $\tau_I(t)$ – момент, що розвивається двигуном, а $\omega_I(t)$ – кутова швидкість валу.

Джоулеві втрати, що перетворюються в тепло, є найсуттєвішою складовою втрат у крокових двигунах і розраховуються за класичною формулою, як зазначено в джерелі [14]:

$$P_{ju}(t) = I(t)^2 * R \quad (2.7)$$

де $I(t)$ – миттєвий струм через обмотку двигуна, а R – її активний опір.

2.2.2. Динамічні навантаження та їх вплив на енергоспоживання

Ключовим фактором, що формує профіль енергоспоживання SCARA-робота, є динаміка його руху. Момент навантаження τ_L , необхідний для руху i -го ланки, описується рівнянням динаміки маніпулятора [41]:

$$\tau(t) = M(q(t)) \ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t)) \dot{q}(t) + G(q(t)) + F(\dot{q}(t)) + \tau_{pall} \quad (2.8)$$

де: $M(q)$ – матриця інерції системи; $C(q, \dot{q})$ – матриця Коріолісових і відцентрових сил; $G(q)$ – вектор гравітаційних сил; $F(\dot{q})$ – вектор сил тертя; τ_{pall} – момент, обумовлений зовнішнім навантаженням (вагою деталі).

Як зазначається в дослідженнях [11, 20], найбільш енергоємними є саме режими розгону та гальмування, коли значення кутового прискорення $\ddot{q}(t)$ максимальні. Потужність, необхідна для забезпечення прискорення, квадратично залежить від швидкості зміни швидкості.

На рисунку 2.1 представлений типовий профіль потужності одного з приводів SCARA протягом одного циклу «pick-and-place».

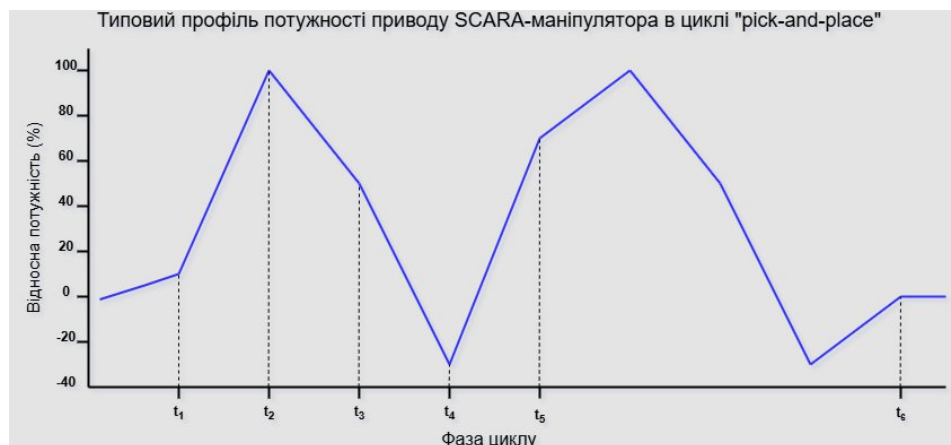


Рисунок 2.1 - Типовий профіль потужності приводу SCARA-маніпулятора в циклі «pick-and-place»

Цикл, зазначений на рисунку 2.1, складається з:

t_1 - t_2 : Розгін до робочої швидкості (різкий пік потужності).

t_2 - t_3 : Рух з сталою швидкістю (стабільне споживання).

t_3 - t_4 : Гальмування для позиціонування (можливі рекуперативні викиди).

t_4 - t_5 : Процес захоплення/розмикання (активація електромагніту).

t_5 - t_6 : Зворотний рух (аналогічні піки при розгоні/гальмуванні).

2.2.3. Вплив траєкторії та алгоритмів керування

Форма траєкторії безпосередньо впливає на динамічні навантаження, а отже, і на сумарне енергоспоживання. Дослідження [24, 37] доводять, що застосування енергооптимальних траєкторій, заснованих на мінімізації інтеграла від квадрата моменту або потужності протягом часу, може призвести до економії енергії на 15-25% порівняно з траєкторіями, оптимізованими виключно за часом. Така оптимізація передбачає згладжування профілю швидкості та прискорення, уникаючи різких змін, що видно при порівнянні траєкторій на рисунку 2.2.

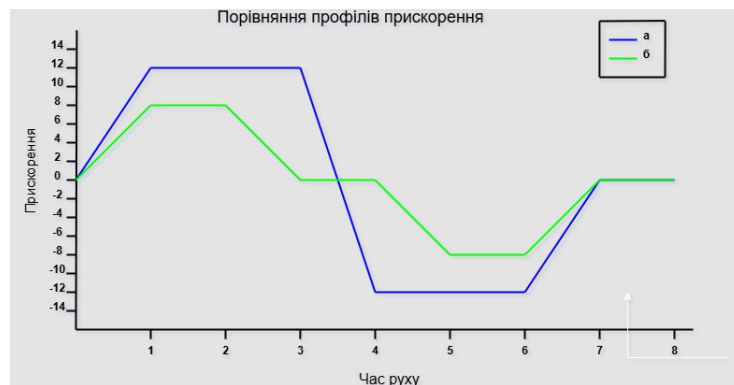


Рисунок 2.2 - Порівняння профілів прискорення для time-optimal (а) та energy-optimal (б) траєкторій

Крім того, алгоритми керування також відіграють вирішальну роль. Наприклад, застосування адаптивних ПІД-регуляторів або контролерів із ковзним режимом (sliding mode control), як у [11-12], дозволяє мінімізувати похибку відстеження траєкторії без надмірного перерегулювання, що також сприяє зниженню енерговитрат.

2.2.4. Експериментальні особливості вимірювання на стенді

Для експериментального дослідження енергоспоживання SCARA-маніпулятора на даному стенді необхідно організувати синхронний збір даних:

1) Електричні параметри: Вимірювання струму та напруги на вході кожного драйвера ТВ6560. Це дозволить, використовуючи формули (2.5), (2.6), (2.7), розрахувати електричну потужність та джоулеві втрати.

2) Кінематичні параметри: Фіксація поточних кутів (q) та швидкостей ($\dot{q}$) ланок маніпулятора через даних з енкoderів або шляхом інтегрування імпульсів, що задаються драйверами крокових двигунів. Ці дані необхідні для оцінки динамічних навантажень згідно з рівнянням (2.8).

3) Синхронізація з циклограмою: Прив'язка миттєвих значень потужності до фаз технологічного циклу (позиціонування, захоплення, переміщення, розмикання) за сигналами від оптичних датчиків положення та стану виходів ПЛК.

Такий комплексний підхід дозволить не лише отримати сумарні витрати енергії за цикл, але й ідентифікувати конкретні динамічні режими та конструктивні особливості, що роблять найбільший внесок у пікове та середнє енергоспоживання, що є першим кроком до подальшої оптимізації.

2.3 Енергоспоживання конвеєрної підсистеми

Конвеєрна підсистема є невід'ємною та енергетично значущою складовою досліджуваного робототехнічного комплексу. На відміну від імпульсного, динамічного навантаження SCARA-маніпулятора, енергоспоживання конвеєра характеризується значною мірою стабільності, однак його внесок у сумарний енергобаланс системи може бути порівняним з витратами маніпулятора, що підкреслюється в дослідженнях [37, 40]. Аналіз його енергоефективності вимагає врахування інших фізичних принципів а експлуатаційних факторів.

2.3.1. Фізичні основи та модель потужності приводу конвеєра

Електропривід конвеєра, зазначений у специфікації стенда, отримує живлення 24 В DC від джерела PM1207. В основі розрахунку його споживання лежить рівняння балансу потужностей, аналогічне формулі (2.5), але з істотно відмінним співвідношенням складових. Механічна потужність на валу двигуна конвеєра, необхідна для переміщення стрічки з вантажем, визначається, як наведено у джерелі [9], наступним чином:

$$P_{mee} = F_t * v_I \quad (2.9)$$

де: F_t – тягове зусилля на приводному барабані (Н); v – швидкість руху стрічки (м/с).

Тягове зусилля F_t є сумою сил опору руху конвеєра, до яких належать, як наводиться у джерелі [9]:

$$F_t = F_h + F_{st} + F_a \quad (2.10)$$

де: F_h - опір підйому вантажу (визначається висотою та масою); F_{st} – опір руху від тертя в підшипниках, між стрічкою та роликами; F_a – опір, пов'язаний з розгоном маси вантажу та стрічки (динамічна складова, аналогічна за природою до інерційних навантажень у маніпуляторі, але зазвичай значно менша за стаціонарні складові).

Для ланцюга постійного струму електрична потужність, що споживається приводом, розраховується за (2.7). Однак, ключовим параметром, що зв'язує P_{el} та P_{mee} , є загальний ККД привідного механізму (η), який враховує втрати в редукторі, механічні втрати та втрати в самому двигуні:

$$P_{el} = \frac{P_{mee}}{\eta} \quad (2.11)$$

Отже, навіть при сталому русі конвеєра без підйому вантажу ($F_h = 0$), система споживає енергію для подолання сил тертя, що робить цю складову основним джерелом втрат у неробочі періоди. Профіль навантаження та фактори впливу

На відміну від маніпулятора, профіль навантаження конвеєра є значно більш передбачуваним. Його можна умовно розділити на три характерні режими, представлені на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 - Типовий профіль потужності конвеєрної підсистеми

Цикл, зображений на рисунку 2.3, складається з таких етапів:

t_1 - t_2 : Пусковий режим. Характеризується різким зростанням потужності, необхідним для подолання статичного тертя та розгону маси стрічки та вантажу. Це найбільш енергоємна фаза в циклі роботи конвеєра.

t_2 - t_3 : Сталий режим. Потужність стабілізується на рівні, достатньому для подолання сил опору руху. Споживання в цьому режимі залежить від кількості та маси деталей на стрічці.

t_3 - t_4 : Режим простою. Якщо конвеєр не зупиняється між циклами, споживання знижується до рівня холостого ходу (P_{xx}), що визначається виключно внутрішніми механічними втратами.

Основними факторами, що впливають на енергоспоживання конвеєра, є:

- 1) Маса та кількість деталей: Безпосередньо впливає на сили опору F_h та F_{st} .
- 2) Швидкість стрічки: Споживання лінійно залежить від швидкості (див. (2.9)).
- 3) Технічний стан: Зношені підшипники, забруднення напрямних, неправильне натягнення стрічки – все це суттєво підвищує коефіцієнт тертя та, відповідно, F_{st} .

2.3.2. Стратегії оптимізації енергоспоживання конвеєра

Оскільки конвеєр є системою з переважно постійним навантаженням, класичні методи оптимізації траєкторії, ефективні для маніпуляторів, тут не застосовні. Натомість, основним резервом для енергозбереження є раціональне управління режимами його роботи:

1) Синхронізація з роботом маніпулятора. Найбільш очевидним заходом є зупинка конвеєра в періоди, коли SCARA-маніпулятор не виконує операцій з його стрічкою. Це дозволяє усунути витрати на холостий хід (P_{xx}), які можуть становити 20-40% від споживання в сталому режимі [40]. Імплементация такого підходу вимагає тісної інтеграції логіки керування конвеєром із циклограмою робота.

2) Оптимізація швидкості. Застосування приводів із регульованою швидкістю дозволяє знижувати швидкість стрічки в періоди з низькою інтенсивністю подачі деталей, що прямо пропорційно знижує споживання (за формулою (2.9)).

3) Планування навантаження. Якщо це дозволяє технологічний процес, енергоефективнішим може виявитися групове (пакетне) надходження деталей на конвеєр замість поштучного, оскільки це дозволяє мінімізувати кількість пускових режимів, найбільш енергоємних для конвеєра.

Експериментальна оцінка енергоспоживання конвеєрної підсистеми на стенді полягатиме в безперервному вимірюванні струму та напруги на вході його приводу з подальшим розрахунком потужності за формулою (2.7).

2.4 Сумарний енергетичний баланс системи

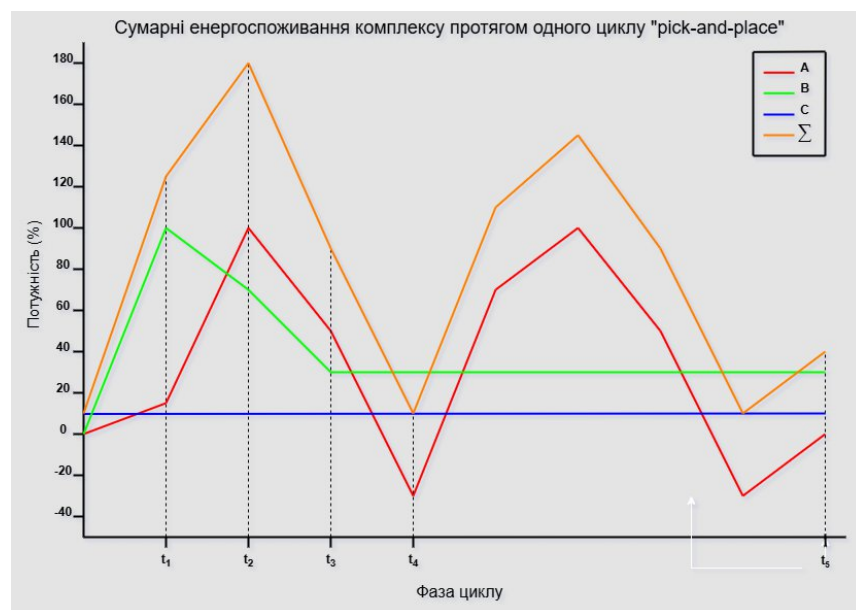
Синтез результатів аналізу енергоспоживання окремих підсистем дозволяє сформулювати цілісне уявлення про сумарний енергетичний баланс робототехнічного комплексу в цілому. Енергобаланс системи є динамічною характеристикою, що відображає розподіл та перетворення електричної енергії в механічну роботу та теплові втрати протягом технологічного циклу. Його

математичне представлення можна виразити як суму миттєвих потужностей усіх ключових споживачів:

$$\sum P_{sys}(t) = \sum P_{scara}(t) + P_{konv}(t) + P_{plc(keruv)}(t) + P_{aux}(t) \quad (2.12)$$

де: $\sum P_{scara}(t)$ – сумарна потужність, споживана приводами SCARA-маніпулятора; $P_{konv}(t)$ – потужність, споживана приводом конвеєра (див. формулу (2.11)); $P_{plc(keruv)}(t)$ – потужність, споживана системою керування (ПЛК Siemens S7-1200, модулі вводу-виводу), яка є практично сталою; $P_{aux}(t)$ – потужність допоміжних систем, таких як блок живлення 5V LOGO!Power для периферії, IoT-модуль та електромагнітний захват, споживання якого має імпульсний характер у моменти активації.

Графічна інтерпретація сумарного балансу представлена на рисунку 2.4 та демонструє, як окремі профілі (див. рис. 2.1 та рис. 2.3) накладаються один на одного, формуючи результуючий графік споживання всього стенду.



A – потужність SCARA-маніпулятора (імпульсні піки).

B – потужність конвеєра (стала складова з пусковими стрибками).

C – потужність системи керування та допоміжних модулів (сталій рівень).

Σ - сумарна потужність системи.

Рисунок 2.4 - Схематичне представлення сумарного енергоспоживання комплексу протягом одного циклу «pick-and-place»

2.4.1 Ключові закономірності та точки неефективності

Аналіз сумарного балансу дозволяє виявити характерні точки неефективності, які є основними мішенями для оптимізації:

1) Накопичення пікових навантажень. Найкритичнішими з точки зору максимального споживання є моменти часу, коли піки потужності маніпулятора (фази розгону) збігаються з пусковими стрибками потужності конвеєра. Це створює екстремальне навантаження на мережу живлення та силові компоненти. Стратегія оптимізації має бути спрямована на рознесення цих подій у часі шляхом відповідного планування циклограми [33].

2) Енерговитрати в періоди технологічних пауз. Якщо конвеєрна стрічка продовжує рухатися в періоди, коли маніпулятор не взаємодіє з нею, система необґрунтовано витрачає енергію на подолання сил тертя холостого ходу. Як зазначається в п. 2.3.2, ця складова може бути значною.

3) Відсутність рекуперації. На стенді відсутня апаратна можливість повернення енергії в мережу. Кінетична енергія масивних ланок маніпулятора та вантажу, що виділяється в режимах гальмування, не рекуперується, а розсіюється у вигляді тепла в драйверах та двигунах, що є прямими втратами [13, 30].

2.4.2 Інтегральні показники енергоефективності

Для кількісної оцінки ефективності всієї системи доцільно використовувати інтегральні показники (KPI), що рекомендуються стандартами енергоменеджменту [33, 36]. Основним таким показником для даного комплексу є питоме енергоспоживання на одну технологічну операцію:

$$E_{plt} = \frac{W_{sys}}{N} \quad (2.13)$$

де: W_{sys} – сумарна енергія, спожита комплексом за час виконання N операцій «pick-and-place», розрахована шляхом інтегрування сумарної потужності (див. формулу (2.12)) за час циклу; N – кількість успішно виконаних операцій.

2.4.3 Висновки для експериментального дослідження

Експериментальне дослідження сумарного енергобалансу вимагатиме синхронного збору даних з усіх вищеперелічених підсистем:

- Вимірювання струму та напруги на вході кожного драйвера маніпулятора, приводу конвеєра та головного живлення стенду.
- Фіксація дискретних сигналів для точної прив'язки енергетичних подій до фаз технологічного процесу.

Подальша обробка цих даних дозволить не лише підтвердити або уточнити представлені теоретичні моделі, але й кількісно оцінити внесок кожної підсистеми та кожного режиму роботи в загальні витрати енергії.

Висновки до розділу

У другому розділі виконано аналіз енергоспоживання робототехнічного стенда, що моделює транспортно-розвантажувальні операції. Розглянуто структуру стенда, склад його основних підсистем та визначено вихідні дані, необхідні для оцінки енергетичних параметрів.

На основі теоретичних положень електромеханіки та динаміки приводів проаналізовано вплив інерційних навантажень, режимів розгону і гальмування, а також особливостей траєкторії руху на формування миттєвого та інтегрального енергоспоживання. Окремо досліджено енергетичні характеристики конвеєрної підсистеми та показано, що навіть за відносно стабільного режиму роботи вона формує суттєву частку сумарних енерговитрат комплексу.

Проведено узагальнення результатів у вигляді сумарного енергетичного балансу системи, що дозволило виявити ключові закономірності розподілу енергоспоживання між маніпулятором і транспортною підсистемою, а також визначити потенційні точки неефективності. Отримані результати підтвердили доцільність детального моніторингу енергоспоживання у часовому розрізі з прив'язкою до фаз робочого циклу.

РОЗДІЛ 3.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

3.1 Вибір та обґрунтування апаратного забезпечення

3.1.1 Аналіз вимог до системи збору даних

Процес аналізу енергоспоживання комплексу моделювання транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-маніпулятора потребує створення підсистеми збору, обробки та передачі вимірювальних даних у реальному часі. Система повинна забезпечувати реєстрацію електричних параметрів у ключових вузлах стенда, їх передачу до центрального вузла обробки та подальшу інтеграцію з промисловими засобами візуалізації та керування.

Функціональні вимоги

Підсистема повинна забезпечувати реєстрацію миттєвих значень струму й напруги на кількох каналах із можливістю розрахунку споживаної потужності. Обмін даними між сенсорними модулями та контролером здійснюється через інтерфейс I²C із підтримкою адресації декількох пристроїв. Зібрані дані передаються по Wi-Fi до середовища Node-RED, яке виконує попередню обробку сигналів і передає інформацію до Grafana та через протокол OPC UA.

Технічні вимоги

Вимірювальна частина системи повинна забезпечувати роботу в діапазоні струмів до 100 А з точністю не гірше $\pm 1\%$ і напруг до 24 В DC з роздільною здатністю не менше 1 мВ. Частота опитування каналів має становити не менше 1 Гц, що дає змогу отримувати усереднені профілі потужності. електрична ізоляція між вимірювальними колами та контролером повинна бути не нижчою за 2,5 кВ RMS. Живлення системи здійснюється від напруги 5 В DC із можливістю підключення через DC/DC-перетворювач від мережі 24 В.

Експлуатаційні вимоги

Конструктивно система виконується у вигляді знімного модуля в окремому корпусі. Підключення здійснюється через клемні колодки, що забезпечує зручність обслуговування та підвищує надійність з'єднань. Усі елементи працюють у межах безпечних для навчальних лабораторій напруг до 30 В DC.

3.1.2 Вибір апаратного забезпечення

Для реалізації підсистеми збору даних обрано апаратні компоненти, які забезпечують необхідну точність вимірювань, стабільність роботи та сумісність із наявним навчальним стендом. Основу системи становить мікроконтролерна плата Raspberry Pi Pico 2 WH (Рисунок 3.1), що має інтегрований модуль Wi-Fi та підтримку I²C для підключення вимірювальних пристроїв.

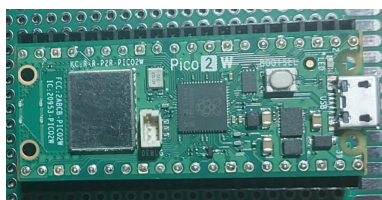


Рисунок 3.1 - Мікроконтролер Raspberry Pi Pico 2 WH

Для вимірювання електричних параметрів обрано цифрові сенсори INA226, які забезпечують точне вимірювання струму та напруги у постійному колі з передачею результатів через інтерфейс I²C. Для контролю змінних струмів у силових колах використано неінвазивні трансформаторні датчики типу SCT-013-100.

Для організації одночасної роботи кількох вимірювальних модулів використовується I²C-комутатор TCA9548A, який забезпечує адресацію до восьми незалежних пристроїв на шині.

Для підвищення електробезпеки в системі передбачено гальванічну розв'язку. Розв'язка реалізується за допомогою оптронів PC817, які ізолюють логічну частину від потенційно небезпечних напруг. Захист від імпульсних

перенапруг забезпечують супресори P6KE 24A, що запобігають пошкодженню електронних компонентів у разі короточасних стрибків напруги.

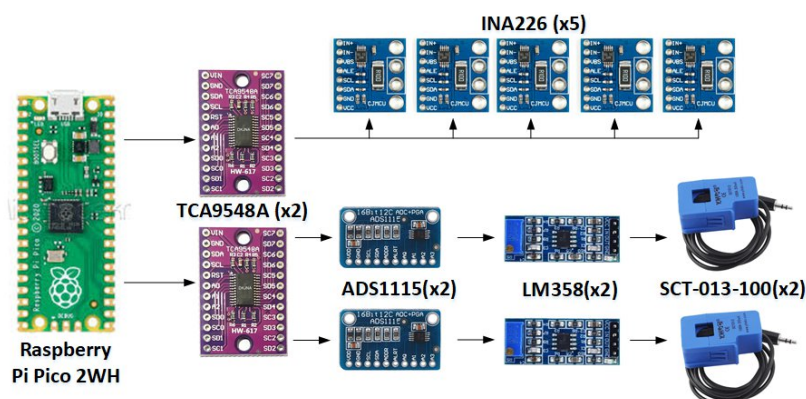


Рисунок 3.2 - Принцип підключення INA226 та SCT-013 до Raspberry Pi Pico через I²C-комутатор TCA9548A

Для формування стабільних рівнів живлення застосовуються стабілізатори AMS1117 на напруги 3,3 В та 5 В, а також понижувальні DC/DC-перетворювачі Mini-360, які забезпечують живлення вимірювальних модулів і мікроконтролера. Живлення системи здійснюється від джерела 24 В стенда з використанням окремого перетворювача постійної напруги.

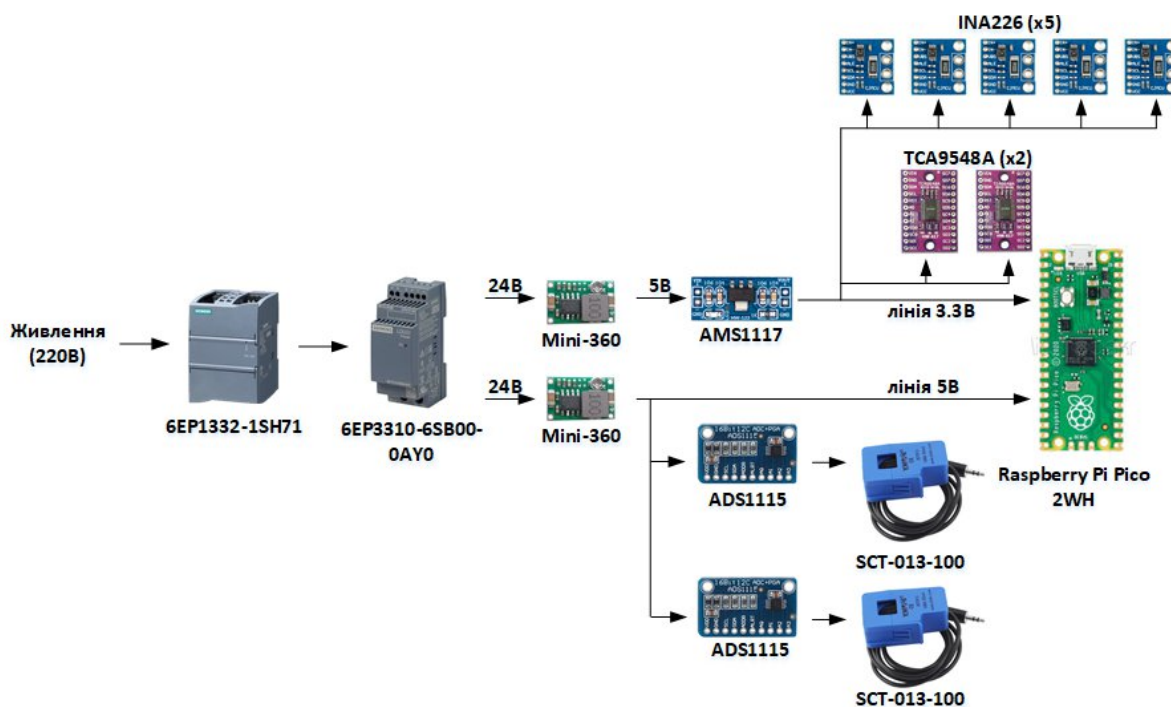


Рисунок 3.3 - Система живлення підсистеми збору даних

Монтаж усіх компонентів виконується на двосторонній макетній платі із підключенням через клемні колодки KF301, що забезпечують швидкий доступ до сигналів і зручність під час обслуговування. Для з'єднань використовуються дроти з мідною жилою в ізоляції, термоусадка з клеєм, кабельні наконечники та маркування, що підвищує надійність та довговічність конструкції.

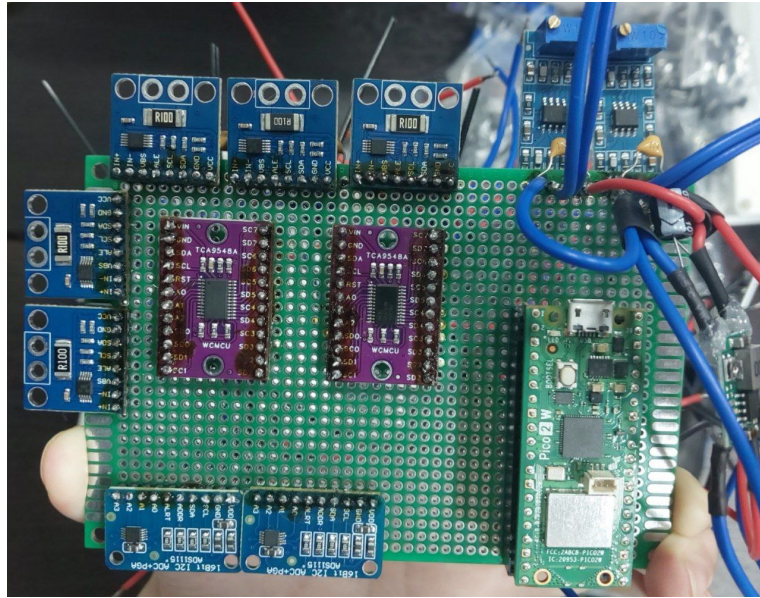


Рисунок 3.4 - Змонтовані на макетній платі елементи підсистеми

Елементи системи розміщуються в розподільчій коробці. Така конструкція забезпечує знімність та швидке підключення підсистеми до стенда без втручання у його основну структуру.



Рисунок 3.5 - Корпус підсистеми збору даних

Основні характеристики використаних елементів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Основні апаратні компоненти підсистеми збору даних

№	Компонент	Позначення	Призначення	Кількість
1	Raspberry Pi Pico 2 WH	U1	Збір та передача даних	1
2	INA226	A1-A5	Вимірювання струму та напруги	5
3	SCT-013-100	T1-T2	Вимірювання змінного струму	2
4	TCA9548A	IC1-IC2	Комутатор шин I ² C	2
5	PC817	U2-U11	Гальванічна розв'язка	5
6	P6KE 24A	D1-D5	Захист від перенапруг	6
7	AMS1117, Mini-360	PS1-PS3	Стабілізація живлення	3
8	KF301	XT1-XT6	Клемні з'єднання	2
9	Коробка розподільча	-	Монтаж корпусу підсистеми	1

Обране апаратне забезпечення забезпечує необхідний рівень точності вимірювань, електричну ізоляцію та стабільність живлення, а також сумісність з бездротовими мережами й засобами візуалізації. Компонувка у змінному корпусі робить систему зручною для інтеграції з навчальним стендом і придатною для проведення лабораторних досліджень з енергоспоживання.

3.1.3 Сумісність з існуючим стендом

Згідно зі специфікацією наявного навчального стенда (напевно потрібно надати його в списку літератури), до його складу входять: модуль керування з контролером Siemens S7-1200, панель оператора HMI Siemens KTP400, частотний перетворювач SINAMICS G120, блоки живлення 24 В DC, комутаційна панель із клемми, датчики положення та виконавчі механізми приводу маніпулятора. Стенд побудовано за модульним принципом і має відкриту структуру підключень, що як раз дозволяє додавати додаткові вузли без зміни базової схеми.

Підсистема збору даних узгоджується з існуючою архітектурою стенда як допоміжний модуль моніторингу. Передача інформації між підсистемою та основним контролером здійснюється за допомогою стандартного протоколу OPC UA, реалізованого у середовищі Node-RED. Це надає змогу інтегрувати отримані вимірювальні дані безпосередньо в систему керування без втручання і її програмну логіку. Node-RED виступає сервером OPC UA.

Електричне підключення підсистеми здійснюється через клема живлення 24 В DC, наявні у шафі стенда, з подальшим перетворенням напруги у внутрішньому блоці живлення до 5 В для живлення мікроконтролера та вимірювальних модулів. Неінвазивні датчики струму SCT-013-100 встановлюються на силових проводах приводів SCARA-маніпулятора та конвеєра.

Передача даних від підсистеми до вузлів візуалізації здійснюється через бездротове з'єднання Wi-Fi, що не потребує прокладання додаткових ліній зв'язку. Обране рішення забезпечує повну логічну сумісність підсистеми з програмним середовищем, яке використовується у навчальному комплексі.

Таблиця 3.2 Взаємозв'язок компонентів стенда та підсистеми збору даних

Компонент стенда	Сигнал або параметр	Елемент підсистеми	Тип з'єднання	Примітка
Приводи SCARA-маніпулятора	Струм, напруга	INA226, SCT-013-100	Неінвазивне підключення	Аналіз навантаження при русі
Конвеєрна лінія	Струм	SCT-013-100	Неінвазивне підключення	Моніторинг приводу конвеєра
Блок живлення 24 В	Напруга живлення	INA226	Парадодбне підключення	Контроль стабільності живлення
Панель НМІ КТР400	Візуалізація	OPC UA клієнт	Ethernet	Відображення потужності та енергії

3.2 Схема підключення та структура системи збору даних

3.2.1 Структурна схема технічних засобів автоматизації системи моніторингу

Структурна схема відображає склад основних апаратних вузлів системи та взаємозв'язки між ними.

Польовий рівень - датчики INA226, SCT-013, ADS1115 підключені через I2C-MUX до RPi Pico 2 WH.

Контрольний рівень - RPi Pico 2 WH обробляє дані та передає їх через Wi-Fi до ПК оператора.

Інформаційний рівень - Node-RED здійснює прийом даних, архівування та передачу до Grafana для візуалізації.

Інтеграційний рівень - PLC з'єднаний із існуючим промисловим комплексом.

Структурна схема технічних засобів автоматизації системи моніторингу наведена на рисунку 3.6.

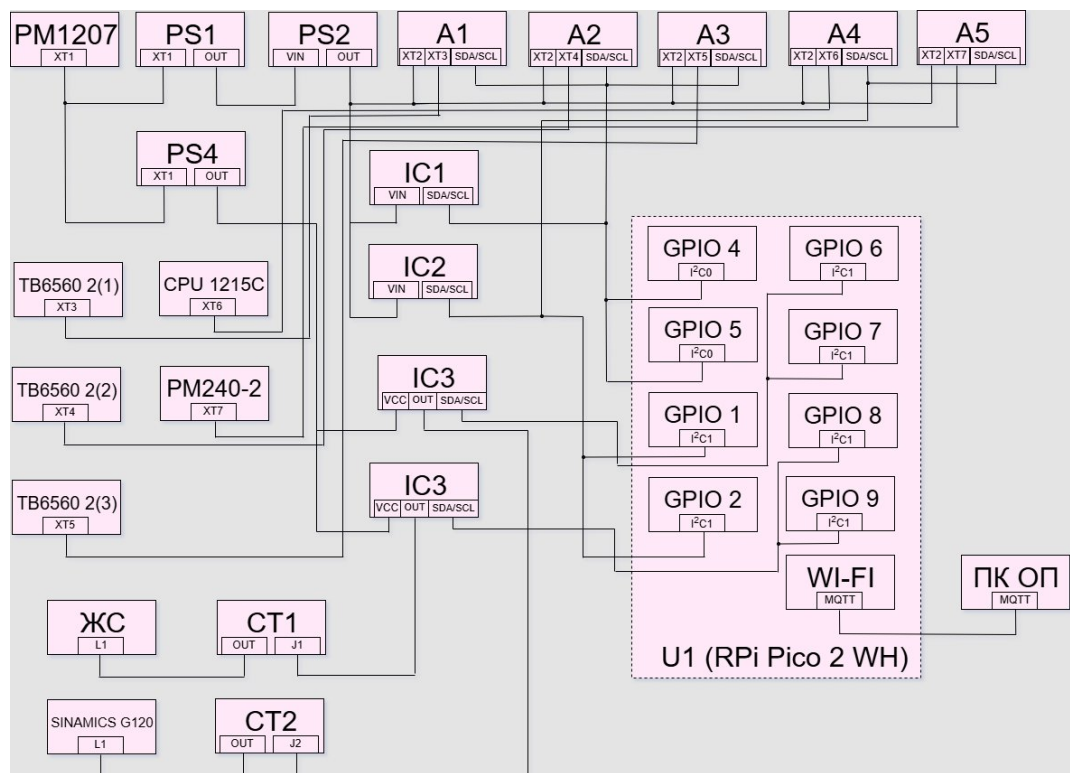


Рисунок 3.6 - Структурна схема технічних засобів автоматизації системи моніторингу

Таблиця 3.3. Специфікація елементів до структурної схеми підсистеми

Позначення	Елемент	Призначення
ПК ОП	Персональний комп'ютер оператора	Відображення даних енергоспоживання, аналітика у Grafana, Node-RED
ПЛК S7-1200	Програмований логічний контролер станда	Вимірювання струму та напруги
U1	Мікроконтролер збору даних	Центральний вузол підсистеми моніторингу; виконує оцифрування сигналів з датчиків струму/напруги, формує пакети даних для передачі через Wi-Fi
IC1, IC2	I ² C-комутатор 8-канальний	I ² C-комутатори для підключення вимірювальних модулів
INA226	Сенсори струму та напруги	Вимірюють параметри живлення вузлів станда (приводи SCARA, конвеєр, захват)
ADS1115	АЦП 16-біт для аналогових каналів	Використовується для додаткового збору аналогових параметрів
SCT-013-100	Неінвазивні датчики струму	Контроль споживання змінного струму основних приводів
AMS1117, Mini-360	Стабілізатори та DC-DC-перетворювачі	Живлення низьковольтних вузлів підсистеми
Wi-Fi-модуль (RPI вбудований)	Бездротова передача даних	Передача вимірювальної інформації у локальну мережу станда
Node-RED сервер/Grafana	Програмне середовище обробки	Агрегація, обробка та візуалізація даних про енергоспоживання

3.2.2 Функціональна структура системи моніторингу

Функціональна структура системи моніторингу наведена на рисунку 3.7.

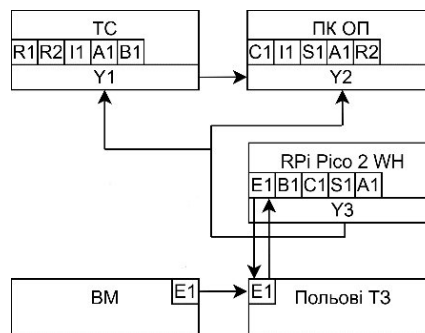


Рисунок 3.7 - Функціональна структура системи моніторингу

Деталізована схема функціональної структури представлена на рисунку 3.8.

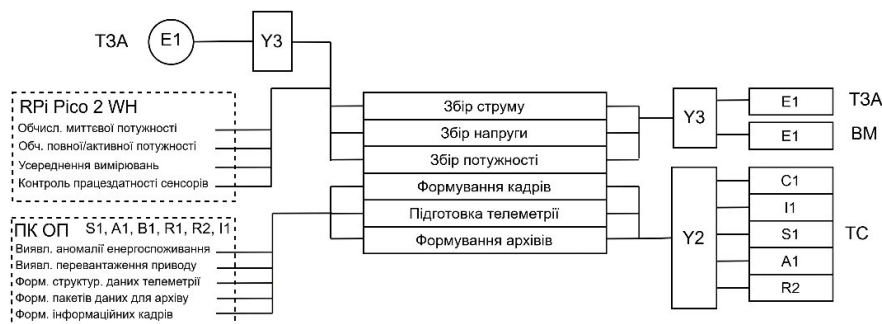


Рисунок 3.8 - Деталізована схема функціональної структури системи моніторингу

Таблиця 3.4 - Специфікація функціональної схеми системи

Позначення	Найменування
Загальні елементи	
ПК ОП	Персональний комп'ютер оператора (Node-RED, Grafana)
ПЛК	Програмований логічний контролер керування SCARA-комплексом
Rpi Pico 2 WH	Мікроконтролер збору даних енергоспоживання
ТС	Технічний сервер або локальний архів у Node-RED
Польові ТЗА	Датчики струму, напруги, потужності (INA226, SCT-013, ADS1115)
ВМ	Виконавчі механізми: електроприводи SCARA-робота, конвеєр, захват
Позначення сигналів	
E1	Зняття значень (вимірювальне перетворення параметрів струму, напруги, потужності)
Y1-Y3	Перетворення, обробка та фільтрація сигналів
B1	Передача даних через Wi-Fi до ПК оператора/Node-RED
C1	Контроль і налаштування параметрів моніторингу через інтерфейс користувача
I1	Відображення вимірюваних значень та графіків у Grafana Dashboard
R1, R2	Реєстрація параметрів та формування архівів даних (Node-RED/CSV/InfluxDB)
S1	Сигналізація про перевищення порогових рівнів споживання енергії
A1	Автоматичне сповіщення при аномаліях

Функціональна структура системи моніторингу демонструє логічні зв'язки між основними апаратними та програмними модулями системи, а також взаємодію з навчальним стендом.

ПК ОП (персональний комп'ютер оператора) - забезпечує прийом, обробку та відображення результатів моніторингу енергоспоживання у середовищах Node-RED та Grafana.

Мікроконтролер Raspberry Pi Pico 2 WH - виконує збирання даних із сенсорів струму й напруги, їх первинну обробку та формування пакетів вимірювальної інформації.

Польові технічні засоби автоматизації (ТЗА) - датчики струму, напруги, потужності та стану приводів.

Виконавчі механізми (ВМ) - електроприводи SCARA-маніпулятора, конвеєр, електромагнітний захват.

3.2.3 Схема інформаційних потоків і передача даних через Wi-Fi

Схема інформаційних потоків наведена на рисунку 3.9.

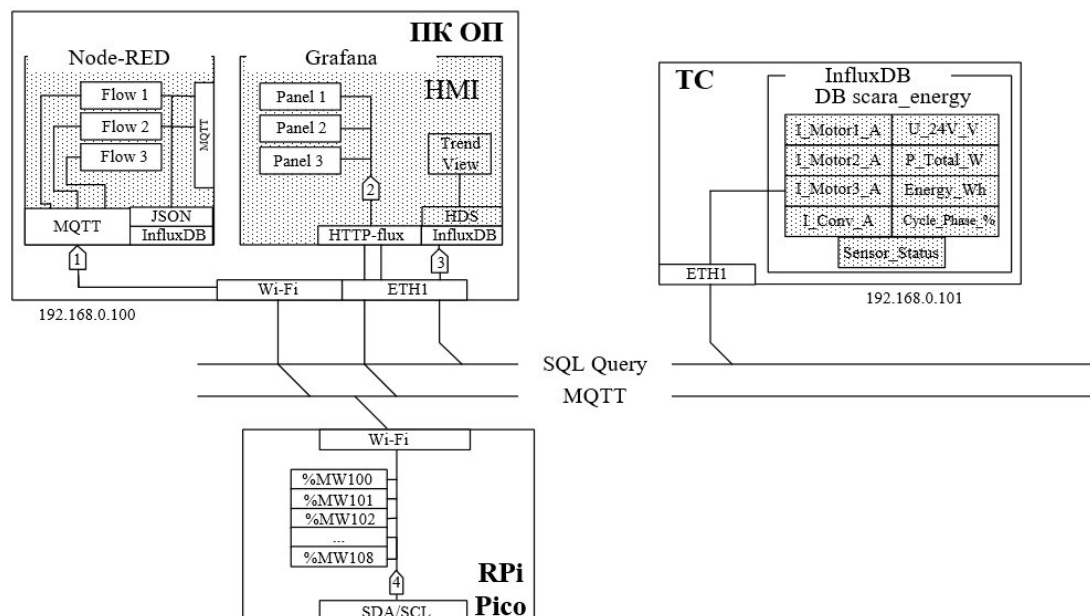


Рисунок 3.9 - Схема інформаційних потоків і передача даних через Wi-Fi

Таблиця 3.5 Вхідні потоки даних ПК ОП ← RPi Pico (енергоспоживання SCARA-робота та конвеєра, обчислення, діагностика)

Найменування	Вхідна змінна		Джерело		Перетворення	Період/ частота
	Ім'я	Тип	Вузол	Адреса		
Струм осі 1 (BYJ48)	I_Motor1_A	REAL	RPi Pico	%MW100	A	500 мс
Струм осі 2 (BYJ48)	I_Motor2_A	REAL	RPi Pico	%MW101	A	500 мс
Струм осі 3 (BYJ48)	I_Motor3_A	REAL	RPi Pico	%MW102	A	500 мс
Струм конвеєра (DC 24В)	I_Conv_A	REAL	RPi Pico	%MW103	A	500 мс
Напруга живлення 24В	U_24V_V	REAL	RPi Pico	%MW104	B	1 с
Загальна потужність	P_Total_W	REAL	RPi Pico	%MW105	Вт	500 мс
Фаза циклу pick-and-place	Cycle_Phase_%	REAL	RPi Pico	%MW106	%	500 мс
Накопичена ен. за цикл	Energy_Wh	REAL	RPi Pico	%MW107	Вт*год	500 мс
Статус датчиків/помилки	Sensor_Status	UINT	RPi Pico	^MW108	-	500 мс

Схема інформаційних потоків системи моніторингу енергоспоживання демонструє обмін даними між основними компонентами комплексу: мікроконтролером Raspberry Pi Pico 2 WH, програмно-аналітичним середовищем Node-RED/Grafana на ПК оператора.

3.2.4 Апаратурно-технологічна схема підсистеми моніторингу

Система інтегрується в існуючу структуру керування без втручання в алгоритм роботи ПЛК і виконує роль допоміжного аналітичного модуля.

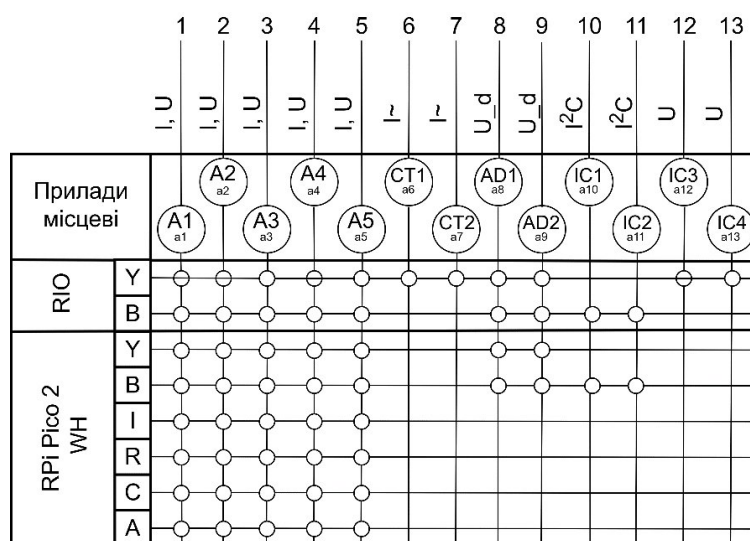


Рисунок 3.10 - Апаратурно-технологічна схема підсистеми моніторингу

Таблиця 3.6 Специфікація до апаратурно-технологічної схеми

Позначення	Найменування
Загальні елементи	
RPi Pico 2 WH	Мікроконтролер збору даних Raspberry Pi Pico 2 WH
RIO	Рівень виконавчих механізмів
Виконавчі механізми	
ST1-ST2	Датчики струму SCT-013-100
A1-A5	Цифрові сенсори струму та напруги INA226
AD1-AD2	Аналогово-цифрові перетворювачі ADS1115
IC1-IC2	Комутатори шини I ² C TCA9548A
IC3-IC4	Модуль підсилення LM358

Апаратурно-технологічна схема підсистеми моніторингу енергоспоживання призначена для відображення взаємозв'язків між апаратними модулями, які забезпечують вимірювання, обробку та передачу енергетичних параметрів у складі автоматизованої системи керування стендом.

Мікроконтролер M1 забезпечує збирання інформації від сенсорних вузлів, попередню обробку сигналів і передачу пакетів даних через Wi-Fi інтерфейс до комп'ютера оператора.

До нього підключені датчики S1-S2, які вимірюють змінний струм у силових лініях приводу SCARA-робота та конвеєра, а також цифрові модулі A1-A6, що фіксують напругу, струм і потужність окремих вузлів системи.

Аналогові сигнали з неінвазивних сенсорів надходять на AD1-AD3, які перетворюють їх у цифрову форму й передають по шині I²C до M1.

Комутатори MUX1-MUX2 забезпечують розподіл каналів I²C між кількома сенсорними пристроями та дозволяють масштабувати кількість вимірювальних точок без втрати стабільності обміну.

Живлення всієї підсистеми здійснюється через стабілізатори P1-P3, які формують напруги 5 В та 3.3 В для модулів і сенсорів.

Захист електронних компонентів від перевантаження реалізовано за допомогою запобіжників F1-F4.

Усі елементи монтуються на макетній платі в монтажній коробці B1, яка розташовується в шафі стенда поруч із контролером. Передача даних до PC1 виконується бездротовим каналом Wi-Fi із використанням протоколу MQTT. На

комп'ютері встановлено середовище Node-RED, яке приймає, фільтрує та архівує дані у базі InfluxDB. Дані відображаються у Grafana у вигляді графіків споживання струму, напруги, миттєвої потужності та сумарної енергії.

Для інтеграції в загальну систему керування передбачено обмін агрегованими параметрами між PC1 і контролером PLC1 через протокол OPC UA. Контролер отримує узагальнені показники потужності вузлів і може використовувати їх для корекції технологічних режимів або контролю перевищення порогових значень споживання.

3.3 Алгоритмічне забезпечення

3.3.1 Алгоритм вимірювання та обробки сигналів від сенсорів

Після ввімкнення системи мікроконтролер Raspberry Pi Pico 2 WH ініціалізує інтерфейси зв'язку, виконує перевірку наявності підключених сенсорів INA226, ADS1115 і неінвазивних датчиків SCT-013. Відбувається послідовне зчитування вимірювальних сигналів через шину I²C та аналогові входи. Дані проходять фільтрацію і перетворення у фізичні одиниці. Обчислюється миттєва потужність і накопичується сумарне енергоспоживання за визначений інтервал часу.

Після математичної обробки формується структурований пакет даних у форматі JSON, який містить часову мітку, поточні параметри кожного каналу та службову інформацію. Пакет передається через Wi-Fi інтерфейс за протоколом MQTT до комп'ютера оператора.

На приймальній стороні середовище Node-RED виконує перевірку цілісності пакету та його розбір на окремі параметри.

Після цього дані архівуються у базі InfluxDB, а середні та миттєві значення подаються до системи Grafana для відображення у вигляді графіків.

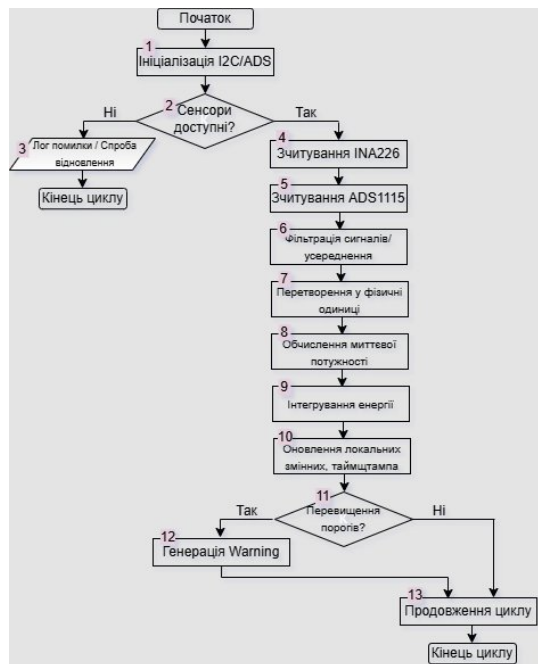


Рисунок 3.11 - Алгоритм вимірювання сигналів сенсорів

Паралельно Node-RED здійснює контроль за перевищенням порогових значень потужності або струму, формуючи відповідні сигнали попередження. При фіксації перевищень система генерує повідомлення оператору або передає сигнал у контролер S7-1200 для коригування режиму роботи стенда. Таким чином, забезпечується двосторонній обмін між вимірювальною підсистемою та керувальною частиною комплексу.

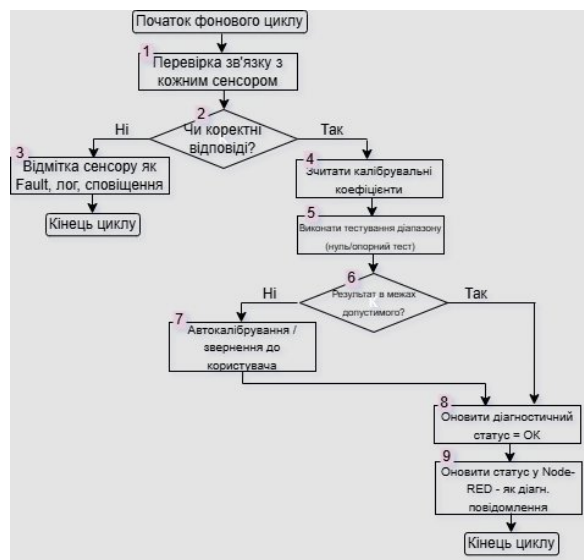


Рисунок 3.12 - Алгоритм обробки та передачі даних у підсистемі моніторингу

Алгоритми забезпечують безперервний цикл збору та аналізу даних з високою частотою оновлення, при цьому затримка між моментом вимірювання та відображенням інформації на графічному інтерфейсі не перевищує однієї секунди.

3.3.2 Алгоритм формування пакетів даних та передача через Wi-Fi

Формування пакетів даних є ключовим етапом функціонування підсистеми моніторингу енергоспоживання, оскільки саме на цьому рівні відбувається перехід від внутрішніх вимірювань до структурованої інформації, готової для передачі мережею.

Алгоритм побудований таким чином, щоб забезпечити мінімальні затримки, цілісність даних та стійкість до переривань зв'язку у бездротовому каналі.

Після завершення циклу вимірювання мікроконтролер Raspberry Pi Pico 2 WH виконує перетворення отриманих числових масивів у структурований формат. Для кожного каналу формується набір параметрів: миттєве значення струму, напруги, потужності, розрахована енергія, а також часові мітки вимірювання. Далі створюється об'єкт структури даних, у якому кожен параметр має унікальний ідентифікатор. На основі цієї структури формується JSON-пакет, який містить заголовок (з інформацією про джерело, номер циклу та час формування) і тіло з масивами виміряних значень.

Перед відправленням здійснюється контроль цілісності - підрахунок контрольної суми або вбудоване кодування CRC. Якщо перевірка проходить успішно, пакет надсилається через Wi-Fi за допомогою протоколу MQTT у відповідну тему каналу обміну. У випадку втрати з'єднання або помилки передачі виконується спроба повторної відправки після короткої паузи.

Для забезпечення стабільності обміну встановлюється часовий інтервал між циклами формування пакетів - у середньому одна секунда.

Після успішної передачі дані приймаються середовищем Node-RED на комп'ютері оператора, де вони проходять повторну перевірку цілісності, зберігаються у буфері та передаються далі до бази InfluxDB. Для оптимізації

трафіку передбачено стиснення масивів даних і передавання лише змінених параметрів між послідовними циклами.

У випадку відсутності відповіді від сервера протягом встановленого часу контролер зберігає останні виміряні дані у внутрішньому буфері та надсилає їх повторно після відновлення з'єднання.

Завдяки такому алгоритму забезпечується гарантована доставка даних до аналітичної системи, узгодження часових міток вимірювань і стійка робота підсистеми моніторингу навіть при короткочасних збоях бездротового зв'язку. Формат JSON дозволяє легко інтегрувати отриману інформацію в програмні середовища обробки, а використання протоколу MQTT забезпечує легку масштабованість і мінімальне навантаження на мережу.

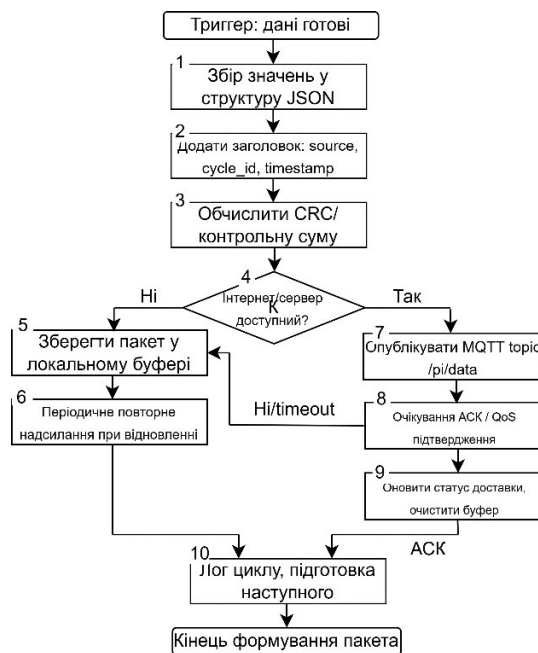


Рисунок 3.13 - Алгоритм формування пакетів даних та передача через Wi-Fi

3.3.3 Алгоритм публікації даних у Node-RED

Після отримання пакету від мікроконтролера Raspberry Pi Pico 2 WH середовище Node-RED виконує послідовність операцій, спрямованих на валідацію, публікацію та подальшу передачу даних у керуючу систем.

На першому етапі відбувається перевірка цілісності пакету MQTT та його розбір у вузлі JSON Parser. Дані класифікуються за каналами вимірювання (струм,

напруга, потужність, енергія) і тимчасовими мітками. Після цього Node-RED формує внутрішні змінні контексту потоку, що слугують буфером для подальшої передачі в різні підсистеми.

Потім етапі виконується архівування результатів у базі InfluxDB, де створюються часові ряди параметрів. Паралельно з архівацією дані публікуються у Dashboard для візуального моніторингу поточних значень та графічного аналізу споживання енергії у Grafana.

Загальна логіка роботи відображена на рисунку 3.14.

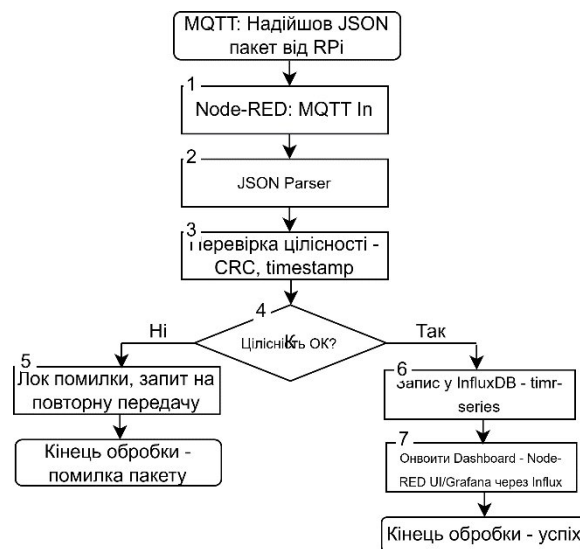


Рисунок 3.14 - Загальна логіка роботи

3.4 Програмна реалізація

3.4.1 Програмне забезпечення Raspberry Pi Pico 2 WH

Програмне забезпечення Raspberry Pi Pico 2 WH реалізоване мовою MicroPython та призначене для збору, первинної обробки й передачі даних про енергоспоживання елементів комплексу у систему верхнього рівня.

Прошивка забезпечує зчитування параметрів електричних кіл із використанням датчиків INA226, ADS1115 та неінвазивних трансформаторів струму SCT-013-100, формування структурованих пакетів даних і передачу їх через бездротову мережу Wi-Fi за протоколом MQTT до середовища Node-RED.

Ініціалізація апаратних ресурсів включає налаштування інтерфейсу I²C для обміну даними з цифровими сенсорами та використання вбудованого ADC для вимірювання аналогових сигналів. Опитування сенсорів здійснюється циклічно з фіксованим інтервалом, що забезпечує рівномірну дискретизацію вимірювань.

Отримані значення напруги, струму та потужності об'єднуються у JSON-пакети, які містять ідентифікатор пристрою, часову мітку та контрольну суму для перевірки цілісності даних. Передача пакетів виконується через MQTT-брокер.

Для підвищення надійності роботи реалізований механізм локальної буферизації даних. У разі втрати мережевого з'єднання сформовані пакети тимчасово зберігаються у внутрішній пам'яті контролера та автоматично передаються після відновлення зв'язку.

Частина розробленої прошивки для RPi Pico наведена на рисунку 3.15:

```

116 # ----- ПУБЛІКАЦІЯ ДАНИХ -----
117 def publish_sensor_data(mqtt, sensor_name, sensor_type, node, data, p
118     """Публікація всіх даних датчика в один топик"""
119     topic = f"{BASE_TOPIC}/sensor/{sensor_name}"
120
121     payload = {
122         "timestamp": ts,
123         "sensor": sensor_name,
124         "type": sensor_type,
125         "node": node,
126         "phase": phase,
127         "cycle_id": cycle_id,
128         "phase_id": phase_id,
129         "data": data # Всі дані датчика в одному об'єкті
130     }
131
132     try:
133         mqtt.publish(topic, json.dumps(payload))
134     except Exception as e:
135         print(f"Error publishing to {topic}: {e}")
136
137 def publish_energy_data(mqtt, cycle_energy, total_energy, ts, phase,
138     """Публікація енергетичних даних"""
139     # Енергія за цикл
140     if cycle_energy is not None:
141         topic_cycle = f"{BASE_TOPIC}/cycle_energy"
142         payload_cycle = {
143             "timestamp": ts,
144             "phase": phase,

```

Рисунок 3.15 - Фрагмент коду прошивки Raspberry, публікація даних

3.4.2 Конфігурація потоків у Node-RED та створення бази даних

Вся програмна частина була розгорнута в докер-контейнерах.

☐	Name	Container ID	Image	Port(s)	Actions
☐	influx	e378ca59394a	influxdb:1.8	8086:8086	
☐	mosquitto	3cd064b4dc67	eclipse-mo	9001:9000	
☐	nodered	7c9e344ff4c8	nodered:nc	1880:1880	
☐	grafana	dbfea5ec36ce	grafana/gr	3000:3000	

Рисунок 3.16 - Створені в Docker контейнери

Для обробки, архівації та візуалізації даних про енергоспоживання, отриманих від мікроконтролера Raspberry Pi Pico 2 WH, було використано середовище Node-RED.

Архітектура потоку Node-RED

Основним джерелом даних у системі є MQTT-брокер, до якого мікроконтролер публікує структуровані JSON-повідомлення. Для підписки на відповідні теми було сконфігуровано чотири основні MQTT-входи (Рисунок 3.17):

`diplom/sensor/#` – для отримання детальних показників (напруга, струм, потужність) від усіх окремих датчиків (INA226, SCT-013).

`diplom/cycle_energy` – для отримання значення енергії, витраченої на один повний технологічний цикл.

`diplom/total_energy` – для отримання сумарного значення витраченої енергії з моменту старту системи.

`diplom/node_summary` – для отримання агрегованих показників по кожному вузлу системи (сумарна потужність, струм, кількість датчиків).

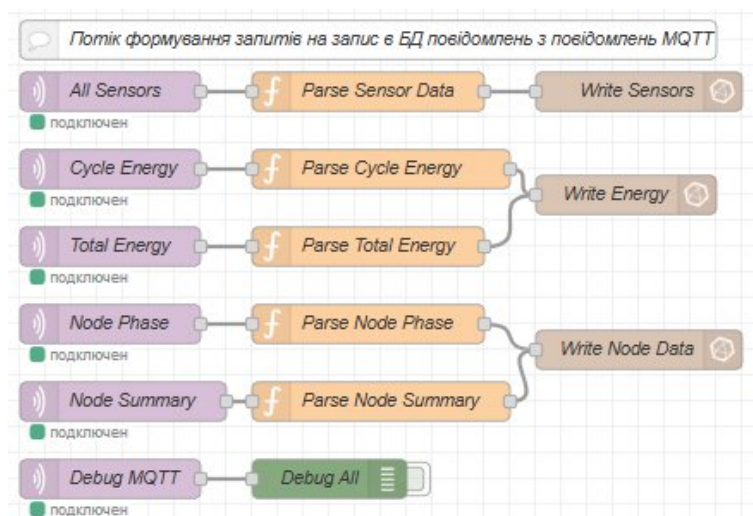


Рисунок 3.17 - Основний потік в Node-RED

Кожен з цих вхідних потоків обробляється окремим функціональним вузлом типу Function, який виконує парсинг вхідного JSON-об'єкта та трансформує його у структуру, прийнятну для запису в базу даних часових рядів InfluxDB. Ця структура включає:

Вимірювання – унікальна назва метрики (наприклад, `ina1_current`, `cycle_energy`).

Поля – числові значення, що безпосередньо зберігаються (наприклад, `value: 1.25`).

Теги – ключові атрибути для фільтрації та групування даних (наприклад, `sensor: "ina1", node: "scara", phase: "pick", cycle_id: "5"`).

Для ефективного запису даних використано вузол `influxdb batch`, який дозволяє здійснювати групове (batch) занесення декількох точок даних за один запит, що суттєво знижує навантаження на сервер бази даних та підвищує загальну продуктивність системи моніторингу.

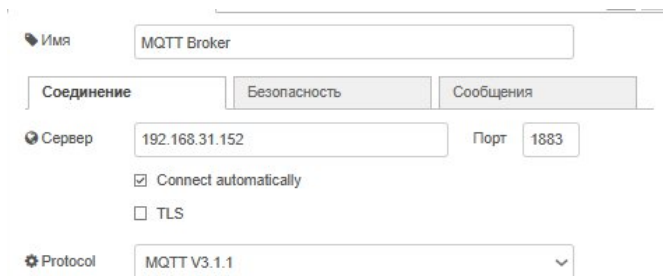


Рисунок 3.18 - Налаштування MQTT-broker вузла

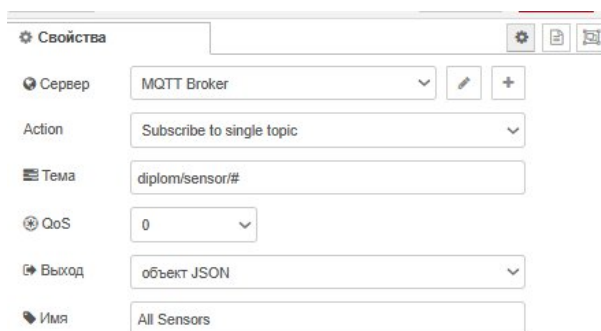


Рисунок 3.19 - Налаштування вузла mqtt in



Рисунок 3.20 - Налаштування вузла influxdb batch

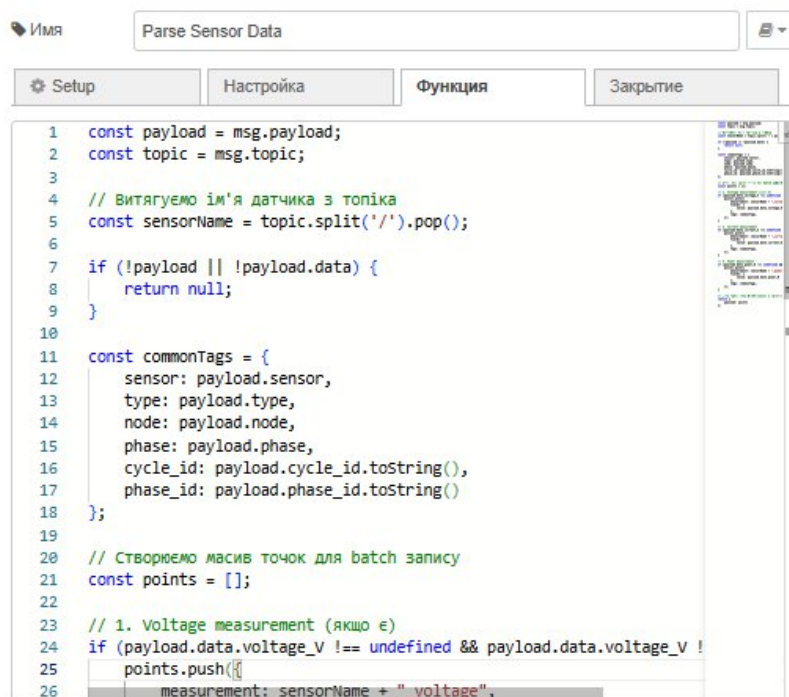


Рисунок 3.21 - Фрагмент коду парсера для відправки поточних вимірювань для запису в базу даних

Створення та конфігурація бази даних

Як сховище даних обрано сервер InfluxDB версії 1.8, розгорнутий на тому ж хості, що й MQTT-брокер (IP-адреса: 192.168.31.152). Для проєкту створено окрему базу даних з назвою `gpi_db`. Усі отримані та оброблені в Node-RED дані бекапуються в цю базу, формуючи повноцінний історичний архів. Наявність такого архіву є критичною для проведення подальшого аналізу енергоспоживання, порівняння різних режимів роботи стенда та побудови трендів.

3.4.3 Візуалізація енергоспоживання у Grafana

Для наочного представлення результатів моніторингу та аналізу енергоспоживання робототехнічного стенда у реальному часі в межах даної роботи використано програмну платформу Grafana.

Основним джерелом даних для Grafana виступає база даних часових рядів InfluxDB, у яку надходять виміряні значення напруги, струму, миттєвої потужності та накопиченої енергії після обробки у середовищі Node-RED.

У Grafana було створено окрему інформаційну панель, яка містить набір графічних елементів для відображення ключових енергетичних параметрів системи. Зокрема, реалізовано графіки часових залежностей споживаного струму та напруги, що дозволяє аналізувати режими роботи приводів маніпулятора та конвеєра.



Рисунок 3.22 - Панель з графіками споживання SCARA-робота

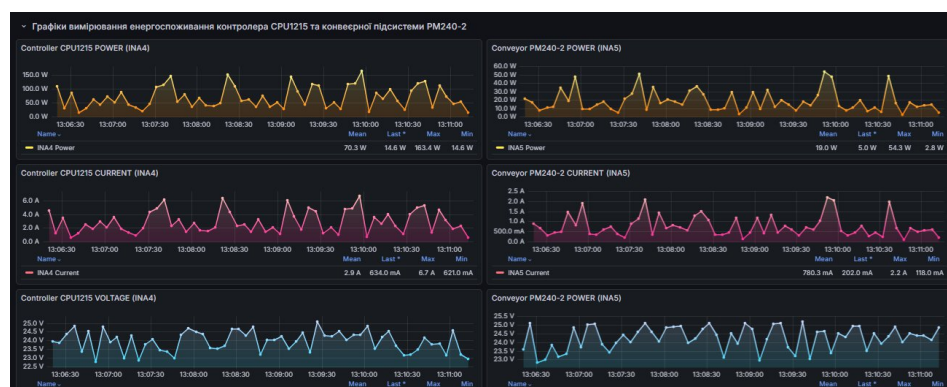


Рисунок 3.23 - Панель з графіками споживання конвеєра та контролера

Окремі панелі відображають миттєву електричну потужність, що дає змогу ідентифікувати пікові навантаження під час фаз розгону, гальмування та захоплення вантажу.

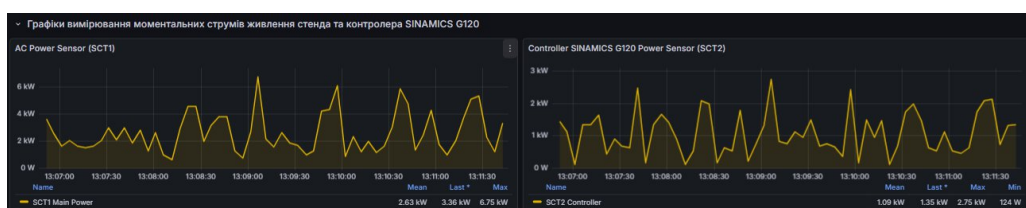


Рисунок 3.24 - Панель графіку значень моментальних значень струму для живлення станда та контролера

Додатково застосовано панелі типу stat та gauge для відображення поточних значень параметрів у зручній для оператора формі.



Рисунок 3.25 - Панель виведення поточних значень спожиття по вузлам



Рисунок 3.26 - Панель з виведенням фази циклу pick-and-place, споживаної енергії за весь час та споживаної енергії за один цикл

Реалізована система візуалізації дозволяє здійснювати безперервний моніторинг енергоспоживання робототехнічного комплексу у реальному часі та формує основу для подальшої оптимізації алгоритмів керування. Використання Grafana у поєднанні з InfluxDB та Node-RED забезпечує гнучке, масштабоване та наочне рішення, що відповідає сучасним вимогам до систем промислового енергомоніторингу.

Висновки до розділу

У третьому розділі здійснено практичну реалізацію автоматизованої системи аналізу енергоспоживання робототехнічного стенда. Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення системи збору даних, визначено його відповідність вимогам щодо сумісності з існуючим навчально-дослідним стендом.

У програмній частині реалізовано взаємодію між мікроконтролерною платформою, середовищем Node-RED, базою даних InfluxDB та системою візуалізації Grafana. Забезпечено надійне збереження часових рядів енергетичних параметрів та їх наочне відображення у вигляді інтерактивних панелей моніторингу.

Реалізована система підтвердила можливість ефективного використання сучасних програмно-апаратних засобів для енергоаудиту робототехнічних комплексів у навчальних і дослідних цілях. Отримані результати створюють основу для подальшої оптимізації алгоритмів керування та впровадження енергоефективних режимів роботи SCARA-маніпулятора і конвеєрної підсистеми.

ВИСНОВОК

У даній дипломній роботі розглянуто задачу аналізу та моніторингу енергоспоживання робототехнічного комплексу транспортно-розвантажувальних операцій на базі SCARA-маніпулятора. Актуальність роботи зумовлена зростаючими вимогами до енергоефективності промислових роботів, а також необхідністю зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності автоматизованих виробничих систем.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних наукових та технічних рішень у сфері енергоефективності робототехнічних систем, визначено основні джерела енергетичних втрат та обґрунтовано доцільність застосування експериментального підходу до оцінки енергоспоживання з використанням автоматизованих засобів збору даних. Досліджено вплив режимів руху маніпулятора та роботи транспортної підсистеми на формування енергетичного профілю робототехнічного комплексу.

У межах практичної частини розроблено та реалізовано програмно-апаратну систему моніторингу енергоспоживання, яка включає мікроконтролерну платформу, сенсори струму та напруги, бездротовий канал передавання даних і серверну частину на базі Node-RED, InfluxDB та Grafana. Реалізовано алгоритми вимірювання, обробки, збереження та візуалізації енергетичних параметрів у реальному часі, що забезпечує можливість детального аналізу як миттєвих, так і інтегральних показників енергоспоживання.

Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого підходу та показали можливість використання розробленої системи для енергоаудиту робототехнічних стендів у навчальних і дослідних цілях. Реалізована архітектура є гнучкою та масштабованою, що дозволяє адаптувати її до інших типів маніпуляторів і технологічних процесів без суттєвих змін апаратної частини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Положення про проведення практики студентів вищих навчальних закладів України Міносвіти; Наказ, Положення, Форма типового документа від 08.04.1993 No 93. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0035-93>.
2. Методичні рекомендації про складання програм практики студентів вищих навчальних закладів України / укладачі: О. Є. Пантелеймонов, Л. М. Кохановський. Міністерство освіти України, 1995. 12 с.
3. Цеков Ю. І. Збірник нормативних документів та інформаційних матеріалів з питань експертизи дисертаційних досліджень: Довідник офіційного опонента. Київ, Редакція «Бюлетеня Вищої атестаційної комісії України», видавництво «Толока», 2010. 64 с.
4. Пупена О. М., Ельперін І. В., Кушков В. М. Методичні рекомендації до виконання дипломного проекту (роботи) для студ. спец. 7.05020202 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» Київ, НУХТ, 2012. 48 с.
5. Ткачов В.В., Цвіркун Л.І., Пушкар М.С. Методичні рекомендації для студентів спеціальності 7.05020101 Комп'ютеризовані системи, управління та автоматика: Дипломне проектування. Дніпро, НГУ, 2014. 46 с.
6. Ткачов В.В., Бубліков А.В., Цвіркун Л.І., Проценко С.М. Методичні рекомендації для студентів-бакалаврів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Дипломне проектування. Дніпро : НГУ, 2016. 29 с.
7. News - scara robot: working principles and application landscape. <https://www.boruntehq.com/>. URL: <https://surl.li/trrlin> (дата звернення: 28.01.2025).
8. How do SCARA robot make production lines more flexible and agile? - TopStar. *TopStar*. URL: <https://surl.li/cgjcnf> (дата звернення: 28.01.2025).

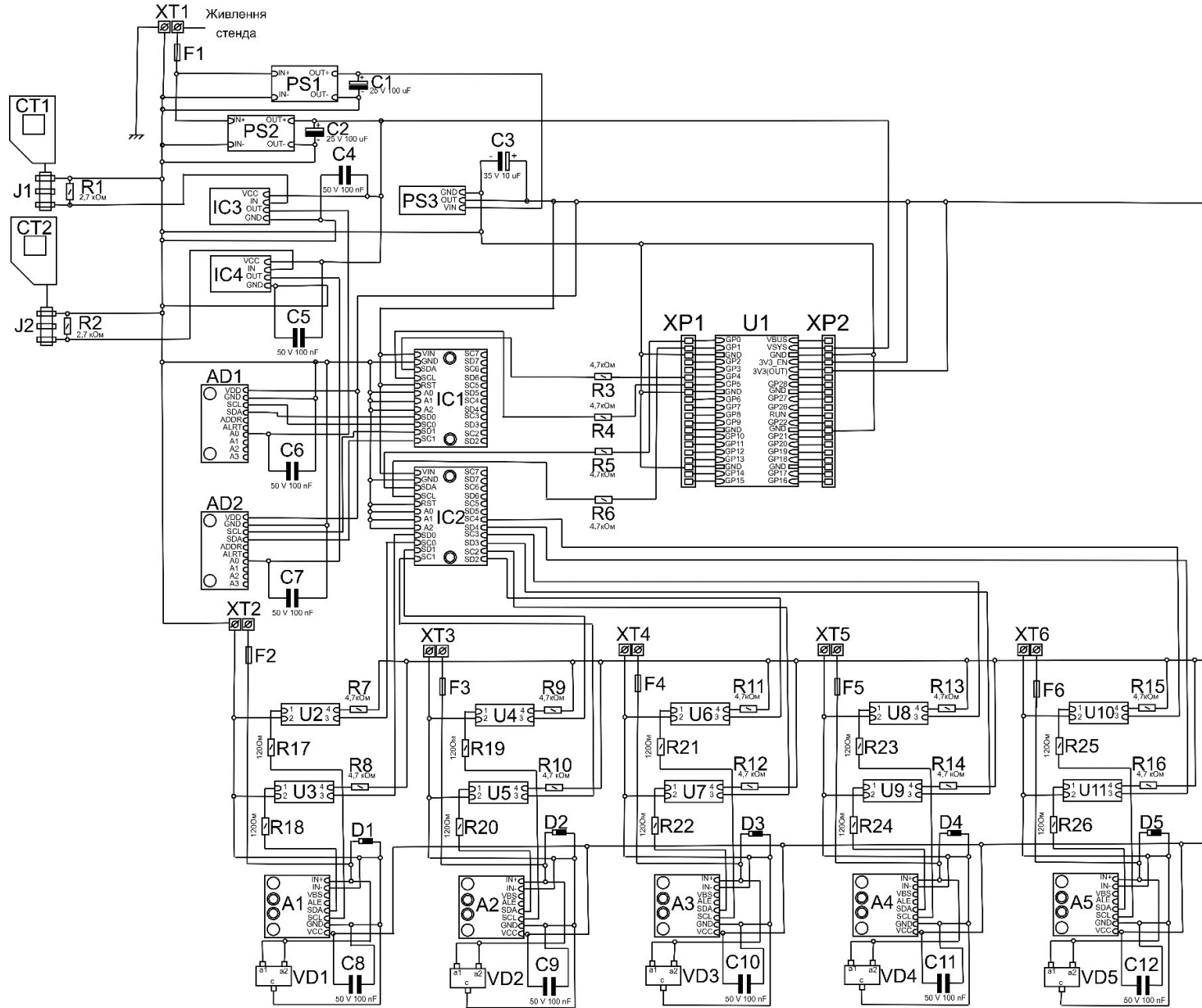
9. Contributors to Wikimedia projects. SCARA - wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SCARA> (дата звернення: 29.01.2025).
10. Optimizing energy consumption of industrial robots with model-based layout design / S. Răileanu та ін. *Sustainability*. 2024. Т. 16, № 3. С. 1053. URL: <https://doi.org/10.3390/su16031053> (дата звернення: 01.02.2025).
11. Benotsmane R., Kovács G. Optimization of energy consumption of industrial robots using classical PID and MPC controllers. *Energies*. 2023. Т. 16, № 8. С. 3499. URL: <https://doi.org/10.3390/en16083499> (дата звернення: 01.02.2025).
12. Optimization of sliding mode control to save energy in a SCARA robot / L. A. Soriano та ін. *Mathematics*. 2021. Т. 9, № 24. С. 3160. URL: <https://doi.org/10.3390/math9243160> (дата звернення: 01.02.2025).
13. Minimization of the energy consumption in industrial robots through regenerative drives and optimally designed compliant elements / I. Palomba та ін. *Applied sciences*. 2020. Т. 10, № 21. С. 7475. URL: <https://doi.org/10.3390/app10217475> (дата звернення: 01.02.2025).
14. Емпіричне моделювання залежності енергоспоживання мікроконтролерної системи // Вісник Криворізького державного педагогічного університету. Серія: Фізика. Електроніка. Обчислювальна техніка. – 2024. – Вип. 2. – С. 63-72. – URL: https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2024_2_63.pdf (дата звернення: 03.02.2025).
15. Інструменти енергоефективності в промисловості та АПК: практичний посібник / Офіс Сталих Рішень. – Київ, 2024. – 120 с. – URL: https://ukraine-oss.com/wp-content/uploads/2024/09/draft_posibnyka_energoefektyvnist_web-1.pdf (дата звернення: 03.02.2025)
16. Коваленко І. В. Модель планування енергоспоживання металургійного підприємства / І. В. Коваленко, С. П. Сидоренко // Наукові інновації та передові технології. – 2024. – № 3(11). – С. 45-58. – URL: https://www.researchgate.net/publication/339994877_MODEL_PLANUVANNA_ENERGOSPOZIVANNA_METALURGIJNOGO_PIDPRIEMSTVA (дата звернення: 03.02.2025).

17. Мельник О. П. Економіко-математичне моделювання динаміки енергоспоживання збагачувальної фабрики / О. П. Мельник // Економічний вісник ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет». – 2024. – Вип. 35, № 1. – С. 54-63. – URL: https://www.econ.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/35_74_1/5.pdf (дата звернення: 05.02.2025)
18. Петренко В. І. Моделювання електроспоживання складних технологічних систем на основі мереж Петрі / В. І. Петренко // Проблеми моделювання та автоматизації проектування. – 2024. – № 119. – С. 5-10. – URL: https://pmap.donntu.edu.ua/sites/upload/articles/pmap_2024-no119end-5-10.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
19. Савчук А. М. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети та сучасні підходи / А. М. Савчук // Енергетика та автоматика. – 2023. – № 4. – С. 112-125. – URL: <https://energy.kpi.ua/article/download/297508/291992/691038> (дата звернення: 24.02.2025)
20. Пономарьов О. В. Энергозберігаючі алгоритми керування переміщенням мобільного робота: магістерська робота / О. В. Пономарьов ; наук. кер. В. П. Іваненко ; Сумський державний університет. – Суми, 2023. – 87 с. – URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/94048/1/Ponomarov_mag_rob.pdf (дата звернення: 08.03.2025)
21. Energy Consumption Modeling of Industrial Robots Based on Simulink: A Case Study // Energies. – 2022. – Vol. 15, Issue 18. – P. 6790. – URL: <https://doi.org/10.3390/en15186790> (дата звернення: 10.03.2025).
22. Energy-Efficient Trajectory Planning for SCARA Robots in Packaging Applications // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 12491–12500. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9319986> (дата звернення: 10.03.2025).
23. Integration of IoT and Cloud for Predictive Maintenance of Industrial Robots and Energy Management // Sensors. – 2021. – Vol. 21, Issue 8. – P. 2744. – URL: <https://doi.org/10.3390/s21082744> (дата звернення: 14.03.2025).

- 24.A Review on Energy-Saving Methods in Industrial Robotics // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Vol. 78. – P. 102407. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102407> (дата звернення: 15.03.2025).
- 25.Robot arm and methods of use : пат. US10925681B2 Сполучені Штати Америки (США) : A61B34/30; A61B90/50; B25J13/08; B25J9/16; A61B34/20; A61B90/00;. № 10925681 ; заявл. 30.07.2018 ; опубл. 21.02.2021, Бюл. № 505026343. 9 с.
- 26.Arm length parameter compensation method, apparatus, and device for SCARA robot, and non-volatile readable storage medium : пат. WO2024060569 Китай : B25J9/16. № 23866866 ; заявл. 20.09.2022 ; опубл. 28.03.2024. 29 с.
- 27.Method for controlling SCARA robot : пат. WO2022118374 Японія : B25J9/06, B25J13/08. № 20964228 ; заявл. 01.12.2020 ; опубл. 09.06.2022. 43 с.
- 28.SCARA robot system : пат. WO2022024243 Японія : B25J9/10, B25J9/06. № 20946554 ; заявл. 29.07.2020 ; опубл. 03.02.2022. 45 с.
- 29.Robot arm trajectory control : пат. US2024075617A1 Сполучені Штати Америки (США) : B25J9/16;. Заявл. 06.09.2022 ; опубл. 07.03.2024. 26 с.
- 30.An improved method for controlling energy consumption of industrial robots : пат. CN119304870A Китай : B25J9/16, G05B19/418. № 202311832107.0 ; заявл. 29.12.2023 ; опубл. 18.09.2024. – 15 с.
- 31.Generation of a hmi for industrial control from digital engineering drawings : пат. EP3929685B1 Європейський союз : B25J9/16, B25J13/00. № 20175698.7 ; заявл. 21.05.2020 ; опубл. 19.10.2022. – 18 с.
- 32.AI-based energy edge platform, systems, and methods having a robotic process automation system : пат. US12332621B2 США : G05B19/418, B25J9/16. № 17/345,678 ; заявл. 11.06.2021 ; опубл. 28.11.2023. – 22 с.
- 33.SCARA robot experimental device based on ant colony optimization and control method : пат. CN114888828A Китай : B25J9/16, G05B19/418. № 202210524317.0 ; заявл. 13.05.2022 ; опубл. 02.08.2022. – 12 с.
- 34.Robot enabling control method, apparatus, electronic device and storage medium : пат. CN120503209A Китай : B25J9/16. № 202410156789.X ; заявл. 02.02.2024 ; опубл. 05.11.2024. – 14 с.

35. Managing energy using key performance indicators - whitepaper. *Siemens*. URL: <https://surl.li/dsiskb> (дата звернення: 15.05.2025).
36. ENIT: the top 7 energy performance indicators in energy management. *ENIT Startseite* | *ENIT*. URL: <https://surl.li/mkrhen> (дата звернення: 21.05.2025).
37. Lorenz M. Energy-efficient trajectory planning for robot manipulators - RWTH Publications. RWTH Publications. URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/814903> (дата звернення: 10.08.2025).
38. Peng S., Hu T. View of kinematic analysis of SCARA robots. *Journal of Computing and Electronic Information Management*. URL: <https://jceim.org/index.php/ojs/article/view/71/68> (дата звернення: 23.08.2025).
39. Trajectory planning and object recognition for robot sensing and control / ред.: G. Peng, Z. Fan. MDPI, 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-2864-7> (дата звернення: 28.09.2025).
40. Energy-Efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization / K. Nonoyama та ін. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/6/2074> (дата звернення: 01.09.2025).
41. Murray R. M., Li Z., Sastry S. S. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC Press, 2017. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315136370> (дата звернення: 09.09.2025).

ДОДАТОК А. Детальна схема підключень розробленої підсистеми моніторингу енергоспоживання



ДОДАТОК Б. Специфікація розробленої підсистеми

Позначення	Найменування	Тип/ параметри	Кількість	Примітка
<u>Керування та обробка даних</u>				
U1	Мікроконтролер Raspberry Pi Pico 2 WH	RP2350, Wi-Fi/BT, 2x264KB RAM	1	Центральний контролер збору та передачі даних через Wi-Fi
XP1	Конектор 2x20 pin мама	Крок 2.54мм	2	Підключення Rpi до макетної плати
<u>Вимірювання струму та напруги</u>				
A1-A5	Модулі INA226	I ² C, 0-36V, ±20A, 16-біт	5	Вимірювання: плеча, локтя, вертикалі SCARA-робота, конвеєра та живлення ПЛК S7-1200 (24V DC)
CT1-CT2	Датчики SCT-013-100	100A / 50mA, трансформаторний	2	Вимірювання: загальне живлення стенду, споживання силового модулю SINAMICS G120
AD1-AD2	АЦП ADS1115	16-біт, 4 канали, I ² C, 860 SPS	2	Обробка сигналів від датчиків CT1, CT2 (канали 0-1)
IC3-IC4	Модуль підсилювання LM358	Коефіцієнт підсилення x100	2	Підсилення сигналу 0-50mA від датчиків CT1, CT2
<u>Комутація шини I²C</u>				
IC1-IC2	Мультиплексор I ² C TCA9548A	8 - кан а л ь н и й , адреса 0x70	2	Комутація модулів INA226 та ADS1115 на незалежні канали
<u>Система живлення</u>				
PS1-PS2	D C - D C перетворювачі Mini-360	Вх: 24V, Вих: 5V, 3A	2	Основне та додаткове живлення 5V для периферії
PS3	Стабілізатор AMS1117-3.3V	Вх: 5V, Вих: 3.3V, 1A, LDO	1	Живлення логічних схем та I ² C модулів
C1-C2	Конденсатор електролітичний	25V, 100uF, 6x7мм	2	Згладжування вхідної напруги DC-DC
C3	Конденсатор електролітичний	25V, 10Uf, 5x11мм	1	Стабілізація визодів LDO стабілізаторів
C4-C12	Конденсатор керамічний	50V, 100n, Y5V, ±20%	9	Високочастотна фільтрація ліній живлення модулів
<u>Захист електричних ліній</u>				
D1-D5	Супресор P6KE 24A	24V, 600W, DO-15	5	Захист вимірювальних ліній модулів
VD1-VD5	Діодна збірка BAW74	Сдвоєний діод, SOT-23	5	Захист входів модулів від неправильної полярності підключення
U2-U10	Оптрон PC817	4-pin DIP, 5000V ізоляція	10	Розв'язка цифрових сигналів модулів INA226
F1-F6	Запобіжник керамічний	1A, 5x20мм, швидкодіючий	6	Запобіжники для ліній живлення
<u>Резистори</u>				
R1-R2	Резистор 2.7кОм	0.25W, ±5%, THT	2	Pull-up для SCT-013-100
R3-R16	Резистор 4.7кОм	0.25W, ±5%, THT	14	Pull-up резистори для ліній SDA/SCL лінії I ² C

R17-R26	Резистор 120Ом	0.25W, ±5%, ТНТ	10	Обмеження струму оптронів PC817
---------	----------------	-----------------	----	---------------------------------

Монтажні елементи та з'єднувачі				
XT1-XT6	Клемна колодка KF301-2P	2 пін, 300V, 16A, крок 5.08мм	6	Підключення вимірювальних ліній INA226 та основного живлення
J1-J2	Аудіо-роз'єм RJ-313D	Jack 3.5mm, 3+3 pin, стерео	2	Підключення неінвазивних датчиків SCT-013-100
PCB1	Макетна плата двостороння	80x200мм, FR-4 стеклотексоліт	1	Основа для монтажу всієї електронних компонентів
BOX1	Коробка розподільча	200x155x80мм, IP40, ABS пластик	1	Корпус підсистеми з кабельними вводами
Допоміжні монтажні матеріали				
-	Провід силіконовий	20AWG, червоний	10м	Лінії живлення + Vcc
-	Провід силіконовий	20AWG, чорний	10м	Земля та сигнальні лінії
-	Провід ПВ-3	0.5мм ² , синій	5м	Запас для землі та сигнальної лінії
-	Термоусадочна трубка	Діаметр 3мм, коеф. усадки 3:1	1м	Герметична ізоляція з'єднань тонких проводів
-	Термоусадочна трубка	Діаметр 6мм, коеф. усадки 3:1	1м	Герметична ізоляція силових з'єднань та захист від вологи
-	Стяжка кабельна нейлонова	100мм х 2.5мм, чорна	1уп	Організація та фіксація кабельних трас

ДОДАТОК В. Повний код прошивки для Raspberry Pi Pico 2 WH

```
# Прошивка для датчиків INA226 та SCT-013 через TCA9548A

import time
import network
import ujson as json
from umqtt.simple import MQTTClient
import ubinascii
import machine
from machine import I2C, Pin

# - НАЛАШТУВАННЯ
WIFI_SSID = "Xiaomi_8C62"
WIFI_PASS = "03488asvar"

MQTT_BROKER = "192.168.31.152"
MQTT_PORT = 1883
CLIENT_ID = b"pico_stand_" + ubinascii.hexlify(machine.unique_id())

BASE_TOPIC = "diplom"
SEND_INTERVAL = 5

# - I2C
i2c_ina = I2C(0, scl=Pin(1), sda=Pin(0), freq=100000) # INA226
i2c_sct = I2C(1, scl=Pin(5), sda=Pin(4), freq=100000) # ADS1115

TCA_ADDR = 0x70
INA226_ADDR = 0x40
ADS1115_ADDR = 0x48

# - ЦИКЛ
CYCLE = [
    {"id": 0, "name": "idle", "duration": 10},
    {"id": 1, "name": "pick", "duration": 5},
    {"id": 2, "name": "move", "duration": 8},
    {"id": 3, "name": "place", "duration": 5},
    {"id": 4, "name": "return", "duration": 12}
]

# - ДАТЧИКИ
SENSORS = {
    "ina1": {"node": "scara", "type": "ina226", "channel": 0},
    "ina2": {"node": "scara", "type": "ina226", "channel": 1},
    "ina3": {"node": "scara", "type": "ina226", "channel": 2},
    "ina4": {"node": "conveyor", "type": "ina226", "channel": 3},
    "ina5": {"node": "controller", "type": "ina226", "channel": 4},
    "sct1": {"node": "power", "type": "sct013", "channel": 0, "voltage": 230.0},
    "sct2": {"node": "controller", "type": "sct013", "channel": 1, "voltage": 230.0}
}

cycle_id = 0
phase_idx = 0
phase_start = time.time()
cycle_energy_wh = 0.0
```

```

total_energy_wh = 0.0

# - TCA9548A
def tca_select(i2c, channel):
    try:
        i2c.writeto(TCA_ADDR, bytes([1 << channel]))
        time.sleep_ms(2)
        return True
    except:
        return False

# - INA226
class INA226:
    def __init__(self, i2c):
        self.i2c = i2c
        self.addr = INA226_ADDR
        self._calibrate()

    def _write(self, reg, val):
        self.i2c.writeto_mem(self.addr, reg, bytes([val >> 8, val & 0xFF]))

    def _read(self, reg):
        d = self.i2c.readfrom_mem(self.addr, reg, 2)
        return (d[0] << 8) | d[1]

    def _calibrate(self):
        # CAL для 0.1Ω шунта, макс 3A
        self._write(0x05, 512) # Calibration
        self._write(0x00, 0x4527) # Config: continuous, 1.1ms
        time.sleep_ms(10)

    def read(self):
        v = self._read(0x02) * 1.25e-3 # Bus voltage
        raw_i = self._read(0x04)
        if raw_i > 32767:
            raw_i -= 65536
        i = abs(raw_i * 0.0001) # Current
        p = abs(self._read(0x03) * 0.0025) # Power
        return v, i, p

def read_ina(name, ch):
    if not tca_select(i2c_ina, ch):
        return None
    try:
        ina = INA226(i2c_ina)
        v, i, p = ina.read()
        return {
            "sensor": name,
            "type": "ina226",
            "node": SENSORS[name]["node"],
            "voltage_V": round(v, 2),
            "current_A": round(i, 3),
            "power_W": round(p, 3)
        }
    except Exception as e:
        print(f"INA error {name}: {e}")
        return None

# - ADS1115

```

```

class ADS1115:
    def __init__(self, i2c):
        self.i2c = i2c
        self.addr = ADS1115_ADDR

    def _write(self, reg, val):
        self.i2c.writeto_mem(self.addr, reg, bytes([(val >> 8, val & 0xFF)]))

    def _read(self, reg):
        d = self.i2c.readfrom_mem(self.addr, reg, 2)
        val = (d[0] << 8) | d[1]
        if val > 32767:
            val -= 65536
        return val

    def read_adc(self, channel=0):
        # Config: AINO/GND, ±4.096V, single-shot
        config = 0xC000 | (channel << 12) | 0x0300 | 0x0083
        self._write(0x01, config)
        time.sleep_ms(10)
        return self._read(0x00) * 0.000125 # LSB = 125µV

def read_sct(name, ch):
    if not tca_select(i2c_sct, ch):
        return None
    try:
        ads = ADS1115(i2c_sct)

        # Читання 100 зразків для RMS
        samples = []
        for _ in range(100):
            v = ads.read_adc(0) # Channel A0
            samples.append(v)
            time.sleep_ms(1)

        # Розрахунок RMS
        avg = sum(samples) / len(samples)
        sq_sum = sum((s - avg) ** 2 for s in samples)
        rms_voltage = (sq_sum / len(samples)) ** 0.5

        # SCT-013-100: 100A = 50mA, burden 62Ω
        # V_rms = I_secondary * R = I_secondary * 62
        # I_primary = I_secondary * 2000 (100A/50mA)
        current = (rms_voltage / 62.0) * 2000.0
        power = current * SENSORS[name]["voltage"]

        return {
            "sensor": name,
            "type": "sct013",
            "node": SENSORS[name]["node"],
            "voltage_V": SENSORS[name]["voltage"],
            "current_A": round(current, 3),
            "power_W": round(power, 3)
        }
    except Exception as e:
        print(f"SCT error {name}: {e}")
        return None

```

- WIFI

```

def wifi_connect():
    wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
    wlan.active(True)
    if not wlan.isconnected():
        wlan.connect(WIFI_SSID, WIFI_PASS)
        for _ in range(20):
            if wlan.isconnected():
                break
            time.sleep(1)
    return wlan.isconnected()

# - MQTT
def mqtt_connect():
    return MQTTClient(CLIENT_ID, MQTT_BROKER, port=MQTT_PORT, keepalive=60)

def publish_sensor(mqtt, name, typ, node, data, phase, cid, pid, ts):
    topic = f"{BASE_TOPIC}/sensor/{name}"
    payload = {
        "timestamp": ts,
        "sensor": name,
        "type": typ,
        "node": node,
        "phase": phase,
        "cycle_id": cid,
        "phase_id": pid,
        "data": data
    }
    try:
        mqtt.publish(topic, json.dumps(payload))
    except:
        pass

def publish_energy(mqtt, cycle_e, total_e, ts, phase, cid):
    if cycle_e is not None:
        mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/cycle_energy", json.dumps({
            "timestamp": ts, "phase": phase, "cycle_id": cid, "value": round(cycle_e, 4)
        }))
    if total_e is not None:
        mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/total_energy", json.dumps({
            "timestamp": ts, "value": round(total_e, 3)
        }))

def publish_node(mqtt, node, phase, pid, ts, cid):
    mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/node_phase", json.dumps({
        "timestamp": ts, "node": node, "phase": phase, "phase_id": pid, "cycle_id": cid
    }))
    mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/cycle_info", json.dumps({
        "timestamp": ts, "node": node, "cycle_id": cid
    }))

def publish_summary(mqtt, node, pwr, cur, cnt, ts, phase, cid):
    mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/node_summary", json.dumps({
        "timestamp": ts, "node": node, "phase": phase, "cycle_id": cid,
        "total_power_w": round(pwr, 3), "total_current_a": round(cur, 3),
        "sensor_count": cnt, "value": round(pwr, 3)
    }))

# - MAIN
if not wifi_connect():

```

```

raise RuntimeError("Wi-Fi error")

mqtt = mqtt_connect()
mqtt.connect()

mqtt.publish(f"{BASE_TOPIC}/system/init", json.dumps({
    "device": CLIENT_ID.decode(),
    "sensors": list(SENSORS.keys()),
    "ts": time.time()
}))

print("Connected! Sensors:", list(SENSORS.keys()))

while True:
    now = time.time()
    phase = CYCLE[phase_idx]

    # Перехід фази
    cycle_completed = False
    if now - phase_start >= phase["duration"]:
        phase_idx += 1
        phase_start = now
        if phase_idx >= len(CYCLE):
            phase_idx = 0
            cycle_completed = True
            print(f"Cycle {cycle_id} done! Energy: {cycle_energy_wh:.4f} Wh")

    ts = time.time()
    node_power = {}
    node_current = {}
    node_count = {}

    # Читання датчиків
    for name, cfg in SENSORS.items():
        if cfg["type"] == "ina226":
            data = read_ina(name, cfg["channel"])
        else:
            data = read_sct(name, cfg["channel"])

        if not data:
            continue

        node = data["node"]

        if node not in node_power:
            node_power[node] = 0.0
            node_current[node] = 0.0
            node_count[node] = 0

        publish_sensor(mqtt, name, data["type"], node, {
            "voltage_V": data.get("voltage_V"),
            "current_A": data.get("current_A"),
            "power_W": data.get("power_W")
        }, phase["name"], cycle_id, phase["id"], ts)

        node_power[node] += data.get("power_W", 0)
        node_current[node] += data.get("current_A", 0)
        node_count[node] += 1

```

```

# Публікація по вузлах
total_pwr = 0.0
for node in node_power.keys():
    publish_node(mqtt, node, phase["name"], phase["id"], ts, cycle_id)
    if node_power[node] > 0:
        publish_summary(mqtt, node, node_power[node], node_current[node],
                        node_count[node], ts, phase["name"], cycle_id)
        total_pwr += node_power[node]

# Енергія
if total_pwr > 0:
    e_step = total_pwr * (SEND_INTERVAL / 3600.0)
    cycle_energy_wh += e_step
    total_energy_wh += e_step

if cycle_completed:
    publish_energy(mqtt, cycle_energy_wh, total_energy_wh, ts, phase["name"], cycle_id)
    cycle_id += 1
    cycle_energy_wh = 0.0
else:
    publish_energy(mqtt, None, total_energy_wh, ts, phase["name"], cycle_id)

print(f"[{time.ticks_ms()}] {phase['name']}, Cycle: {cycle_id}, Energy: {cycle_energy_wh:.4f} Wh")

time.sleep(SEND_INTERVAL)

```

ДОДАТОК Г. Код потоку Node-RED

```
[
  {
    "id": "701a6b0a901371d9",
    "type": "mqtt in",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "All Sensors",
    "topic": "diplom/sensor/#",
    "qos": "0",
    "datatype": "json",
    "broker": "mqtt_broker",
    "nl": false,
    "rap": false,
    "inputs": 0,
    "x": 110,
    "y": 100,
    "wires": [
      [
        "3678318a77906979"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "3678318a77906979",
    "type": "function",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Parse Sensor Data",
    "func": "const payload = msg.payload;\nconst topic = msg.topic;\n\n// Витягуємо ім'я датчика з топика\nconst\nsensorName = topic.split('/').pop();\n\nif (!payload || !payload.data) {\n  return null;\n}\n\nconst commonTags = {\n  sensor: payload.sensor,\n  type: payload.type,\n  node: payload.node,\n  phase: payload.phase,\n  cycle_id:\n    payload.cycle_id.toString(),\n  phase_id: payload.phase_id.toString()\n};\n\n// Створюємо масив точок для batch\nзапису\nconst points = [];\n\n// 1. Voltage measurement (якщо є)\nif (payload.data.voltage_V !== undefined &&\n    payload.data.voltage_V !== null) {\n  points.push({\n    measurement: sensorName + \"_voltage\",\n    fields: {\n      value: payload.data.voltage_V\n    },\n    tags: commonTags,\n  });\n}\n\n// 2. Current measurement\nif (payload.data.current_A !== undefined && payload.data.current_A !== null) {\n  points.push({\n    measurement:\n      sensorName + \"_current\",\n    fields: {\n      value: payload.data.current_A\n    },\n    tags:\n      commonTags,\n  });\n}\n\n// 3. Power measurement\nif (payload.data.power_W !== undefined &&\n    payload.data.power_W !== null) {\n  points.push({\n    measurement: sensorName + \"_power\",\n    fields: {\n      value: payload.data.power_W\n    },\n    tags: commonTags,\n  });\n}\n\n// Повертаємо одне повідомлення з\nмасивом точок для batch запису\nreturn {\n  payload: points\n};",
    "outputs": 1,
    "timeout": "",
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 310,
    "y": 100,
    "wires": [
      [
        "fd166c2256706a91"
      ]
    ]
  }
],
```

```

{
  "id": "fd166c2256706a91",
  "type": "influxdb batch",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "influxdb": "4bf62a4105887c5c",
  "precision": "ms",
  "retentionPolicy": "",
  "name": "Write Sensors",
  "database": "",
  "retentionPolicyV18Flux": "",
  "org": "",
  "bucket": "",
  "x": 520,
  "y": 100,
  "wires": []
},
{
  "id": "f44411e575e3cae6",
  "type": "mqtt in",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Cycle Energy",
  "topic": "diplom/cycle_energy",
  "qos": "0",
  "datatype": "json",
  "broker": "mqtt_broker",
  "nl": false,
  "rap": false,
  "inputs": 0,
  "x": 110,
  "y": 160,
  "wires": [
    [
      "473d6c8697db00c4"
    ]
  ]
},
{
  "id": "473d6c8697db00c4",
  "type": "function",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Parse Cycle Energy",
  "func": "const payload = msg.payload;\n\nif (!payload || payload.value === undefined) {\n  return\nnull;\n}\n\nreturn {\n  payload: [\n    {\n      measurement: \"cycle_energy\",\n      fields: {\n        value:\nNumber(payload.value)\n      },\n      tags: {\n        phase: payload.phase,\n        cycle_id:\npayload.cycle_id.toString()\n      },\n    }\n  ];\n",
  "outputs": 1,
  "timeout": "",
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 320,
  "y": 160,
  "wires": [
    [
      "c34756fcdd88ea69"
    ]
  ]
},

```

```

{
  "id": "c34756fcdd88ea69",
  "type": "influxdb batch",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "influxdb": "4bf62a4105887c5c",
  "precision": "ms",
  "retentionPolicy": "",
  "name": "Write Energy",
  "database": "",
  "retentionPolicyV18Flux": "",
  "org": "",
  "bucket": "",
  "x": 510,
  "y": 180,
  "wires": []
},
{
  "id": "b8fc0f39323666de",
  "type": "mqtt in",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Total Energy",
  "topic": "diplom/total_energy",
  "qos": "0",
  "datatype": "json",
  "broker": "mqtt_broker",
  "nl": false,
  "rap": false,
  "inputs": 0,
  "x": 110,
  "y": 220,
  "wires": [
    [
      "5c93f7edbfcd08c0"
    ]
  ]
},
{
  "id": "5c93f7edbfcd08c0",
  "type": "function",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Parse Total Energy",
  "func": "const payload = msg.payload;\n\nif (!payload || payload.value === undefined) {\n  return\nnull;\n}\n\nreturn {\n  payload: [\n    {\n      measurement: \"total_energy\",\n      fields: {\n        value:\nNumber(payload.value)\n      },\n      tags: {},\n    }\n  ];",
  "outputs": 1,
  "timeout": "",
  "noerr": 0,
  "initialize": "",
  "finalize": "",
  "libs": [],
  "x": 310,
  "y": 220,
  "wires": [
    [
      "c34756fcdd88ea69"
    ]
  ]
},
{

```

```

    "id": "297f39b3cbe1e206",
    "type": "mqtt in",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Node Phase",
    "topic": "diplom/node_phase",
    "qos": "0",
    "datatype": "json",
    "broker": "mqtt_broker",
    "nl": false,
    "rap": false,
    "inputs": 0,
    "x": 110,
    "y": 280,
    "wires": [
      [
        "acfda28443aafd53"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "acfda28443aafd53",
    "type": "function",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Parse Node Phase",
    "func": "const payload = msg.payload;\n\nif (!payload) {\n  return null;\n}\n\nreturn {\n  payload: [\n    {\n      measurement: \"node_phase\", \n      fields: {\n        phase_id: Number(payload.phase_id)\n      }, \n      tags: {\n        node: payload.node, \n        phase: payload.phase, \n        cycle_id: payload.cycle_id.toString()\n      }, \n    }\n  ];",
    "outputs": 1,
    "timeout": "",
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 310,
    "y": 280,
    "wires": [
      [
        "2c9cc43eac72f723"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "d0a8f8857772a50c",
    "type": "mqtt in",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Node Summary",
    "topic": "diplom/node_summary",
    "qos": "0",
    "datatype": "json",
    "broker": "mqtt_broker",
    "nl": false,
    "rap": false,
    "inputs": 0,
    "x": 120,
    "y": 340,
    "wires": [
      [
        "62545e87b0f49591"
      ]
    ]
  }
}

```

```

    ]
  ],
  {
    "id": "62545e87b0f49591",
    "type": "function",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Parse Node Summary",
    "func": "const payload = msg.payload;\n\nif (!payload) {\n  return null;\n}\n\nconst result = {\n  payload:\n[\n  {\n    measurement: \"node_summary\", \n    fields: {\n      total_power_w:\nNumber(payload.total_power_w), \n      total_current_a: Number(payload.total_current_a), \n      sensor_count:\nNumber(payload.sensor_count) \n    }, \n    tags: {\n      node: payload.node, \n      phase: payload.phase, \n      cycle_id: payload.cycle_id.toString() \n    }, \n    }\n  ]\n};\n\nreturn result;",
    "outputs": 1,
    "timeout": "",
    "noerr": 0,
    "initialize": "",
    "finalize": "",
    "libs": [],
    "x": 320,
    "y": 340,
    "wires": [
      [
        "2c9cc43eac72f723"
      ]
    ]
  },
  {
    "id": "2c9cc43eac72f723",
    "type": "influxdb batch",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "influxdb": "4bf62a4105887c5c",
    "precision": "ms",
    "retentionPolicy": "",
    "name": "Write Node Data",
    "database": "",
    "retentionPolicyV18Flux": "",
    "org": "",
    "bucket": "",
    "x": 520,
    "y": 300,
    "wires": []
  },
  {
    "id": "4e2c95b29f6ac57f",
    "type": "debug",
    "z": "e5f321da4a6c268e",
    "name": "Debug All",
    "active": false,
    "tosidebar": true,
    "console": false,
    "tostatus": false,
    "complete": "true",
    "targetType": "full",
    "statusVal": "",
    "statusType": "auto",
    "x": 280,
    "y": 400,
    "wires": []
  }
]

```

```

},
{
  "id": "a9bc661127a46e8b",
  "type": "mqtt in",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Debug MQTT",
  "topic": "diplom/#",
  "qos": "0",
  "datatype": "json",
  "broker": "mqtt_broker",
  "nl": false,
  "rap": false,
  "inputs": 0,
  "x": 110,
  "y": 400,
  "wires": [
    [
      "4e2c95b29f6ac57f"
    ]
  ]
},
{
  "id": "b9112c899bacf78b",
  "type": "comment",
  "z": "e5f321da4a6c268e",
  "name": "Потік формування запитів на запис в БД повідомлень з повідомлень MQTT",
  "info": "",
  "x": 310,
  "y": 60,
  "wires": []
},
{
  "id": "mqtt_broker",
  "type": "mqtt-broker",
  "name": "MQTT Broker",
  "broker": "192.168.31.152",
  "port": "1883",
  "clientid": "",
  "autoConnect": true,
  "usetls": false,
  "protocolVersion": "4",
  "keepalive": "60",
  "cleansession": true,
  "autoUnsubscribe": true,
  "birthTopic": "",
  "birthQos": "0",
  "birthPayload": "",
  "birthMsg": {},
  "closeTopic": "",
  "closeQos": "0",
  "closeRetain": "false",
  "closePayload": "",
  "closeMsg": {},
  "willTopic": "",
  "willQos": "0",
  "willRetain": "false",
  "willPayload": "",
  "willMsg": {},
  "userProps": ""
}

```

```
    "sessionExpiry": ""
  },
  {
    "id": "4bf62a4105887c5c",
    "type": "influxdb",
    "hostname": "192.168.31.152",
    "port": "8086",
    "protocol": "http",
    "database": "rpi_db",
    "name": "Influx 1.8",
    "usetls": false,
    "tls": "",
    "influxdbVersion": "1.x",
    "url": "http://192.168.31.152:8086",
    "timeout": "",
    "rejectUnauthorized": true
  }
]
```