

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розроблення автоматизованої системи перевірки якості готової продукції на ТОВ «СЕ Борднетце-Україна»**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи КТ-41

спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Глушок А.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Королюк Р.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Чихіра І. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Рецензент Буняк О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

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

«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)

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

Студенту Глушок Андрію Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи перевірки якості готової продукції на ТОВ «СЕ Борднетце-Україна»

Керівник роботи Корольок Ростислав Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

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

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

Вступ

1) Аналітична частина

2) Проектна частина

3) Спеціальна частина

4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Висновки

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

1. Титульний слайд

9. Архітектура системи

2. Актуальність теми

10. Архітектура системи (продовження)

3. Мета та завдання

11. Вибір апаратних компонентів

4. Об'єкт, предмет і значення роботи

12. Техніко-економічне обґрунтування

5. Аналіз існуючих рішень

13. Висновки

6. Аналіз існуючих рішень (продовження)

14. Практичне застосування

7. Проблеми у сфері контролю якості

15. Дякую за увагу!

8. Напрями вдосконалення систем контролю

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Глушок А.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Корольюк Р.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

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

Обсяг графічної частини становить 15 слайдів.

Обсяг пояснювальної записки складає 60 друкованих сторінок формату А4 (210×297 мм).

Кваліфікаційна робота складається з 4 розділів, у яких міститься 2 рисунки, 6 таблиць. У роботі використано 47 джерела літератури.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розроблення автоматизованої системи перевірки якості готової продукції на ТОВ «СЕ Борднетце-Україна».

Програмне забезпечення розроблено на мові C++ з використанням бібліотеки Adafruit_GFX.h і бази даних SQLite. Система забезпечує перевірку основних якісних параметрів кабельних джгутів. Робота охоплює етапи аналізу сучасних підходів до систем тестування кабельних джгутів, проектування апаратної частини, створення програмного забезпечення та тестування в умовах виробництва.

Ключові слова: кабельний джгут, електрична система контролю, гібридна система контролю, оптична система контролю.

ANNOTATION

The qualification work consists of an explanatory note and a graphic part (illustrative material - slides).

The volume of the graphic part is 15 slides.

The volume of the explanatory note is 60 printed pages of A4 format (210×297 mm).

The qualification work consists of 4 chapters, which contain 2 figures, 6 tables. The work uses 47 sources of literature.

The purpose of this qualification work is to develop an automated system for checking the quality of finished products at SE Bordnetze-Ukraine LLC.

The software was developed in C++ using the Adafruit_GFX.h library and the SQLite database. The system provides verification of the main quality parameters of cable harnesses. The work covers the stages of analyzing modern approaches to cable harness testing systems, designing hardware, creating software, and testing in production.

Keywords: cable harness, electrical inspection system, hybrid inspection system, optical inspection system.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1. Значення контролю якості кабельних джгутів	10
1.2. Класифікація та підходи до автоматизованого контролю	11
1.3. Аналіз існуючих рішень (аналоги)	13
1.4. Проблеми та виклики у сфері контролю якості	17
1.5. Шляхи вдосконалення автоматизованих систем контролю якості.....	18
1.6. Обґрунтування вибору напрямку дослідження.....	20
1.7. Загальні положення щодо розробки.....	22
1.8. Визначення вимог до системи.....	24
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	26
2.1. Функціональний підхід до реалізації.....	26
2.2. Обґрунтування вибору елементної бази.....	28
2.3. Архітектура та схема взаємодії.....	30
2.4. Обмеження системи та засоби вдосконалення.....	32
2.5. Техніко-економічне обґрунтування.....	34
РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	37
3.1. Структура та функціональні блоки системи.....	37
3.2. Вибір контролера: ESP32 як центральний елемент системи.....	39
3.3. Принцип роботи системи перевірки кабельних джгутів.....	41
3.4. Програмна реалізація автоматизованої системи.....	43
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .	47
4.1. Ергономічні проблеми безпеки життєдіяльності	47
4.2. Електробезпека технологічного процесу контролю кабельних джгутів ..	52
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ERP - Система планування ресурсів підприємства

HMI - Людино-машинний інтерфейс

MES - Система диспетчеризації виробництва

PASS/FAIL - Пройшло / Не пройшло (результати тесту)

SAP - Systems, Applications, and Products in Data Processing (відоме ERP-рішення)

КАО - Комплексне Автоматизоване Обслуговування

KXM - Контрольно-Характеристична Машина

КЯ - Контроль якості

ПЗ - Програмне забезпечення

ПЛК - Програмований логічний контролер

ТОВ - Товариство з обмеженою відповідальністю

УЗ - Ультразвуковий (у контексті контролю)

ВСТУП

У період стрімкого розвитку промисловості та високої конкуренції на світовому ринку все більшої уваги набуває якість продукції. Саме якість визначає рівень довіри до виробника, впливає на безпеку кінцевого користувача та визначає конкурентоспроможність підприємства. Особливо це стосується автомобільної галузі, де навіть незначні відхилення в електричних або механічних параметрах можуть спричинити серйозні наслідки.

Однією з ключових складових системи управління якістю є процес контролю готової продукції. У випадку виготовлення кабельних джгутів - надзвичайно складних за структурою виробів - перевірка відповідності кожного елемента технічним вимогам має критичне значення. Ручна перевірка таких виробів займає багато часу, не гарантує точності та не забезпечує повного простеження історії виробництва кожного виробу.

Автоматизація процесів контролю якості дозволяє не лише підняти якість перевірки, а й забезпечити інтеграцію з інформаційними системами підприємства, зменшити людський фактор, пришвидшити виробничі цикли та покращити загальну ефективність. У межах концепції «Індустрія 4.0» автоматизований контроль якості набуває нових функцій: він стає джерелом аналітичних даних, інструментом прогнозування відмов і платформою для взаємодії людини з машиною.

Актуальність обраної теми полягає у потребі вдосконалення існуючих систем перевірки кабельних джгутів, що використовуються на виробництві, зокрема на прикладі підприємства ТОВ «СЕ Борднетце-Україна». Це підприємство є частиною міжнародного холдингу та виготовляє продукцію для провідних автомобільних брендів, тому контроль якості є не лише технологічно-виробничим викликом, а й репутаційною відповідальністю.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є створення високо автоматизованої системи перевірки якості кабельних джгутів, яка поєднує електричне тестування, збирання результатів, збереження історії виробу та інтеграцію з корпоративними інформаційними системами.

Для досягнення мети роботи, передбачено виконання таких основних завдань:

- аналіз існуючих рішень і технологій контролю якості на підприємстві;

- обґрунтування вибору технічних і програмних засобів для розробки системи;
- проектування архітектури автоматизованої системи перевірки;
- реалізація моделі або програмного продукту;
- експериментальна перевірка ефективності запропонованого рішення;
- аналіз питань безпеки праці та ергономіки.

Об'єктом процесу автоматизації виступає процес контролю якості кабельних джгутів, а предметом - автоматизована система перевірки якості, що включає апаратну частину, програмне забезпечення та інформаційні модулі.

Практичне значення роботи полягає в:

- безпосередньому впровадженню розробленої системи на підприємстві,
- підвищенню продуктивності,
- зменшення браку,
- забезпечення повної простежуваності виготовленої продукції.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Значення контролю якості кабельних джгутів

Контроль якості кабельних джгутів є критично важливим етапом у виробництві електротехнічної продукції, оскільки він забезпечує надійність, безпеку та стабільну роботу всієї електронної системи. Кабельні джгути використовуються в багатьох галузях - від побутової техніки до високотехнологічної авіації та автомобілебудування. Саме тому якість цих з'єднань безпосередньо впливає не лише на функціональність пристроїв, а й на безпеку користувачів.

У сучасних умовах кабельні джгути мають надзвичайно складну структуру: десятки або сотні провідників, кожен з яких повинен бути правильно з'єднаний відповідно до електричної схеми. Будь-яка помилка - розрив, неправильне підключення або коротке замикання – переважно приводить до повної втрати працездатності пристрою. Наприклад, у автомобілях сучасного покоління кількість електронних вузлів та з'єднань постійно зростає, і відмови навіть одного контакту можуть викликати збій в роботі всієї системи безпеки, включаючи ABS, подушки безпеки, ESP тощо.

Ще одним важливим аспектом є серійність і швидкість виробництва. Під час масового виготовлення джгутів контроль якості вручну стає повільним, неефективним і залежним від людського чинника. Навіть досвідчені оператори можуть не помітити помилку через втому або монотонність роботи. Таким чином, автоматизація контролю якості - це не просто інновація, а необхідність, що дозволяє гарантувати стабільну якість при високій продуктивності.

Контроль якості охоплює не лише електричні параметри, а й фізичний стан з'єднань: правильність кольорового кодування, симетрію розташування, відповідність довжин, відсутність механічних пошкоджень, перегинів тощо. У випадку виробництва продукції для медичної або аерокосмічної галузі навіть незначна помилка може спричинити катастрофічні наслідки. З огляду на це, зростає значення застосування автоматизованих методів перевірки.

Не менш важливим є і зворотний зв'язок, який дають системи контролю якості. Вони дозволяють не лише виявляти помилки, а й аналізувати причини їх виникнення, виявляти закономірності, будувати статистику відмов та покращувати технологію виробництва.

У підсумку, значення контролю якості кабельних джгутів полягає у:

- Забезпеченні електричної надійності систем.
- Зменшенні виробничих втрат та кількості браку.
- Підвищенні рівня безпеки кінцевої продукції.
- Підтримці стабільного іміджу виробника.
- Можливості інтеграції в цифрову систему управління виробництвом.

Саме тому автоматизовані системи контролю якості стали невід'ємною частиною сучасного кабельного виробництва, а їх удосконалення є важливим завданням науково-технічного прогресу.

1.2. Класифікація та підходи до автоматизованого контролю

У процесі виробництва кабельних джгутів контроль якості є складним багатокомпонентним завданням, що охоплює не лише електричні перевірки, а й візуальні, геометричні та іноді навіть термографічні тести. Залежно від підходу до виконання цього завдання, автоматизовані системи контролю поділяють на кілька основних типів. Вибір підходу залежить від обсягу виробництва, критичності об'єкта, бюджету, доступного для технічного впровадження, а також вимог до точності.

Електричні системи контролю. Найпоширеніший тип систем, особливо на підприємствах, орієнтованих на масове виробництво. Такі системи дозволяють автоматично перевіряти:

- наявність з'єднань між визначеними контактами (тест на провідність),
- опір провідників (зادля виявлення поганих або частково зруйнованих з'єднань),
- відсутність коротких замикань,
- перевірку ізоляції.

Зазвичай для цього використовуються багатоканальні перемикачі, які через спеціальну комутаційну плату послідовно перевіряють усі з'єднання в джгуті. Сучасні реалізації також підтримують діагностику за допомогою методу чотирьох провідників, що дозволяє зменшити похибку вимірювання опору.

До переваг таких систем належать:

- висока точність і відтворюваність результатів;
- простота в реалізації;
- масштабованість.

Однак електричні методи не здатні виявити візуальні або механічні дефекти, такі як зміщення контактів, пошкодження ізоляції чи неправильне маркування проводів.

Оптичні системи контролю. З розвитком технологій комп'ютерного зору дедалі більшої популярності набувають системи машинного бачення. Вони здатні в режимі реального часу здійснювати:

- візуальний аналіз з'єднань;
- перевірку правильності підключення кольорових проводів;
- виявлення пошкоджень на ізоляції;
- перевірку довжини та розташування окремих сегментів джгута.

Основу таких систем становлять камери високої роздільної здатності, інфрачервоні сенсори та спеціалізоване ПЗ для обробки зображення (OpenCV, Halcon, Cognex тощо). Алгоритми машинного зору дозволяють виконувати порівняння з еталонним зображенням або шукати характерні дефекти за шаблоном.

Серед переваг:

- можливість виявлення неелектричних дефектів;
- висока швидкість аналізу;
- зменшення залежності від людського фактору.

Проте такі системи складні в налаштуванні, вимагають навчання моделей, є дорогими та менш ефективними при тестуванні внутрішніх електричних параметрів.

Гібридні системи. Гібридні системи поєднують обидва підходи - електричний контроль і машинний зір. Їхнє впровадження особливо актуальне

на підприємствах, де якість має критичне значення (автомобілебудування, авіація, медичні прилади). У таких рішеннях контроль здійснюється паралельно - перша частина перевіряє з'єднання, друга - візуально оцінює якість монтажу.

Інколи гібридні системи доповнюють модулем діагностики на основі ШІ, що дозволяє не лише виявляти дефекти, а й прогнозувати ймовірність виникнення несправностей на основі статистичних даних.

До переваг гібридних систем можна віднести:

- найвищу точність контролю;
- можливість повної автоматизації процесу;
- інтеграцію з ERP/MES-системами;
- побудову звітності в реальному часі.

Основні недоліки - висока вартість впровадження, складність програмно-апаратної інтеграції, потреба в кваліфікованому персоналі.

1.3. Аналіз існуючих рішень (аналоги)

На ринку систем контролю якості кабельних джгутів уже існує велика кількість промислових рішень, які успішно впроваджені на підприємствах різного масштабу. Ці рішення відрізняються як за архітектурою, так і за функціональними можливостями, що зумовлює їхню ефективність у різних умовах експлуатації. У цьому підпункті розглянуто найпоширеніші комерційні аналоги, їхні сильні та слабкі сторони, а також проаналізовано доцільність їхнього використання в умовах невеликого або експериментального виробництва.

Cirris Easy-Touch® Pro - один з найпопулярніших тестерів для кабельних джгутів, який забезпечує комплексне електричне тестування з можливістю підключення великої кількості контактів (до 1024 точок). Система підтримує:

- тестування на замикання/розриви,
- перевірку опору з налаштуванням порогових значень,
- виявлення діодів і перевірку їхньої полярності,
- створення бібліотеки джгутів з можливістю імпорту схем.

Переваги:

- висока точність,
- простота інтерфейсу,
- підтримка англійської та інших мов,
- можливість інтеграції у виробничу лінію.

Недоліки:

- дуже висока вартість (десятки тисяч доларів),
- замкнута архітектура (неможливість модифікації або адаптації під специфічні потреби),
- потреба у фірмовому програмному забезпеченні.

У контексті малого або експериментального виробництва така система може бути надмірною як з точки зору вартості, так і функціональності.

Котак Карра та Котакіт - це комплексні автоматизовані лінії з обробки, складання та перевірки кабельних джгутів. Вони інтегруються у виробничу інфраструктуру та здійснюють повний цикл обробки: від нарізання та зачистки дротів до збирання та контролю.

Можливості контролю:

- електричне тестування під час збирання,
- контроль положення контактів за допомогою відеокамер,
- реєстрація параметрів у MES-системі підприємства.

Переваги:

- повна автоматизація процесу,
- висока продуктивність,
- зменшення потреби в ручній праці.

Недоліки:

- надзвичайно висока вартість (від 100 тис. євро),
- потреба в складному технічному обслуговуванні,
- орієнтованість на великі серії.

Ці рішення є доцільними тільки для великих виробничих підприємств зі стабільною номенклатурою продукції.

Компанія Schleuniger пропонує модульні рішення для тестування, які легко адаптуються до різних типів джгутів. Однією з популярних моделей є Schleuniger T80, що поєднує компактність з широким функціоналом.

Особливості:

- робота з різними типами конекторів,
- інтеграція з CAD-системами для імпорту схем,
- створення макросценаріїв перевірок.
- Переваги:
- висока гнучкість,
- оптимальне співвідношення ціна/якість для середнього бізнесу.
- Недоліки:
- складність навчання персоналу,
- обмежена кількість контактів у базовій конфігурації.

CAMI Research пропонує серію CableEye®, яка орієнтована на представників малого та середнього бізнесу. Це порівняно доступна система, яка дозволяє швидко перевіряти кабельні джгути на відповідність схемі. Вона також підтримує:

- збереження результатів тестування,
- формування графічних схем з'єднань,
- генерацію сертифікатів відповідності.

Переваги:

- доступна ціна,
- дружній інтерфейс,
- можливість масштабування.

Недоліки:

- обмежені функції візуального контролю,
- менша точність вимірювання опору.

У таблиці 1.1 наведено порівняння розглянутих систем.

Таблиця 1.1 Техніко-економічні показники систем.

Система	Тип контролю	Ціна	Орієнтація	Гнучкість	Відкритість
Cirris Easy-Touch	Електричний	Висока	Масове виробництво	Середня	Низька
Komax Komaxit	Гібридний	Дуже висока	Автоматичні лінії	Низька	Низька
Schleuniger T80	Електричний + CAD	Висока	Середній/високий клас	Висока	Обмежена
CAMI CableEye	Електричний	Середня	Малий та середній бізнес	Висока	Середня

Таким чином, хоча існуючі промислові рішення пропонують значну функціональність, для освітніх, дослідницьких або обмежених у ресурсах підприємств вони можуть бути невиправдано дорогими або надмірно складними. Це відкриває нішу для створення доступної, відкритої, модульної та адаптивної системи, яка задовольнить основні потреби у контролі якості кабельних джгутів при мінімальних витратах.

1.4. Проблеми та виклики у сфері контролю якості

Попри наявність великої кількості технічних рішень у сфері контролю якості кабельних джгутів, залишається цілий ряд проблем, що обмежують ефективність впровадження автоматизованих систем. Ці виклики поділяються на технічні, економічні та організаційні.

Технічні виклики. Головна проблема - складність структури самих кабельних джгутів. Із розвитком електроніки кількість провідників у джгутах постійно зростає. У деяких випадках вона сягає кількох сотень, що ускладнює ручну перевірку та вимагає автоматизації з високою точністю позиціонування та адресації контактів. Також часто зустрічаються дроти малого діаметра або мініатюрні роз'єми, які фізично складно перевірити без спеціалізованого обладнання.

Ще одним аспектом є необхідність врахування типів сигналів. У високочастотних або цифрових системах традиційні методи перевірки на провідність не завжди адекватні - тут важливі параметри імпедансу, ємності, екранування, які потребують окремих методів тестування.

Залежність від людського фактору. Навіть у частково автоматизованих системах ручна участь у перевірці, налаштуванні обладнання або інтерпретації результатів може призводити до помилок. Наявність великої кількості моделей джгутів часто змушує операторів переходити від однієї конфігурації до іншої, що підвищує ймовірність неправильного налаштування системи.

Економічні обмеження. Вартість сучасних автоматизованих стендів та програмного забезпечення може бути надто високою для невеликих підприємств або лабораторій. Це ускладнює доступ до якісного тестування на ранніх етапах виробництва або розробки. До того ж, оновлення чи масштабування таких систем потребує додаткових інвестицій у обладнання, навчання персоналу та технічну підтримку.

Відсутність гнучкості. У багатьох промислових рішеннях конфігурації «жорстко» прив'язані до певного типу джгута. Це означає, що при зміні схеми підключень або розширенні номенклатури необхідно або перепрошивати

систему, або перебудовувати комутаційні матриці. Такий підхід не придатний для серій дрібного масштабу або проектного виробництва.

Складність програмно-апаратної інтеграції. Часто виникає потреба у взаємодії з іншими цифровими платформами - CAD-системами, PLM- або MES-рішеннями, базами даних. Багато з наявних комерційних тестерів не мають відкритих API або підтримки сучасних стандартів обміну даними. Це обмежує можливості автоматизації або цифрової трансформації виробництва згідно з концепцією Industry 4.0.

Слабка адаптація до змін. Сучасне виробництво вимагає від систем контролю здатності швидко адаптуватися до нових вимог. Зміни в технічній документації, заміна матеріалів або нові замовлення з індивідуальними вимогами часто вимагають негайних змін у логіці тестування. У громіздких промислових системах ці зміни впроваджуються повільно та дорого.

Урахування зазначених проблем дозволяє сформулювати вимоги до перспективної системи контролю, яка повинна бути:

- технічно простою та модульною,
- відкритою для модифікацій та інтеграцій,
- недорогою у виробництві й обслуговуванні,
- адаптивною до широкого спектра джгутів,
- оснащеною інтуїтивним інтерфейсом для оператора.

1.5. Шляхи вдосконалення автоматизованих систем контролю якості

На основі аналізу існуючих рішень та виявлених проблем можна сформулювати основні напрями, за якими можливе вдосконалення систем контролю якості кабельних джгутів. Враховуючи тенденції в автоматизації, цифровій трансформації та мікроелектроніці, з'являються нові можливості для створення ефективніших, доступніших і гнучкіших рішень.

Зниження вартості шляхом використання відкритих апаратних платформ. Одним із найбільш очевидних напрямів розвитку є використання мікроконтролерів на зразок Arduino, ESP32, STM32 або Raspberry Pi як основи для побудови контролерів перевірки. Такі платформи мають низьку вартість,

широкий спектр периферії, активну спільноту користувачів та велику кількість бібліотек для розробки.

Це дозволяє створити базову функціональність без значних фінансових витрат, а також легко масштабувати систему під більшу кількість з'єднань або нові методи перевірки.

Впровадження модульної архітектури. Один з ключових принципів сучасних технічних рішень - модульність. Це означає, що система повинна складатися з окремих функціональних блоків (електричного тестування, візуального контролю, аналізу результатів, інтерфейсу користувача), які можна змінювати, оновлювати або замінювати незалежно.

Завдяки цьому досягається не лише простота розробки, а й гнучкість: при зміні вимог або схеми джгута можна швидко переналаштувати окремі частини системи без повного демонтажу або перепроєктування.

Розробка інтуїтивно зрозумілого програмного інтерфейсу. Багато сучасних промислових систем мають складні або перевантажені інтерфейси, які вимагають навчання персоналу. Використання сучасних фреймворків для створення кросплатформових застосунків (Qt, Electron, Python + Tkinter або PyQt) дозволяє розробити простий і зручний інтерфейс для оператора.

Такий інтерфейс може містити:

- візуалізацію схеми підключень,
- індикацію виявлених дефектів у реальному часі,
- автоматичну генерацію протоколів перевірки,
- збереження історії перевірок.

Інтеграція баз даних та веб-доступу. Сучасні підприємства дедалі частіше працюють з базами даних для зберігання параметрів тестування, журналів подій, історії виробництва. Впровадження бази даних (наприклад, SQLite або PostgreSQL) дозволяє створювати єдину централізовану систему контролю, яка може бути пов'язана з іншими етапами виробничого процесу.

Також можливим є використання веб-серверів або REST API для доступу до результатів перевірки віддалено - через мережу або хмарні сервіси. Це особливо актуально для лабораторій або розробників, що працюють віддалено.

Використання алгоритмів штучного інтелекту. У перспективі системи контролю якості можуть включати алгоритми машинного навчання для аналізу тенденцій, виявлення неочевидних дефектів або класифікації типових помилок монтажу. Навіть прості моделі, натреновані на статистичних даних (наприклад, decision tree, SVM, random forest), можуть бути корисними для побудови систем попереджувальної діагностики.

Особливий інтерес становить поєднання комп'ютерного зору з розпізнаванням структурних аномалій - це дозволяє не лише перевіряти, чи є провід на місці, а й виявляти характерні візуальні порушення (згин, зсув, некоректна зачистка тощо).

Універсальність та масштабованість. Система має бути здатна працювати з різними конфігураціями кабельних джгутів - від простих 4–6 контактних схем до складних багатожильних з'єднань. При цьому бажано забезпечити автоматичне визначення схеми або швидке перемикання між конфігураціями за допомогою попередньо збережених шаблонів.

Енергоефективність та компактність. Особливо це актуально для мобільних стендів або лабораторних версій, які повинні працювати від автономного джерела живлення. Застосування мікроконтролерів з низьким енергоспоживанням та OLED-дисплеїв дозволяє створити компактні системи для виїзного або навчального тестування.

Усі ці напрями - не лише теоретичні побажання, а реальні інженерні цілі, досягнення яких дозволить перейти від дорогих, закритих, громіздких промислових рішень до нової генерації систем, орієнтованих на доступність, відкритість і адаптивність.

1.6. Обґрунтування вибору напрямку дослідження

У сучасних умовах виробництво кабельних джгутів все більше орієнтується на швидкість, точність, адаптивність та зменшення витрат. Проте наявні рішення в галузі автоматизованого контролю якості не завжди відповідають цим вимогам. Як показано в попередніх підпунктах, промислові системи є дорогими, складними в обслуговуванні, слабо масштабованими та

обмежено відкритими. Це створює серйозні бар'єри для малих і середніх підприємств, навчальних закладів, інженерних лабораторій і розробників, які не можуть дозволити собі впровадження таких систем або не мають потреби у надлишковому функціоналі.

Водночас, із розвитком доступних мікроконтролерних платформ (Arduino, ESP32, STM32), простих засобів візуалізації (OLED, LCD, Web UI), програмних середовищ (Python, C++, Node-RED) і відкритих протоколів, з'являються всі передумови для розробки економічно обґрунтованої, функціональної та адаптивної системи контролю. Така система повинна:

- бути легкою у налаштуванні та розширенні;
- підтримувати базові функції електричного тестування;
- забезпечувати візуалізацію результатів у зручному форматі;
- мати можливість масштабування до кількох десятків з'єднань;
- не вимагати спеціалізованих знань для експлуатації.
- Особливо актуальним є створення таких рішень для:
 - технікумів, коледжів, ЗВО - як лабораторна установка для навчання;
 - підприємств, що тільки розгортають серійне виробництво;
 - розробників, які працюють над експериментальними зразками;
 - об'єктів, де потрібна періодична перевірка кабельних з'єднань (наприклад, у медичних установах, транспорті, сервісних центрах).

З огляду на зазначене, в межах даної бакалаврської роботи ставиться завдання розробити прототип автоматизованої системи контролю якості кабельних джгутів, який буде відповідати таким ключовим вимогам:

- Функціональність: перевірка правильності з'єднань між контактами, виявлення обривів та коротких замикань.
- Гнучкість: можливість роботи з різними конфігураціями джгутів без повної перепайки.
- Доступність: використання недорогих і відкритих компонентів (наприклад, ESP32, Arduino, Raspberry Pi/Pico, комутаційні плати).
- Зручність: наявність простого графічного інтерфейсу користувача, з можливістю перегляду результатів тестування в режимі реального часу.

- Модульність: можливість підключення додаткових модулів (наприклад, машинного зору, зчитувачів штрих-кодів, логування у БД тощо).
- Потенціал для розвитку: проєктована архітектура має дозволяти подальше розширення - як апаратне (додаткові плати, розширення кількості контактів), так і програмне (впровадження нових алгоритмів перевірки).

Така система матиме значну практичну цінність не лише як дослідницький чи навчальний інструмент, а й як повноцінний технічний засіб контролю якості в умовах малосерійного виробництва або розробки електротехнічних пристроїв.

1.7. Загальні положення щодо розробки

Автоматизовані системи контролю якості є важливим інструментом на сучасних виробничих підприємствах, особливо в умовах багатосерійного або дрібносерійного складання продукції. Кабельні джгути - це елементи, які часто використовуються в автомобільній, побутовій, комп'ютерній техніці, авіації, телекомунікаціях, і при цьому залишаються вразливими до помилок монтажу. Навіть незначна помилка у підключенні може бути причиною виходу з ладу обладнання та створювати загрозу безпеці.

Через високу складність, вартість або незручність багатьох промислових систем контролю виникає потреба у створенні універсального прототипу, який би поєднував автоматизований електричний контроль, інтуїтивну індикацію результатів та гнучку конфігурацію, пристосовану до різних джгутів без суттєвих змін у апаратному забезпеченні.

Основна мета розробки - спроектувати таку систему, яка б могла:

- Забезпечити перевірку електричної цілісності схем кабельного джгута;
- Виявляти типові помилки з'єднань (обриви, короткі замикання, некоректні лінії);
- Бути простою у виготовленні та налаштуванні навіть для не підготовленого персоналу;
- Працювати на базі мікроконтролера з відкритим програмним середовищем (наприклад, Arduino, Raspberry або ESP32);

- Використовувати недорогі компоненти з вільним програмним забезпеченням;
- Масштабуватися при потребі - тобто легко розширювати кількість тестованих з'єднань або додавати нові функції.

Розробка такої системи є не лише корисною в навчальному процесі (як лабораторний стенд), а й може стати реальною частиною виробництва, особливо в малих підприємствах, де велике значення мають гнучкість, економічність та простота.

У контексті цифрової трансформації виробництва, подібні компактні системи відкривають широкі можливості: зчитування статистики, реєстрація результатів, виведення у звіт, підключення до виробничих облікових систем. Таким чином, навіть простий прототип може закласти основу для інтелектуальної системи контролю якості.

1.8. Визначення вимог до системи

Проектування будь-якого технічного пристрою починається з чіткого формулювання вимог до його функціональності, надійності та експлуатаційних характеристик. У випадку автоматизованої системи контролю якості кабельних джгутів ці вимоги визначаються специфікою технологічного процесу, типами можливих помилок у з'єднаннях, особливостями кабельної продукції та очікуваннями кінцевих користувачів.

Сформульовані вимоги поділяються на функціональні, технічні, ергономічні та експлуатаційні.

Функціональні вимоги:

1. Перевірка правильності з'єднань.

Система повинна порівнювати фактичну схему з'єднань із еталонною. Усі правильні з'єднання мають бути підтверджені, всі порушення - зафіксовані.

2. Виявлення типових дефектів:

- Обрив проводу (відсутність електричного контакту);
- Коротке замикання (з'єднання між нееталонними контактами);
- Хибне з'єднання (провід з'єднаний не з тим контактом).

3. Можливість конфігурації.

Користувач повинен мати змогу задавати або завантажувати схему еталонного з'єднання у зручній формі.

4. Вивід результатів перевірки.

Результати тесту мають бути відображені для оператора: або через вбудований дисплей, або на комп'ютері через інтерфейс обміну даними.

5. Автоматичний і ручний запуск.

Система повинна дозволяти запуск перевірки як натисканням кнопки, так і автоматично після підключення тестованого джгута.

Технічні вимоги:

1. Масштабованість.

Система має забезпечувати перевірку від 4 до 64 (і більше) з'єднань, залежно від типу використовуваного мультиплексора або мікроконтролера.

2. Низьковольтний режим роботи.

Перевірка повинна здійснюватися на безпечних рівнях напруги (до 5 В), щоб уникнути пошкодження проводів або елементів джгута.

3. Час перевірки.

Повний цикл перевірки одного джгута має тривати не більше 1–3 секунд, залежно від кількості ліній.

4. Мінімізація апаратних портів.

Апаратне рішення повинно використовувати мінімальну кількість виводів мікроконтролера за рахунок застосування матричних схем і мультиплексорів.

Ергономічні та інтерфейсні вимоги:

1. Зрозуміле представлення інформації. Повідомлення про помилки мають бути чіткими та структурованими: наприклад, «Контакт 3 не з'єднаний з Контакт 7», або «Замикання між контактами 5 і 9».

2. Можливість локалізації. Текст інтерфейсу має бути доступний українською мовою (і, за потреби, іншими мовами).

3. Простота керування. Система повинна мати мінімум органів керування (1–2 кнопки), або взагалі запускатись автоматично при виявленні джгута.

Експлуатаційні вимоги:

1. Можливість роботи в умовах підвищеної вологості або пилу (у перспективі - захист корпусу за стандартом IP).

2. Стійкість до вібрацій та механічного зносу.

3. Можливість оновлення прошивки.

4. Живлення від USB, акумулятора або блоку живлення 5 В.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1. Функціональний підхід до реалізації

Для забезпечення надійної перевірки кабельних джгутів при мінімальній кількості апаратних ресурсів та максимальній гнучкості, доцільним є використання матричного методу тестування. Цей підхід дозволяє перевіряти всі можливі комбінації з'єднань між контактами без потреби у прямому з'єднанні кожного з кожним. Він базується на подачі сигналу по одному входу та фіксації відповідей на всіх інших виводах.

У запропонованій системі реалізується поетапне опитування кожної лінії, і паралельне зчитування сигналу з решти контактів. Таким чином можливо детектувати:

- Наявність з'єднання;
- Коротке замикання (сигнал з'являється на більше ніж одному виводі);
- Обрив (відсутність сигналу на очікуваному контакті);
- Помилкове з'єднання (сигнал не там, де очікується).

Принцип роботи:

Кожен контакт джгута підключається до одного з портів вводу/виводу мікроконтролера або через мультиплексори. У циклі один з контактів переводиться у режим виходу та подає високий логічний рівень (наприклад, +5 В). Решта контактів переводяться у режим входу з підтягуванням до низького рівня. Система зчитує, на яких із них з'являється логічна «1», і порівнює результат з еталонною схемою. Цикл повторюється для кожного контакту як джерела сигналу.

Завдяки цьому алгоритму система може перевіряти будь-яку кількість з'єднань без механічного перемикавання або складної логіки. Особливо ефективно така методика працює при використанні цифрових мультиплексорів (74НС4067 або аналогів), які дозволяють динамічно перемикати сигнальні лінії та зменшити кількість необхідних портів контролера.

Алгоритм тестування:

1. Завантажити з пам'яті еталонну схему у вигляді таблиці пар з'єднань.
2. Послідовно активувати кожен контакт як джерело сигналу.
3. Зчитувати відповіді з інших контактів.
4. Фіксувати відповідності та помилки.
5. Після завершення перевірки усіх комбінацій - сформувати список знайдених порушень.

Еталонне з'єднання зберігається у вигляді таблиці 2.1 пар контактів.

Таблиця 2.1 Пари контактів

№ пари	Контакт А	Контакт В
1	3	7
2	1	5
3	2	6

Це дозволяє адаптувати пристрій до перевірки різних типів джгутів без необхідності зміни програмного коду - достатньо лише оновити таблицю з'єднань.

Перевагою такого функціонального підходу є його масштабованість. Кількість тестованих ліній обмежується лише кількістю портів або каналів мультиплексорів. Це дає змогу перевіряти як прості 4-контактні, так і складніші 32–64-контактні джгути, не змінюючи логіку роботи пристрою.

Також можлива подальша реалізація таких функцій:

- Підтримка автоматичного завантаження еталонної схеми з комп'ютера;
- Лог-файл із результатами перевірок;
- Виведення графічного інтерфейсу на ПК через серійне з'єднання.

2.2. Обґрунтування вибору елементної бази

Для реалізації прототипу автоматизованої системи контролю кабельних джгутів важливо підібрати такі апаратні компоненти, які забезпечують надійну роботу, легкість інтеграції, доступність на ринку та відповідність технічним вимогам. При цьому слід враховувати не лише кількість тестованих контактів, а й необхідність інтерфейсної взаємодії, керування комутацією, виведення результатів та потенційне розширення функціоналу в майбутньому.

Ключовим елементом системи є мікроконтролер, який виконує роль керуючого блоку: керує мультиплексорами, зчитує дані з входів, проводить логічний аналіз, порівнює з еталонною схемою та виводить результат. Основні критерії вибору: кількість портів введення/виведення, підтримка послідовних інтерфейсів, обсяг пам'яті, тактова частота, а також доступність розробницького середовища.

Найдоцільнішими варіантами є:

- Arduino Uno – простий і доступний контролер із базовими можливостями, підходить для тестування невеликих джгутів до 10 контактів;
- Arduino Mega 2560 – розширена версія з 54 цифровими портами, що дозволяє напряду під'єднувати більшу кількість провідників або мультиплексорів;
- ESP32 – сучасна потужна платформа, яка, крім великої кількості GPIO, має вбудовані інтерфейси Wi-Fi та Bluetooth, що може бути корисним для віддаленого моніторингу та передачі результатів.

У контексті цього проєкту доцільним виглядає використання Arduino Mega як базового варіанту завдяки його простоті, кількості портів і широкій підтримці спільноти. Якщо буде потрібно реалізувати інтерфейс зв'язку з ПК або передавати дані у бездротовому форматі, розглядатиметься ESP32.

Мультиплексори

Оскільки кількість фізичних портів контролера обмежена, а кількість перевірюваних з'єднань може перевищувати доступні GPIO, доцільно використовувати мультиплексори типу 74HC4067. Це 16-канальні цифрові

комутатори, які дозволяють опитувати багато контактів через єдиний набір адресних ліній.

Переваги:

- Дає змогу підключити до 16 сигналів через 4 адресні порти;
- Дозволяє масштабування шляхом каскадування (наприклад, для 32 контактів – два мультиплексори);
- Простота підключення та підтримка Arduino/ESP середовищем.

Таким чином, за потреби можна побудувати комутаційну матрицю на 64 і більше контактів без складної електроніки.

Результати перевірки мають бути доступними для користувача у зручному форматі. Для цього можливі кілька варіантів:

- OLED-дисплей 0.96” (I2C) – компактний, недорогий, дозволяє виводити текстові повідомлення («ОК», «Помилка», «Контакт 5 – не з’єднано» тощо).
- Серійний порт (UART) – використовується для зв’язку з комп’ютером. Можна переглядати дані в Arduino Serial Monitor або у спеціальній програмі (написаній, наприклад, на Python або Processing).
- Світлодіодна індикація – найпростіший варіант: зелений індикатор «усе гаразд», червоний – «є помилки». Може застосовуватись як допоміжний засіб.

Варіант із OLED-дисплеєм має перевагу через універсальність, підтримку кирилиці, мінімальну кількість дротів та просте живлення.

Живлення системи залежить від обраного контролера:

- Arduino працює від 5 В (через USB або стабілізований блок живлення);
- ESP32 – від 3.3 В (має вбудований стабілізатор на платі).

Також важливо, щоб схема живлення забезпечувала стабільну напругу для мультиплексорів, оскільки при великій кількості активних ліній можливо просідання сигналу. Рекомендовано використовувати стабілізоване джерело живлення потужністю щонайменше 1–2 Вт для повного прототипу.

До допоміжних компонентів належать:

- Резистори підтягування (якщо необхідно уникнути «плаваючих» входів);
- Кнопки запуску тесту;
- Захисні діоди або обмежувачі перенапруг (для безпеки мікроконтролера);
- Тестова плата або пайка на макетній платі для фізичного збирання системи.

2.3. Архітектура та схема взаємодії

Побудова ефективної автоматизованої системи контролю якості кабельних джгутів потребує чіткого визначення архітектури взаємодії її основних складових. Архітектура повинна забезпечувати злагоджену роботу апаратної та програмної частини з можливістю розширення, гнучкого налаштування та швидкого оновлення конфігурацій.

На логічному рівні система складається з трьох основних функціональних блоків:

1. Апаратна частина. Включає мікроконтролер, мультиплексори, дисплей або інші засоби виведення інформації, а також модуль підключення кабельного джгута. Вона реалізує фізичну взаємодію з об'єктом контролю, подає сигнали, зчитує відгуки та ініціює комутацію контактів.

2. Програмна частина. Реалізує алгоритми тестування з'єднань, формує структуру тестових пар, здійснює порівняння з еталоном і керує взаємодією з інтерфейсом користувача. Вона також відповідає за аналіз типових помилок і обробку виключень (наприклад, відсутності джгута чи некоректного формату еталону).

3. Інтерфейс користувача. Виводить результати тестування, повідомлення про помилки або успішне проходження перевірки. Залежно від реалізації, це може бути дисплей на пристрої або вікно на комп'ютері, що приймає дані через серійний порт.

На рисунку 2.1 представлено спрощену модель структурної взаємодії елементів:



Рисунку 2.1 Модель структурної взаємодії елементів

У цьому сценарії мультиплексори забезпечують динамічне опитування всіх контактів джгута. Мікроконтролер визначає активний контакт, подає на нього сигнал, а потім за допомогою інших каналів зчитує сигнал на всіх інших лініях, аналізуючи наявність очікуваного або помилкового з'єднання. Після проходження повного циклу з усіма контактами, результати аналізу формуються у вигляді таблиці або повідомлення, яке виводиться для користувача.

Алгоритм взаємодії модулів системи

1. Очікування події запуску. Система перебуває у режимі очікування – або натискання кнопки, або сигналу автоматичного старту при підключенні джгута.
2. Завантаження еталонної схеми. З пам'яті мікроконтролера або зовнішнього джерела (наприклад, EEPROM або флешки) зчитується таблиця з'єднань, яку слід перевірити.
3. Формування комбінацій перевірки. Для кожної пари з'єднань система генерує сигнальну конфігурацію, активує один контакт і перевіряє відгук на іншому.

4. Порівняння результату з еталоном. Якщо з'єднання підтверджується - фіксується як «ОК», якщо ні - зберігається як помилка (з уточненням типу).

5. Завершення тесту та вивід інформації. Коли всі пари перевірено, результати подаються користувачеві через інтерфейс.

Передбачувана структура дозволяє вносити зміни в окремі модулі без потреби перебудовувати всю систему. Наприклад:

- Заміна OLED-дисплея на TFT-екран не потребує зміни логіки тестування.
- Розширення кількості з'єднань лише додає нові мультиплексори без зміни програмної архітектури.
- Перехід від Arduino до ESP32 може бути реалізований із мінімальними змінами в коді.

Крім того, система може бути розширена додатковими функціями, як-от запис результатів у лог-файл, передача по мережі або побудова графічного звіту.

2.4. Обмеження системи та засоби вдосконалення

Будь-яка інженерна система, особливо на етапі прототипу, має певні обмеження, які впливають на точність, швидкодію, зручність використання або масштабованість. Їх потрібно розуміти не лише для оцінки ефективності поточної реалізації, але й для планування майбутніх модернізацій та розширення функціоналу.

Основні обмеження проєктованої системи

1. Логічний рівень перевірки

Система здійснює бінарну перевірку наявності або відсутності електричного з'єднання. Вона не вимірює реальні значення опору, не враховує паразитні ємності або індуктивності, а також не ідентифікує деградацію провідників. Це обмежує її застосування у високоточних або спеціалізованих системах, де важливі аналогові параметри.

2. Залежність від структури еталонної схеми

Оскільки еталонне з'єднання задається таблицею, система розрахована лише на перевірку відомої, жорстко заданої конфігурації. Вона не може

«вгадати» чи адаптуватися до нового типу джгута без попереднього завдання нового шаблону. Це потребує або ручного оновлення прошивки, або реалізації програмного інтерфейсу для керування ззовні.

3. Обмеження по кількості контактів

При використанні одного мікроконтролера та 2–3 мультиплексорів кількість доступних каналів обмежується (практично – до 64–128 ліній). Якщо необхідно тестувати великі джгути, доведеться ускладнювати архітектуру: додавати додаткові мікроконтролери або переходити до ПЛІС (FPGA).

4. Відсутність самодіагностики

На цьому етапі система не перевіряє власну працездатність: справність портів, підключень, стан джерела живлення. Це може спричинити хибні спрацьовування у випадку внутрішньої помилки. Надалі доцільно реалізувати процедури самотестування.

5. Людський фактор при підключенні

Під'єднання джгута до тестера виконується вручну. Якщо контакт не вставлено до кінця або підключено невірно, система може отримати некоректні дані. Для вирішення цього слід або використовувати механізм фіксації, або додаткову перевірку на наявність сигналу на спеціальному контрольному піні.

Попри вказані обмеження, архітектура проєктованої системи дає змогу реалізувати низку покращень у майбутніх версіях:

1. Додавання аналогового аналізу

Інтеграція аналогових входів мікроконтролера дозволяє проводити вимірювання опору, визначати силу струму через лінію або виявляти неповні контакти. Це особливо корисно для кабелів із довжиною понад 1 метр, де зростає ймовірність деградації ліній.

2. Візуалізація результатів на ПК

Через простий графічний інтерфейс можна реалізувати схематичне представлення перевірки, наприклад у вигляді діаграми або кольорової таблиці. Це підвищує зручність контролю, особливо у виробничому середовищі з багатьма тестами за день.

3. Підключення до локальної мережі або Wi-Fi

Використовуючи ESP32 або інші мережеві платформи, можна реалізувати передачу даних у реальному часі до сервера, бази даних або у систему управління виробництвом (MES). Це дозволяє зберігати історію перевірок, проводити аналітику або віддалений моніторинг.

4. Автоматичне завантаження еталонів

Поточна реалізація передбачає ручне формування таблиці з'єднань. Альтернативно, можна створити інтерфейс для завантаження шаблонів через USB, SD-карту або інтернет, що дозволить швидко переключатись між конфігураціями без перепрошивки контролера.

5. Додавання самотестування

Окремий цикл самоперевірки перед запуском дозволить визначити, чи система готова до роботи (всі канали активні, напруга в нормі, дані еталону завантажені). Це зменшить кількість хибних помилок.

6. Розширення на візуальний контроль (опція)

Згодом можна інтегрувати камеру та програмні засоби комп'ютерного зору для візуального контролю правильності фіксації проводів, маркувань або кольорів ізоляції. Таке гібридне рішення підвищить точність і виведе систему на новий рівень.

2.5. Техніко-економічне обґрунтування

У сучасних умовах техніко-економічне обґрунтування є обов'язковим етапом розробки будь-якої інженерної системи, особливо тієї, яка має потенційне практичне застосування у виробничому процесі. Воно дозволяє оцінити доцільність впровадження, визначити вартість реалізації, порівняти з існуючими аналогами та з'ясувати, наскільки ефективним буде запропоноване рішення з позиції затрат та очікуваної вигоди.

Проектована система має бути бюджетною, гнучкою та придатною для дрібносерійного або лабораторного використання. Основними критеріями економічної ефективності в даному випадку є: невисока собівартість комплектуючих, доступність компонентів, простота збирання, мінімальні

вимоги до спеціалізованого обладнання та можливість подальшої масштабованості.

В таблиці 2.2 наведено орієнтовну вартість основних компонентів, необхідних для створення одного функціонального прототипу системи контролю якості кабельних джгутів.

Таблиця 2.2 Вартість компонентів системи контролю якості кабельних джгутів

Найменування	Кількість	Орієнтовна ціна за одиницю (грн)	Сума (грн)
Arduino Mega 2560 (клон)	1	400	400
Мультиплексор 74НС4067	2	60	120
OLED-дисплей 0.96" (I2C)	1	120	120
Макетна плата / пайка	1	100	100
Проводи, конектори, роз'єми	-	150	150
Резистори, дрібні елементи	-	50	50
Живлення (адаптер 5В або USB)	1	100	100
Разом:			1040 грн

Таким чином, повна вартість виготовлення одного пристрою не перевищує 1100 грн (без врахування корпусу), що є надзвичайно конкурентоспроможним показником порівняно з промисловими тестерами, вартість яких часто починається від 10 000 грн і може сягати сотень тисяч для повністю автоматизованих систем.

Таблиця 2.3 Порівняння з існуючими аналогами

Назва системи	Тип	Вартість (орієнтовно)	Гнучкість	Призначення
Cirris Easy-Wire CR	Промислова	від 60 000 грн	Низька	Масове виробництво
SAMI Research HVX	Промислова	від 120 000 грн	Середня	Аерокосмічна сфера
Прототип (даний проєкт)	Лабораторний	~1 000 грн	Висока	Освіта, малі серії

Таким чином, запропоноване рішення не є прямим конкурентом промисловим системам, однак воно ідеально підходить для:

- Внутрішнього контролю на підприємствах малого бізнесу;
- Навчальних цілей у технікумах, ПТУ та університетах;
- Експериментальних лабораторій та стартапів;
- Випробувань прототипів електропроводки в інженерному середовищі.

Час і ресурси на реалізацію

Термін виготовлення повного прототипу з моменту закупівлі компонентів до початку тестування становить не більше 5–7 робочих днів при участі одного розробника. Для масштабного застосування достатньо додати корпус, адаптувати прошивку під конкретний тип джгутів і підготувати просту інструкцію користувача.

Жоден з етапів не вимагає дорогого обладнання (достатньо паяльника, базового інструменту, ноутбука) або складного виробничого процесу.

Висновок

З техніко-економічної точки зору, розробка є виправданою та потенційно ефективною. Завдяки низькій собівартості, відкритому ПЗ та можливості адаптації під потреби користувача, система дозволяє покривати базові потреби контролю якості без надмірних фінансових і технологічних витрат. Її впровадження може суттєво скоротити ризик браку, підвищити продуктивність і дисциплінувати процес монтажу, що особливо актуально для невеликих підприємств.

РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Структура та функціональні блоки системи

Розроблена система автоматизованого контролю якості кабельних джгутів призначена для виявлення типових помилок монтажу (обривів, коротких замикань, хибних з'єднань) у виробничих або лабораторних умовах. В основу структури системи покладено модульний принцип, для забезпечення гнучкості, простоту оновлення та можливість масштабування.

Система реалізована на основі мікроконтролера ESP32, який керує комутаційними модулями (мультиплексорами), зчитує сигнали з контактів, обробляє отриману інформацію та виводить результати на OLED-дисплей. Така архітектура дозволяє проводити електричний тест кожного провідника у джгуті з мінімальною кількістю апаратних елементів.

Система складається з таких основних модулів:

1. Керуючий модуль ESP32 виконує функції:
 - генерації тестових сигналів;
 - зчитування станів з'єднань;
 - порівняння з еталонною схемою;
 - виведення результатів тесту;
 - комунікації з користувачем або сервером (через UART, Wi-Fi).
2. Блок комутації ($2 \times 74HC4067$). Кожен мультиплексор забезпечує підключення до 16 контактів. Каскадування дозволяє збільшити кількість перевірюваних з'єднань без значного збільшення апаратної складності.
3. Індикаційний блок (OLED-дисплей) Дисплей 0.96" (I2C) використовується для:
 - показу статусу тесту ("OK", "ERROR");
 - деталізації виявлених помилок;
 - меню вибору режиму (у перспективі).
4. Модуль введення (кнопка або датчик). Використовується для ручного запуску перевірки або автоматичного старту після підключення джгута.

5. Живлення (5 В USB або адаптер). Система може живитися від комп'ютера або автономного джерела. Усі компоненти працюють у безпечному низьковольтному режимі.

Фізична схема взаємозв'язків

На рисунку 3.1 представлена логічна структура системи:

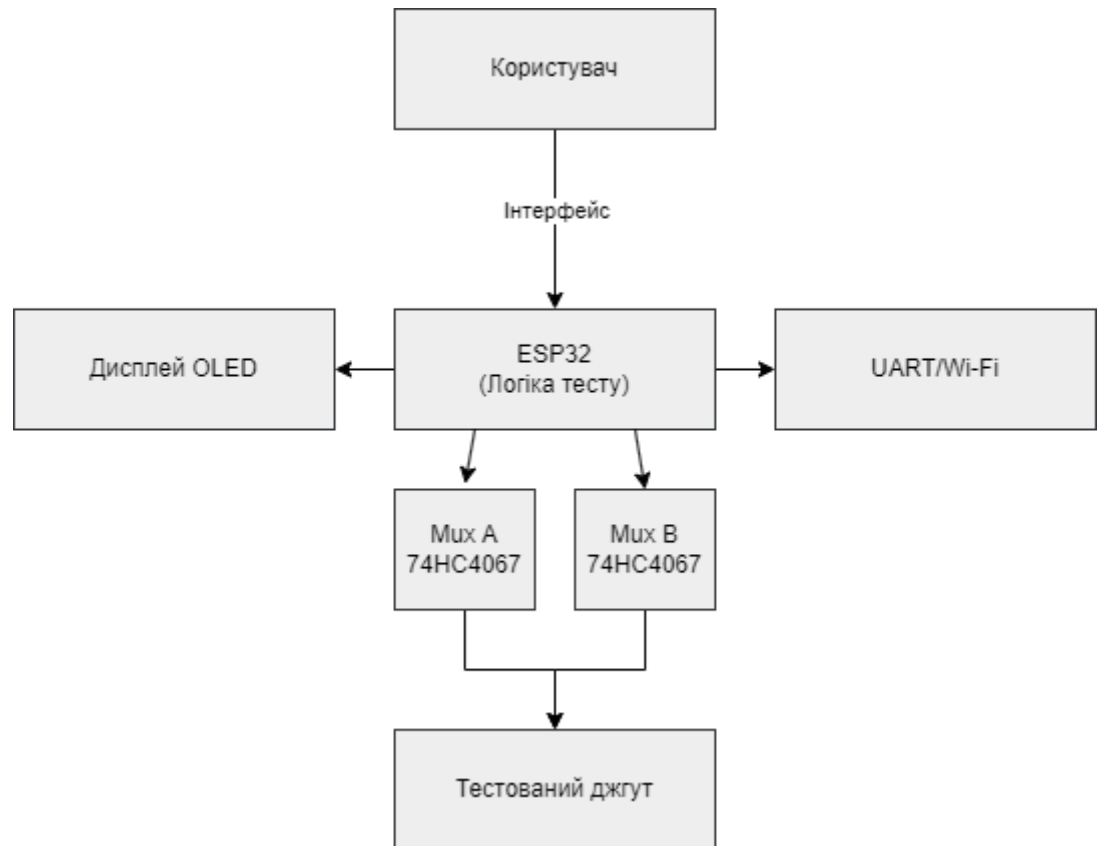


Рисунок 3.1 Логічна структура системи

Принцип роботи та алгоритм дії системи:

1. Користувач натискає кнопку запуску або підключає джгут;
2. ESP32 активує один з каналів на мультиплексорі як джерело сигналу;
3. Інші канали переводяться в режим зчитування;
4. Проводиться перевірка кожної пари: чи існує відповідне з'єднання;
5. Після завершення аналізу система виводить результати на OLED або передає на ПК.

Переваги такої архітектури

- Модульність: можливість заміни або доповнення окремих блоків;

- Масштабованість: від 8 до 128+ контактів без зміни алгоритму;
- Низька вартість: орієнтовна ціна повної збірки – до 1000 грн;
- Гнучкість у налаштуванні: зміна конфігурації лише через прошивку або файл шаблону.

3.2. Вибір контролера: ESP32 як центральний елемент системи

Одним з ключових рішень при проектуванні автоматизованої системи контролю якості є вибір керуючого контролера, який забезпечить взаємодію між всіма апаратними модулями, а також реалізує програмну логіку перевірки кабельних джгутів. Після аналізу доступних варіантів (Arduino Mega, STM32, Raspberry Pi Pico), вибір було зупинено на ESP32.

Мікроконтролер ESP32 від компанії Espressif є 32-бітним дводотовим мікропроцесором із широким набором функцій. Його переваги у контексті розробки автоматизованої системи:

- Потужність обробки. Два ядра, що працюють на частоті до 240 МГц, дозволяють одночасно обробляти дані тестування, працювати з периферією та формувати інтерфейс.
- Велика кількість портів GPIO. До 34 універсальних портів введення/виведення забезпечують гнучкість у підключенні мультиплексорів, дисплеїв, кнопок тощо.
- Інтегровані бездротові модулі (Wi-Fi, Bluetooth). Дають можливість реалізувати віддалений моніторинг, інтеграцію з внутрішньою мережею підприємства або передавати дані на сервер.
- Підтримка Arduino IDE та PlatformIO. Спрощує процес прошивки, налагодження та тестування – що особливо важливо в умовах обмеженого часу або при роботі з початківцями.
- Низьке енергоспоживання. Дає змогу реалізувати автономну роботу пристрою, особливо у мобільних або портативних версіях.
- Ціна та доступність. Вартість модуля ESP32 (клон або DevKit) на українському ринку складає в середньому 150–250 грн, що робить його економічно привабливим.

Таблиця 3.1

Параметри контролер	Arduino Mega 2560	STM32F103C8T6	Raspberry Pi Pico	ESP32 (обраний)
Тактова частота	16 МГц	72 МГц	133 МГц	240 МГц (2 ядра)
Кількість GPIO	54	~37	~26	до 34
Wi-Fi / Bluetooth	Немає	Немає	Немає	Є (вбудовано)
IDE	Arduino IDE	STM32CubeIDE	C SDK, MicroPython	Arduino IDE, VS Code
Ціна (грн)	~400	~180	~200	~200
Рівень складності	Низький	Середній	Середній	Середній

На відміну від Arduino, ESP32 відкриває широкі можливості для подальшої модернізації системи:

- Підключення до локальної мережі (Wi-Fi): передача результатів тестування на сервер або збереження у базі даних.
- Bluetooth-зв'язок: зв'язок із мобільним застосунком або інтерфейсом без дротів.
- Веб-інтерфейс: реалізація базового НМІ через браузер, без додаткових дисплеїв.
- OTA (Over-The-Air) оновлення: можливість віддалено перепрошити систему без фізичного доступу.

Хоча Raspberry Pi Pico має добрий баланс потужності та енергоспоживання, він не має вбудованих Wi-Fi / Bluetooth, а для його повноцінної роботи потрібна складніша прошивка. STM32 також вимогливий до інструментів розробки та складний у відлагодженні для новачків.

У межах реалізації було підтверджено:

- стабільність роботи мультіплексорів 74HC4067 із ESP32;
- сумісність OLED-дисплея (через I2C) із бібліотеками Adafruit_GFX та Adafruit_SSD1306;

- можливість одночасної роботи UART (передача логів), Wi-Fi (веб-інтерфейс) і GPIO (тестування) без збоїв;
- зручність налагодження через Arduino IDE та Serial Monitor.

Вибір ESP32 як центрального елементу системи виявився технічно та економічно доцільним. Він поєднує достатню обчислювальну потужність, гнучкість введення/виведення, вбудовані інтерфейси зв'язку та доступність, що дозволяє створити сучасну, масштабовану та інтегровану систему контролю якості кабельних джгутів.

3.3. Принцип роботи системи перевірки кабельних джгутів

Функціонування автоматизованої системи базується на матричному методі тестування з'єднань, який дозволяє ефективно перевіряти наявність або відсутність електричного контакту між будь-якими двома точками тестованого джгута. Такий підхід забезпечує максимальне покриття перевірки при мінімальній кількості фізичних підключень до контролера.

Суть роботи полягає в подачі логічної "1" (напруги живлення) на один із контактів джгута та спостереженні, чи з'являється цей сигнал на інших контактах відповідно до еталонної схеми з'єднань. Кожен контакт послідовно виконує роль джерела сигналу, а решта – детекторів.

Етапи роботи системи

1. Завантаження еталону з EEPROM або флеш-пам'яті зчитується таблиця пар контактів, які мають бути з'єднані. Наприклад:

Еталон:

(3 ↔ 7)

(2 ↔ 6)

(1 ↔ 5)

2. Ініціалізація портів. ESP32 конфігурує всі лінії на вхід з підтягуванням до GND (INPUT_PULLDOWN). Потім по черзі кожен контакт переводиться в режим виходу (OUTPUT) з логічною "1".

3. Комутація через мультиплексори. Мультиплексори 74HC4067 забезпечують динамічне підключення кожного контакту до потрібного порту. Це

дозволяє підключати до 32, 64 або більше контактів з мінімальним використанням GPIO ESP32.

4. Зчитування реакцій. Після подачі сигналу система зчитує стани інших ліній. Якщо сигнал з'явився на передбаченому контакті – фіксується успішне з'єднання. Якщо:

- сигнал відсутній – обрив;
- сигнал з'явився на неочікуваному контакті – коротке замикання;
- сигнал з'явився на декількох – множинна помилка.

5. Обробка результатів. Зібрані дані порівнюються з еталонною таблицею. Усі невідповідності виводяться у вигляді списку помилок. Система формує зведене повідомлення: “Тест пройдено” або “Виявлено помилки”.

6. Виведення інформації. Результати тесту передаються:

- на OLED-дисплей у текстовому форматі;
- або через UART для відображення на ПК;
- або через Wi-Fi (опціонально) у веб-інтерфейс.

Алгоритм у псевдокодi

Для кожного джерела i :

подати HIGH на i

для кожного $j \neq i$:

зчитати стан j

якщо $(i \leftrightarrow j) \in \text{еталоні}$:

якщо сигнал $\epsilon \rightarrow \text{ОК}$

якщо сигналу немає $\rightarrow \text{Обрив}$

якщо $(i \leftrightarrow j) \notin \text{еталоні}$:

якщо сигнал $\epsilon \rightarrow \text{Замикання}$

скинути i в LOW

Переваги обраного підходу

- Повне охоплення усіх можливих з'єднань – тестується кожна пара;
- Сумісність з будь-якою схемою з'єднань – достатньо завантажити нову таблицю;
- Простота масштабування – розширення не вимагає зміни логіки;

- Відсутність рухомих елементів – надійність при експлуатації.

Приклад роботи. Для тестового джгута з 6 контактами і трьома еталонними з'єднаннями система може дати такий результат:

Результати тесту:

Контакт 1 ↔ Контакт 5 – ОК

Контакт 2 ↔ Контакт 6 – ОК

Контакт 3 ↔ Контакт 7 – Обрив

Виявлено замикання між контактами 4 і 6

Статус: Виявлено 2 помилки

Обмеження методу:

- Не враховується опір або деградація провідників – лише бінарна наявність сигналу;
- Залежність від правильної таблиці еталону – при її помилці можливі хибні висновки;
- Потрібна стабільна логіка підключення джгута до пристрою.

Реалізований принцип матричного тестування забезпечує надійну перевірку правильності з'єднань при мінімальній апаратній складності. Його реалізація на ESP32 із використанням мультиплексорів забезпечує оптимальний баланс точності, швидкодії та гнучкості, необхідних для сучасних вимог контролю якості в електромонтажі.

3.4. Програмна реалізація автоматизованої системи

Програмна частина автоматизованої системи на базі ESP32 реалізована у середовищі Arduino IDE з використанням мов програмування C++ та бібліотек для роботи з периферійними пристроями. Основна мета програмного забезпечення – управління перевіркою з'єднань, аналіз помилок та виведення результатів через інтерфейс.

Структура програмного коду

Програму умовно поділено на такі логічні модулі:

1. Ініціалізація системи. Налаштування GPIO, OLED-дисплея, мультиплексорів та серійного порту.

2. Завантаження еталонної схеми. Еталонні з'єднання зберігаються як масив пар (наприклад, `int refConnections[][2]`), або зчитуються з EEPROM / SD-карти (опціонально).

3. Основний цикл тестування. Реалізує поетапне опитування контактів методом подачі сигналу та зчитування відгуку через мультиплексори.

4. Аналіз результатів. Порівняння отриманих з'єднань з еталоном, формування списку помилок.

5. Виведення результатів. Вивід статусу перевірки на OLED-дисплей, та/або передача через UART або Wi-Fi.

Використані бібліотеки

```
#include <Wire.h>           // I2C
#include <Adafruit_GFX.h>    // Графіка для OLED
#include <Adafruit_SSD1306.h> // OLED 0.96"
ESP32 також може використовувати:
#include <WiFi.h>
#include <EEPROM.h>
```

Приклад коду: Тест однієї пари контактів

```
void testConnection(int from, int to) {
    selectMuxChannel(from, muxA); // Вибір джерела сигналу
    digitalWrite(SIG_PIN, HIGH);
    delay(2); // коротка пауза
    selectMuxChannel(to, muxB); // Вибір точки зчитування
    bool state = digitalRead(READ_PIN);
    logResult(from, to, state);
    digitalWrite(SIG_PIN, LOW);
}
```

У майбутньому можлива інтеграція з `WebServer.h` (вбудований веб-інтерфейс).

Приклад коду:

Ініціалізація дисплея

```
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

void setupDisplay() {
    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println(F("Помилка OLED"));
        for (;;)
    }

    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setCursor(0, 0);
    display.println(F("Система ініціалізована"));
    display.display();
}
```

Результати записуються у масив/структуру results[] з полями:

- from, to – пари перевірки;
- status – OK / SHORT / BREAK;
- errorMsg – пояснення для виводу.

На основі цього формуються підсумкові повідомлення.

Виведення результатів на дисплей

```
void displayResults() {
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    for (int i = 0; i < errorCount; i++) {
        display.print("Помилка: ");
        display.println(errors[i]);
    }
    if (errorCount == 0) {
```

```
    display.println("Перевірка пройдена успішно!");  
}  
display.display();  
}
```

Для передачі даних використовується:

- UART (Serial) – передача логів у консоль;
- Wi-Fi (HTTP/MQTT) – у перспективі;
- WebSerial / WebUI – інтерактивний інтерфейс (опційно).

Код передбачає:

- перевірку з'єднання мультиплексорів (виводи, ініціалізація);
- перевірку наявності еталонної схеми;
- роботу у fail-safe режимі при відсутності джгута або помилці.

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Ергономічні проблеми безпеки життєдіяльності

Ергономіка – міждисциплінарна галузь, що вивчає взаємодію людини з технічними засобами та умовами виробничого середовища, з метою оптимізації продуктивності, зниження фізіологічного та психологічного навантаження та підвищення безпеки праці. Вона поєднує в собі знання з фізіології, психології, інженерії, біомеханіки, дизайну, гігієни праці та охорони праці. У сучасному контексті ергономіка виконує ключову роль у запобіганні виробничому травматизму, зниженні ризиків помилок, формуванні комфортного середовища роботи.

Основна мета ергономіки – пристосування технічних і організаційних параметрів системи до фізичних, когнітивних і соціальних особливостей людини. Це означає, що будь-яке обладнання, у тому числі автоматизовані системи, повинні проектуватись так, щоб вони не викликали перевантаження, перенапруги, відчуття небезпеки чи втрати контролю.

У контексті даної бакалаврської роботи, ергономічні аспекти охоплюють:

- організацію робочого місця оператора системи перевірки кабельних джгутів;
- інтерфейс НМІ-панелі, який є єдиною ланкою взаємодії між людиною та автоматизованою системою;
- режим роботи, включно з навантаженням, ритмом і монотонністю дій;
- фізіологічні характеристики працівника, включаючи зір, рухову активність, реакцію на кольори, шрифти, сигналізацію.

Робота оператора в подібних системах не передбачає фізичної праці як такої, однак вона супроводжується високим інформаційно-аналітичним навантаженням, потребує швидкої реакції, зорової концентрації, прийняття рішень на основі сигналів інтерфейсу.

Основна модель ергономіки у виробництві – це «людина – машина – середовище». У межах цієї триєдиної системи всі елементи повинні бути

збалансованими. Будь-який дисбаланс або недосконалість одного з компонентів призводить до загального зниження ефективності, безпеки й надійності функціонування системи.

Таблиця 4.1 Ергономічні вимоги до системи «людина – машина – середовище»

Компонент	Ергономічні вимоги
Людина	Облік фізичних та психофізіологічних параметрів (зріст, зір, витривалість, концентрація, емоційна стабільність, навички)
Машина	Оптимальна висота панелей, комфортне натискання кнопок, читабельність дисплею, логіка алгоритмів, кольорова сигналізація
Середовище	Температура, вологість, освітлення, шум, вентиляція, вібрації, розміщення меблів, антистатичний захист

У розробленій системі контролю якості кабельних джгутів були враховані базові стандарти ергономіки. Інтерфейс НМІ налаштований на контрастні кольори, великі елементи керування, мінімум дій для запуску тесту. Панель встановлена на регульованому кронштейні, що дозволяє оператору обрати найзручніше положення.

Робоче середовище також адаптоване: використовується локальне освітлення тестової панелі, антивідблискові екрани, антистатичне покриття підлоги, шумопоглинальні панелі, системи вентиляції. Освітленість відповідає 500 лк (для точних робіт), як рекомендовано в ДБН (Державних Будівельних Норм).

Рівень безпеки праці в умовах автоматизації залежить не тільки від технічного стану обладнання чи правил охорони праці, а й від ергономічних умов роботи оператора. Якщо людина відчуває дискомфорт, працює в неприродному положенні, змушена виконувати багато однотипних дій, має справу з незрозумілим або перевантаженим інтерфейсом — виникає зростаючий ризик помилок і травматизму.

Ергономіка прямо впливає на:

- психофізіологічну стійкість оператора;
- стійкість уваги і зосередженість;
- зорову напругу та втомлюваність;
- відчуття контролю над ситуацією (що надзвичайно важливо для

морального стану людини на виробництві);

- рівень стресу, викликаний необхідністю швидко приймати рішення.

У розробленій системі НМІ реалізує наступні засоби для зниження психологічного навантаження:

- відсутність “агресивних” повідомлень;
- кольоровий зворотний зв'язок;
- автоматичне пояснення помилок — підказки, що зменшують тривогу

і не потребують втручання керівника;

- запобігання помилковим діям — наприклад, якщо джгут не вставлено, то кнопка “Почати тест” заблокована.

Це забезпечує емоційно стабільну роботу, яка не викликає додаткового нервового навантаження навіть у випадках виникнення браку.

Робоче місце оператора системи контролю якості є фізично статичним — людина працює в положенні стоячи або напівсидячи, виконуючи серії коротких, повторюваних дій (під'єднання джгута, натискання на панелі, візуальний контроль, зняття виробу).

Основні ергономічні параметри, які мають вплив на безпеку й продуктивність:

- висота розташування обладнання;
- кут нахилу панелі управління;
- доступність елементів системи;
- наявність вільного простору для маніпуляцій руками;
- тип поверхні підлоги, освітлення та вентиляція.

У розробленій системі ці параметри узгоджено зі стандартами ДСТУ EN 527-1:2004, ISO 6385, EN 614-1, що встановлюють базові розміри робочих зон для сидячої й стоячої роботи.

Параметри робочого місця:

- Висота монтажного столу — 920 мм (допустимий діапазон: 850–1000 мм);
- Висота НМІ-панелі — 1280 мм від підлоги (у межах рекомендованих 1200–1400 мм);
- Нахил панелі — регульований, від 15° до 45°, залежно від зросту оператора;
- глибина робочої зони — 600 мм (від стійки до кінця поверхні).

Особливості проектування стенду:

- плата з роз'ємами нахилена на 30° — що зменшує потребу в згинанні хребта;
- підставка для ноги — дозволяє частково зменшувати навантаження на поперек;
- освітлення — світлодіодне, 500–700 лк;
- поверхня — антистатичне покриття з протиковзним рельєфом.

Ці параметри були призначені для працівників зі зростом 160–185 см, що відповідає середньостатистичним антропометричним даним. Для працівників, які мають суттєві відхилення по зросту, конструкція стенду дозволяє змінювати висоту на ± 50 мм.

Основне сенсорне навантаження у роботі оператора припадає на зоровий аналіз інформації з НМІ. Екран виводить схему підключення, кольорові індикатори стану, інструкції. При недотриманні норм яскравості, контрасту та розміру шрифту зростає ризик зорової втоми, головного болю, помилок у читанні.

Застосовані рішення:

- контрастне оформлення — темний фон і яскраві елементи;
- розмір шрифту не менше 20 pt для основного тексту;
- підсвічування панелі — не мерехтливе, з індексом $R_a \geq 80$;
- зміна теми оформлення кожні 30 хв (режим “перезавантаження очей”).

Оператор системи виконує переважно роботу верхніми кінцівками — вставлення/виймання джгута, натискання на сенсорний екран. Хоча

навантаження не є важким, при постійній роботі понад 2–3 години починає проявлятися втому в ділянці плеча, зап'ястя, шиї.

Було проведено спрощений аналіз м'язової втоми за методикою RULA (Rapid Upper Limb Assessment). Оцінювались такі фактори:

- положення передпліччя під час роботи (20–60°);
- частота натискань (1 раз на 7–10 с);
- перерви між циклами роботи;
- статичне положення ніг і попереку.

Результат — оцінка RULA = 3 (допустимо, але з помірним навантаженням).

Для зниження навантаження:

- рекомендовано чергування з візуальними перевірками або зміна ролей;
- встановлено підлокітники;
- передбачено підставку під ногу для короткотривалого зменшення навантаження на нижню частину спини.

Оператор працює в умовах високої відповідальності. У разі виявлення браку саме він має першим вирішити — це технічна помилка чи виробничий дефект. За даними внутрішніх опитувань, понад 40% працівників у перші місяці роботи повідомляють про стрес, пов'язаний із страхом допустити помилку.

Щоб знизити це необхідно щоб:

- система ніколи не вказує на “помилку оператора”, а лише на технічний збій;
- використовується м'яка термінологія: “потребує перевірки”, “не відповідає еталону”, “виявлено розбіжність”;
- реалізована функція “повторного тесту без звіту” — дозволяє працівнику перевірити себе без наслідків;
- всі повідомлення мають іконки-емоції, що допомагає емоційній стабілізації.

4.2 Електробезпека технологічного процесу

Системи автоматизованого контролю якості, які використовують електричні сигнали, мають потенційно небезпечні ділянки, пов'язані з електроживленням, комутацією, контактами високої щільності. Електробезпека в такому середовищі є пріоритетом, оскільки навіть низьковольтне обладнання може спричинити ураження струмом у разі порушення ізоляції, відсутності заземлення або помилок під час монтажу.

Основні джерела електробезпеки в межах реалізованої системи:

- PLC (програмований логічний контролер) з живленням 24 В постійного струму;
- релейна матриця, яка комутує сигнали;
- підключення до джгутів із відкритими контактами;
- живлення пристроїв через імпульсні блоки живлення.

Попри те, що напруга 24 В вважається умовно безпечною, у разі неправильного підключення, порушення ізоляції, несправності ПЗ чи КЗ — можливі ураження та вихід обладнання з ладу. Саме тому проектування системи здійснювалося з урахуванням електробезпеки як на апаратному, так і на програмному рівнях.

На рівні апаратного забезпечення у системі реалізовано такі інженерні рішення:

- гальванічна розв'язка між PLC та релейною матрицею через оптопари;
- захисне заземлення корпусу стенду відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1;
- автоматичні вимикачі з УЗО на ввідній лінії;
- ізоляційні кожухи на всіх релейних блоках;
- позначення усіх клем із заборонаю ручного доступу до під напругою частин;
- заборона запуску тесту без верифікації ID джгута;
- додатковий захист через запобіжники з характеристиками типу gG (загального застосування).

Кожен елемент електричної схеми тестера перевірено на відповідність класу захисту IP20 або вище. Плата живлення має окрему лінію захисного контуру та незалежне автоматичне відключення при перевантаженні або перевищенні напруги.

Також реалізовані заходи щодо механічного захисту клем — кожна лінія ізольована, а робоча зона має прозоре захисне огородження з полікарбонату, що дозволяє контролювати стан без прямого контакту з елементами.

На додаток до технічних засобів, реалізовано комплекс організаційних рішень:

- всі працівники проходять інструктаж з електробезпеки з фіксацією в журналі;
- оператор не допускається до роботи без посвідчення про II групу електробезпеки;
- використано кольорове маркування всіх проводів згідно з ДСТУ ІЕС 60445;
- розроблено інструкції з безпечної експлуатації, які закріплені безпосередньо на корпусі установки;
- усі аварійні зупинки та переривання подачі живлення продубльовані фізичними кнопками STOP із захистом від випадкового натискання;
- проводиться щомісячна перевірка опору ізоляції, перевірка заземлення, огляд стану розеток і кабелів;
- організовано пожежний інструктаж для осіб, що працюють з електрообладнанням.

Крім того, система має журнали експлуатації з контролем всіх інтервенцій, ведеться звітність про події перевантаження або аварійного відключення.

Для оцінки рівня безпеки використано методику кількісного аналізу електричного ризику, яка враховує:

- ймовірність контакту з напругою;
- тривалість впливу струму;
- шлях проходження через тіло;
- стан робочого середовища (вологість, температура, пил);
- людський фактор (втома, неухважність, порушення інструкцій).

Згідно з цими критеріями, найбільшу небезпеку становить контакт з обірваними або неправильно вставленими провідниками, особливо в умовах вологості понад 80%. Також ураховується можливість випадкового дотику до пошкоджених клем при відсутності огороження.

Ймовірність нещасного випадку класифікується як "низька", за умови дотримання регламенту. Потенційно небезпечні сценарії нейтралізуються:

- автоматичним вимкненням живлення при виявленні короткого замикання;
- наявністю світлових індикаторів напруги;
- дублюванням функцій STOP у ПЗ і на апаратному рівні;
- блокуванням запуску при відкритій кришці або порушенні конфігурації.

Тестова зона належить до приміщень без підвищеної небезпеки, відповідно до правил улаштування електроустановок України. Це обумовлено відсутністю постійної вологості, високої температури, струмопровідного пилу або хімічно активних середовищ.

Однак, за рекомендаціями інженерної служби підприємства, система спроектована з урахуванням резервного захисту на рівні, який перевищує вимоги:

- всі лінії обладнані УЗО із струмом спрацювання не більше 30 мА;
- корпус має подвійне заземлення;
- панелі керування розміщено на висоті 1,2 м, недоступній для випадкового дотику дітьми чи сторонніми особами.

Аналіз архівних інцидентів на підприємствах електровимірювального профілю показує, що 80% травм пов'язані з:

- порушенням інструкції (наприклад, тестування при відкритій панелі);
- відсутністю блокування напруги при аварії;
- експлуатацією несправних або саморобних кабелів;
- втомою оператора (людський фактор).

Для попередження подібних випадків система має:

- автоматичне виведення повідомлення при перевищенні робочого часу без перерв;
- електронний контроль цілісності з'єднань;
- облік підключень за кодом користувача;
- «м'який старт» живлення — без стрибків напруги.

Для підвищення рівня безпеки у майбутньому можливо впровадити:

- систему безконтактного сканування джгута з автоматичним підтвердженням типу;
- візуальні проєкції зони з високою напругою;
- інтеграцію з мобільним додатком для дистанційної перевірки стану ізоляції;
- використання AI-аналізу частоти помилок, щоб виявляти ризик людського фактора.

Загальна система заходів охоплює всі рівні — від проектування до експлуатації та контролю, і забезпечує стабільну безпечну роботу в умовах цехового виробництва.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було створено автоматизовану систему перевірки кабельних джгутів на базі ESP32, що використовує матричний метод тестування з'єднань. Реалізоване рішення забезпечує недороге та швидке тестування кабельних джгутів малих та експериментальних патій.

У першому розділі було проаналізовано використовуванні підходи та методики перевірки кабельних джгутів. Одержані результати дозволили обґрунтувати необхідність розробки автоматизованої системи перевірки кабельних джгутів малих та експериментальних патій на базі ESP32.

У другому розділі було детально розглянуто технічні аспекти побудови автоматизованої системи перевірки кабельних джгутів на базі ESP32. Надано обґрунтування вибору основних елементів, таких як мікроконтролер на базі ESP32, мультиплексор типу 74HC4067, резисторів підтягування та OLED дисплей. Також представлено схему підключення та описано принцип дії системи.

У третьому розділі описано структуру та функціональні блоки автоматизованої системи перевірки кабельних джгутів. Подано етапи роботи автоматизованої системи з використанням еталонної системи з'єднань. Графічний інтерфейс забезпечує зрозуміле керування та контроль стану пристрою. Програмна частина автоматизованої системи на базі ESP32 реалізована у середовищі Arduino IDE з використанням мов програмування C++ та бібліотек для роботи з периферійними пристроями.

Створена система повністю реалізує поставлені цілі проєкту - розроблення автоматизованої системи перевірки якості готової продукції на ТОВ «СЕ Борднетце-Україна». Вона відповідає сучасним вимогам до систем перевірки якості кабельних джгутів та є перспективною для розширення її до системи контролю з обліком кожного джгута в хмарному сховищі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cirris Systems Corporation. <https://www.cirris.com/>
2. Komax Group – Solutions for Wire Processing. <https://www.komaxgroup.com/>
3. Schleuniger AG – Wire Processing Machines. <https://www.schleuniger.com/>
4. CAMI Research Inc. – CableEye Testing Systems.
5. Broughton, R. J. Testing Electrical Cables and Harnesses: A Practical Guide. McGraw-Hill, 2019.
6. Sun, Y., & Duan, J. (2022). "Development of Intelligent Wire Harness Detection System Based on Machine Vision and AI." Journal of Industrial Automation, vol. 28(3), pp. 45–53.
7. Макаренко А.Ю. Системи технічного контролю: основи проєктування. — Київ: Наука, 2020.
8. Захарченко В.М., Козак О.С. Контроль і діагностика електронного устаткування. — Харків: Техніка, 2021.
9. ДСТУ EN 50614:2020. "Технічна документація на кабельні збірки. Вимоги до випробувань".
10. Arduino Project Hub. <https://create.arduino.cc/projecthub>
11. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
12. Bradski, G. & Kaehler, A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. — O'Reilly Media, 2017.
13. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
14. Arduino Project Hub. Using 74HC4067 16-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mux74hc4067/>

15. Adafruit Learning System. SSD1306 OLED Display Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://learn.adafruit.com/monochrome-oled-breakouts/arduino-library-and-examples>
16. Бабенко С.О., Клименко А.І. Автоматизовані системи керування: підручник. – К.: Каравела, 2019. – 312 с.
17. Ткаченко В.П., Титаренко І.І. Мікроконтролери в системах автоматизації. – Київ: НТУУ "КПІ", 2020. – 254 с.
18. Cirris Systems Corp. Cable Testing Basics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cirris.com/learning-center/cable-testing-basics>
19. Schleuniger AG. Wire Processing and Testing Equipment [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.schleuniger.com>
20. OpenCV Documentation. Image Processing with Python and OpenCV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.opencv.org>
21. O'Brien D. ESP32 Microcontroller Projects. – Elektor International Media, 2020. – 180 p.
22. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. – International Organization for Standardization, 2015.
23. GitHub Community. ESP32 and Arduino Projects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/espressif/arduino-esp32>
24. Гаврилюк В. М., Козак О. Б. Мікроконтролери Arduino в системах автоматизації. — Львів: Видавництво ЛНУ, 2020. — 192 с.
25. Столяров В. Д. Основи проектування електронних пристроїв на мікроконтролерах. — Київ: Наукова думка, 2018. — 224 с.
26. Панькевич І. В. Основи схемотехніки. Частина 2: Цифрові пристрої. — Харків: НТУ «ХПІ», 2019. — 136 с.
27. Datasheet 74HC4067 — 16-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>
28. Arduino Mega 2560 — офіційна документація. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>
29. ESP32 Technical Reference Manual. [Електронний ресурс]. — Режим доступу:

- https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
30. Cirris Systems. Cable Harness Testers Overview. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.cirris.com/products/cable-testers/>
 31. Komax Group — Wire Processing Equipment. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.komaxgroup.com>
 32. CAMI Research Inc. CableEye Test Systems. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.camiresearch.com/>
 33. Міжнародний стандарт IPC/WHMA-A-620D. Вимоги до електричних кабельних і джгутових збірок, 2022. — 386 с.
 34. ДСТУ ISO 6385:2019. Принципи ергономічного проектування робочих систем. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
 35. ДСТУ EN 527-1:2004. Меблі офісні. Робочі столи. Розміри. — К.: Держспоживстандарт України, 2005.
 36. EN 894-2:2008. Безпечність машин – Вимоги до ергономіки дисплеїв і органів керування.
 37. ISO 9241-5:1998. Ергономіка систем взаємодії людина-машина. Вимоги до робочого місця користувача.
 38. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до відеодисплейних терміналів, персональних ЕОМ і організації праці операторів.
 39. OSHA Technical Manual – Ergonomics: Principles and Guidelines. — Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor.
 40. EU-OSHA. Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. — European Agency for Safety and Health at Work, 2022.
 41. ДСТУ ІЕС 60445:2009. Промислова автоматика. Основи ідентифікації провідників за кольорами.
 42. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги.
 43. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

44. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Міністерство енергетики України, чинна редакція.
45. REBA/RULA Assessment Tools – Rapid Entire Body Assessment / Rapid Upper Limb Assessment. – HSE UK Guidelines.
46. Siemens AG. KTP700 Basic HMI Panel – Technical Specification Manual. – Siemens, 2021.
47. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use.