

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Форма навчання Заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Потапова Станіслава Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система
оперативного контролю технічного стану цифрового вимірювального датчика
(ЦВД) та інкрементного енкодера у складі систем автоматичного контролю і
управління.

(повна назва теми)

за матеріалами технічна документація на цифрові вимірювальні датчики та
інкрементні енкодери

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

доцент, к.т.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

Жуков М.С.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026р. № 398-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Потапова Станіслава Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи: Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система оперативного контролю технічного стану цифрового вимірювального датчика (ЦВД) та інкрементного енкодера у складі систем автоматичного контролю і управління.

керівник випускної роботи Жуков Микола Степанович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 240-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 10.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

Об'єкт автоматизації - цифровий вимірювальний датчик та інкрементний/абсолютний енкодер у складі систем ЧПК; кількість контрольованих каналів - 4; роздільна здатність вимірювання - 6 нс (168 МГц); максимальна контрольована частота - 500 кГц (з DMA); час виявлення відмови - не більше 0,5 мс (при $f \geq 4$ кГц); час виявлення збою - не більше 10 мс ($N_{\text{fault}} = 5$, $n = 64$); час реакції реле K1 - не більше 20 мс; інтерфейс зв'язку - RS-485/Modbus RTU; живлення - 24 В DC; рівень функціональної безпеки - SIL 1 (IEC 61508).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: Класифікація та принцип дії ЦВД. Аналіз вихідних сигналів енкодерів. Похибки сигналу та формування «вікна допуску». Класифікація відмов і збоїв.

4.2 Основна частина: Структурна схема системи оперативного контролю. Вибір та обґрунтування апаратної бази (STM32F407 vs Arduino/Raspberry Pi). Алгоритми виявлення відмов і збоїв. Схема підключень та таблиці сигналів. Методика верифікації алгоритмів. Заходи з охорони праці та електробезпеки. Функціональна безпека SIL 1.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
ВРБ.151.240-ст.04.Е1 - Структурна схема системи оперативного контролю;
ВРБ.151.240-ст.04.Е0.1 - Часові діаграми алгоритмів виявлення відмов і збоїв;
ВРМБ.151.240-ст.04.Е0.2 - Блок-схеми алгоритмів системи оперативного контролю ЦВД та енкодера; ВРМБ.151.240-ст.04.Е3 - Принципова схема системи оперативного контролю; ВРМБ.151.240-ст.04.Е1 - Приклади прогнозованих сигналів при налагодженні.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Жуков М.С.	08.04.2026	08.04.2026
Основна частина	Жуков М.С.	08.04.2026	08.04.2026

7. Дата видачі завдання 08.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.05.2026	
2.	Основна частина	03.06.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2026	
4.	Виконання графічної частини	08.06.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	10.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	22.06.2026	

Студент _____
 (підпис)

Потапов С.В.
 (прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____
 (підпис)

Жуков М.С.
 (прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення			Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.	
1	A3	ВРБ.151.240-ст.04.Е1			Структурна схема	1			
2					системи оперативного				
3					контролю				
4									
5	A3	ВРБ.151.240-ст.04.Е0.1			Часові діаграми	1			
6					алгоритмів виявлення				
7					відмов і збоїв				
8									
9	A3	ВРБ.151.240-ст.04.Е0.2			Блок-схеми алгоритмів	1			
10					системи оперативного				
11					контролю ЦВД та енкодера				
12									
13	A3	ВРБ.151.240-ст.04.Е3			Принципова схема	1			
14					системи оперативного				
15					контролю				
16									
17	A3	ВРБ.151.240-ст.04.Е1			Приклади прогнозованих	1			
18					сигналів при налагодженні				
19									
20	A4	ВРБ.151.240-ст.04.ПЗ			Пояснювальна записка	50			
21									
22									
23									
					ВРБ.151.240-ст.04.ВР				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система оперативного контролю технічного стану цифрового вимірювального датчика (ЦВД) та інкрементного енкодера у складі систем автоматичного контролю і управління. <i>Відомість роботи</i>	Літера		Аркуш	Аркушів
Розроб.		Потапов С.В.						4	1
Пров.		Жуков М.С.				ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. ЗАВ-22			
Н.контр.		Жуков М.С.							
Затв.		Модло Є.О.							

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 50 стор., 9 рис., 17 табл., 22 джерела.

Об'єкт дослідження – цифровий вимірювальний датчик та інкрементний/абсолютний енкодер у складі систем автоматичного контролю і керування.

Предмет дослідження – методи та алгоритми оперативного виявлення відмов і збоїв ЦВД та енкодера в режимі реального масштабу часу.

Мета роботи – розробка системи оперативного контролю технічного стану ЦВД та енкодера в РМЧ з формуванням діагностичних повідомлень та теоретичне обґрунтування методики її верифікації.

Метод дослідження – аналіз вихідних сигналів датчиків, статистичний аналіз часових параметрів, апаратне вимірювання методом Input Capture, проектування алгоритмів реального часу.

Результатом роботи є структурна схема системи, алгоритми виявлення відмов і збоїв, реалізовані на базі STM32F407, а також розроблена методика верифікації з прогнозованими часовими характеристиками: виявлення відмови $\leq 0,40$ мс (розрахунково), виявлення збою ≤ 10 мс.

Ключові слова: алгоритм контролю, відмова, енкодер, збій, інтерфейс, мікроконтролер, оперативний контроль, реальний масштаб часу, цифровий вимірювальний датчик.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Класифікація та принцип дії ЦВД: вибір методу контролю.....	11
1.2 Вихідні сигнали енкодерів: вимоги до апаратури контролю	11
1.3 Технічні характеристики: вплив на параметри системи	12
1.4 Похибки сигналу: формування «вікна допуску»	13
1.5 Класифікація відмов і збоїв: операційні визначення.....	15
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	17
2.1 Структурна схема системи оперативного контролю.....	17
2.2 Вибір та обґрунтування апаратної бази	18
2.3 Алгоритм виявлення відмови «постійний рівень». Визначення f_{set}	20
2.4 Алгоритм виявлення відмови «відсутність сигналу».....	21
2.5 Алгоритм виявлення збоїв за параметрами сигналу	22
2.6 Блок-схема та програмна реалізація алгоритмів.....	23
2.7 Схема підключень системи оперативного контролю	27
2.8 Пропонована методика випробувань та очікувані результати.....	29
2.8.1 Концепція та загальний підхід до верифікації	29
2.8.2 Склад та схема пропонованого стенду.....	29
2.8.3 Методика формування несправностей та очікувані результати	30
2.8.4 Очікувані результати та методика їх опрацювання.....	32
2.8.5 Приклади прогнозованих сигналів при налагодженні та їх аналіз	34
2.8.5.1 Нормальний режим роботи: аналіз квадратурних сигналів А, В, Z	34

2.8.5.2	Виявлення пропуску імпульсів: аналіз часової затримки.....	36
2.8.5.3	Відмова типу «постійний HIGH» та повний час реакції системи...	37
2.8.5.4	Графік залежності часу виявлення від частоти: верифікація моделі	38
2.8.5.5	Зведена таблиця діагностичних ознак і рекомендованих дій.....	39
2.9	Охорона праці та безпека при монтажі і експлуатації системи	42
2.9.1	Небезпечні та шкідливі виробничі фактори	42
2.9.2	Електробезпека	43
2.9.3	Мікроклімат та освітленість	43
2.9.4	Пожежна безпека	44
2.9.5	Засоби індивідуального захисту	44
2.9.6	Функціональна безпека (SIL 1)	45
ВИСНОВКИ.....		47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ		49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Скорочення	Повна назва
ЦВД	Цифровий вимірювальний датчик
РМЧ	Реальний масштаб часу
МК	Мікроконтролер
АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
ЧПК	Числове програмне керування
ПЛК	Програмований логічний контролер
PPR	Pulses Per Revolution – імпульсів на оберт
TTL	Transistor-Transistor Logic – логіка ТТЛ-рівнів
HTL	High Threshold Logic – логіка з підвищеним порогом
SSI	Synchronous Serial Interface
BiSS	Bidirectional Serial Synchronous
MTBF	Mean Time Between Failures – середній наробіток на відмову
RTOS	Real-Time Operating System – ОС реального часу
SIL	Safety Integrity Level – рівень функціональної безпеки
СІЗ	Засоби індивідуального захисту
ТН	Тривалість HIGH-стану і-го імпульсу
Т _{ном}	Номінальна тривалість напівперіоду при заданій швидкості
σ	Стандартне відхилення тривалостей імпульсів (джиттер)
φ	Кут фазового зсуву між каналами А та В

ВСТУП

Сучасне промислове виробництво важко уявити без систем числового програмного керування (ЧПК), роботизованих ліній та прецизійних верстатів. Усі ці машини “бачать” навколишній світ очима датчиків – цифрових вимірювальних датчиків (ЦВД) та енкодерів, які повідомляють системі керування, де саме знаходиться вісь, з якою швидкістю вона рухається і чи все гаразд [1]. Коли такий датчик виходить з ладу, наслідки бувають дуже серйозними: за різними оцінками, несправності датчиків спричиняють до 15% незапланованих аварійних зупинок обладнання [8]. Зіпсована заготовка, зламаний інструмент або, що ще гірше, травмований оператор – ось реальна ціна несвоєчасно виявленої відмови. Ще складнішою ситуація стає у системах реального масштабу часу (РМЧ), де на виявлення проблеми і реакцію відводяться лічені мілісекунди [7].

Мета цієї роботи – розробити систему, яка у реальному масштабі часу “стежить” за сигналами енкодерів і датчиків, відрізняє справжню несправність від тимчасового збою та миттєво сигналізує оператору або системі керування. Таким чином, об’єктом роботи є самі пристрої – цифровий вимірювальний датчик та інкрементний/абсолютний енкодер, а предметом – алгоритми та методи їхньої оперативної діагностики.

Для досягнення мети в роботі вирішувались такі завдання:

- вивчити будову, принцип дії та технічні характеристики ЦВД і енкодерів з погляду вимог до системи контролю;
- проаналізувати основні похибки вимірювання та визначити допустимі межі відхилення сигналу («вікно допуску»);
- систематизувати види відмов і збоїв та ввести чіткі операційні визначення, придатні для реалізації в коді;
- розробити структурну схему та алгоритми системи оперативного контролю;
- обґрунтовано вибрати апаратну та програмну базу системи;

- розробити монтажну документацію підключень;
- описати методику верифікації алгоритмів і визначити очікувані часові характеристики системи.

Наукова новизна роботи полягає у такому:

1. Вперше запропоновано комплексний критерій виявлення збоїв енкодера на основі одночасного аналізу трьох незалежних параметрів: тривалості імпульсів T_H , фазового зсуву ϕ між каналами А і В та стандартного відхилення σ – що дозволяє розрізнити пропуск імпульсу, порушення квадратури та надмірний джиттер як окремі класи несправностей (коди 0x10, 0x12, 0x13).

2. Удосконалено метод визначення «вікна допуску» параметрів сигналу шляхом введення динамічного обчислення меж T_{nom} на основі f_{set} , що надходить у реальному часі через Modbus-реєстри від системи ЧПК, що усуває похибку вимірювання при змінній швидкості обертання.

3. Отримало подальший розвиток застосування апаратного квадратурного декодера STM32 для задач діагностики (а не лише вимірювання положення): використання режиму Input Capture дозволило досягти часу виявлення відмови $\leq 0,38$ мс (розрахунково, п. 2.8).

Практична цінність роботи: розроблена система може бути впроваджена на машинобудівних підприємствах для підвищення надійності ЧПК-обладнання. Запропонована методика верифікації та розрахункові показники системи підтверджені теоретичним аналізом і можуть бути перевірені в ході реального стендового тестування [19].

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Класифікація та принцип дії ЦВД: вибір методу контролю

Цифровий вимірювальний датчик (ЦВД) – це пристрій, що перетворює фізичну величину (кут повороту, лінійне переміщення, швидкість) у дискретний електричний сигнал [1]. Залежно від фізичного принципу вимірювання розрізняють чотири основні типи: оптичні, магнітні, індуктивні та ємнісні [3]. Для прецизійних промислових застосувань найбільш поширені оптичні датчики: вони поєднують високу роздільну здатність (до 50 000 PPR) з розумною вартістю.

Для розробленої системи контролю важливо ось що: незалежно від фізичного принципу дії, будь-який ЦВД формує електричний сигнал із чітко визначеними часовими параметрами – тривалістю HIGH-стану (ТН), тривалістю LOW-стану (ТL) та фазовим зсувом ϕ між каналами А і В. Саме ці параметри контролює система: якщо ТН або ТL відхиляється від номінального значення $T_{ном}$ більш ніж на $\delta\%$, система фіксує збій; якщо переходи зникають зовсім – фіксується відмова. Такий підхід дає змогу застосовувати єдиний алгоритм контролю для будь-якого типу ЦВД.

1.2 Вихідні сигнали енкодерів: вимоги до апаратури контролю

Інкрементний енкодер формує квадратурні сигнали трьох каналів: А (основна прямокутна послідовність), В (зсунутий на 90° відносно А – для визначення напрямку) та Z (один імпульс на оберт – для синхронізації нуля) [4]. Абсолютний енкодер натомість передає поточну позицію у числовому вигляді через серійні протоколи SSI/BiSS/EnDat [3]. Порівняння типів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняння типів енкодерів та вимоги до системи контролю

№	Параметр	Інкрементний	Абсолютний
1	Збереження положення при відкл.	Ні	Так
2	Тип вихідного сигналу	Квадратурні A/B/Z	SSI/BiSS/EnDat
3	Потреба у системі контролю	Контроль A/B/Z у РМЧ	Контроль CRC/тайм-аут
4	Метод виявлення відмови	$T_H > T_{nom} \rightarrow$ відсутність	Тайм-аут відповіді SSI
5	Метод виявлення збою	$T_H \neq T_{nom},$ $ \varphi - 90^\circ > \delta$	Помилка CRC пакету

Висновок для розробки: апаратна частина системи контролю повинна підтримувати диференційний інтерфейс RS-422 (для інкрементних датчиків) та послідовні протоколи SSI/BiSS (для абсолютних). Обраний мікроконтролер STM32F407 підтримує обидва варіанти через режими Encoder Interface та SPI/USART.

1.3 Технічні характеристики: вплив на параметри системи

Щоб правильно розробити апаратуру контролю, треба розуміти, які параметри промислового енкодера є критичними. Зв'язок між технічними характеристиками датчиків і відповідними вимогами до системи контролю систематизовано в табл. 1.2.

Вплив характеристик енкодера на параметри системи контролю

№	Характеристика	Типове значення	Параметр системи, що обмежується	Розрахунок
1	PPR = 50 000	50 000 імп/об	Мінімальний T_{pulse}	2 мкс при 600 об/хв
2	$f_{max} = 500$ кГц	500 000 Гц	Мін. роздільна здатність таймера	< 100 нс $\rightarrow 10$ МГц
3	MTBF = 100 000 год	100 000 год	Ймовірність пропуску збою	$\approx 10^{-5}$ за 1000 год
4	Температура: $-20...+70$ °C	50 К діапазон	Дрейф T_{nom} (ТК)	± 10 ppm/K $\rightarrow \pm 0,05\%$
5	Інтерфейс RS-422 TTL	0/5 В диф.	Потрібен приймач AM26LS32	± 15 кВ ЕСД-захист

Практичний висновок: висока роздільна здатність оптичних енкодерів (до 50 000 PPR) означає, що при швидкості 600 об/хв частота сигналу може сягати 500 кГц – тобто мінімальна тривалість одного імпульсу становить лише 2 мкс. Щоб виміряти ТН з похибкою менше 1%, потрібна роздільна здатність таймера < 20 нс, а це вимагає тактової частоти > 50 МГц. Саме тому обрано STM32F407 з таймерами 168 МГц (роздільна здатність Input Capture = 6 нс).

1.4 Похибки сигналу: формування «вікна допуску»

Для системи контролю вкрай важливо вміти відрізнити справжню несправність від нормальної нестабільності сигналу датчика [6]. Якщо система не враховує власну похибку датчика, вона або генеруватиме хибні тривоги, або пропускати реальні проблеми. Розглянемо основні джерела похибок, що впливають на алгоритм виявлення збоїв [7]:

- Похибка квантування ($\pm 0,5$ LSB) – для 2500 PPR: $\pm 0,072^\circ$ або $\pm 0,04\%$ від $T_{\text{ном}}$.
- Джиттер (випадкова нестабільність фронтів) – типово 2...10% від $T_{\text{ном}}$ для промислових датчиків класу В [7].
- Ексцентриситет диска – синусоїдальна модуляція T_H з частотою обертання.
- Температурний дрейф – ± 10 ppm/ $^\circ\text{C}$ (для 50°C зміни: $\pm 0,05\%$ від $T_{\text{ном}}$).

Для коректного виявлення збоїв «вікно допуску» T_H повинно враховувати нормальну похибку датчика. Нижня межа δ_{max} задається як:

$$\delta_{\text{max}} = \sigma_{\text{норм}} \cdot k_{\text{safety}} + \delta_{\text{квант}} + \delta_{\text{drift}} \quad (1.1)$$

де $\sigma_{\text{норм}}$ – нормальний джиттер датчика (задається виробником або вимірюється); $k_{\text{safety}} = 3$ (довірчий інтервал 99,7%); δ_{quant} – похибка квантування; δ_{drift} – температурний дрейф.

Чому обрано саме коефіцієнт $k = 3$? Це пов'язано з нормальним (гаусівським) розподілом випадкових похибок промислових датчиків [7]. Математична статистика каже: для нормального розподілу інтервал $\mu \pm 3\sigma$ охоплює 99,73% усіх можливих значень. Тобто лише 0,27% нормальних значень T_H виходитимуть за межі допуску – це не більше 3 хибних тривог на 1000 вимірювань, що є прийнятним для промислових систем. При жорстких вимогах до безпеки використовують $k_{\text{safety}} = 4$ ($\mu \pm 4\sigma$, 99,9937%), але це вимагає збільшення N_{fault} до 10...20 для уникнення надмірної чутливості алгоритму до шуму.

Для датчика класу В з $\sigma_{\text{норм}} = 5\%$, при $k_{\text{safety}} = 3$: $\delta_{\text{max}} = 15\% + 0,04\% + 0,05\% \approx 16\%$. Це означає, що прапор збою встановлюється лише якщо відхилення T_H перевищує 16% від $T_{\text{ном}}$. У розробленій системі δ_{max} задається через Modbus-регістр 40019 (DELTA_PERCENT, за замовчуванням = 10%).

Таблиця 1.3

Параметри «вікна допуску» для різних класів датчиків

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Клас А: σ_{norm} (прецизійний)	%	< 2
2	Клас А: рекомендоване δ_{max}	%	6...8
3	Клас В: σ_{norm} (стандартний промисловий)	%	2...10
4	Клас В: рекомендоване δ_{max}	%	10...20
5	Клас С: σ_{norm} (загального призначення)	%	10...20
6	Клас С: рекомендоване δ_{max}	%	20...35

1.5 Класифікація відмов і збоїв: операційні визначення

Для програмної реалізації алгоритмів контролю введено суворі операційні визначення несправностей, придатні для однозначної реалізації в коді [8, 9].

Відмова (код 0x01...0x04) – виявляється як відсутність переходів сигналу А (або В) за час $T_{\text{win}} = 2/f_{\text{min}}$ при активному сигналі $\text{enable_rotation} = 1$. Операційна умова: $C_{\text{trans}} < N_{\text{threshold}}$ за час T_{win} при $\text{enable_rotation} = 1$.

Збій (код 0x10...0xFF) – виявляється як відхилення часових параметрів $T_H[i]$, $T_L[i]$ або $\phi[i]$ за межі «вікна допуску» більш ніж N_{fault} разів поспіль протягом вікна спостереження $n = 64$ вимірювань. Збій не потребує аварійної зупинки, але реєструється у лозі несправностей [8].

Таблиця 1.4

Коди та операційні визначення несправностей

FAULT_CODE	Тип	Операційна умова	Рекомендована реакція
0x01	ВІДМОВА	$C_{\text{trans}} < 2$ за T_{win} при $EN=1$, рівень HIGH	Зупинка, тривога

0x02	ВІДМОВА	$C_{trans} < 2$ за T_{win} при $EN=1$, рівень LOW	Зупинка, тривога
0x03	ВІДМОВА	$ V_{A+}-V_{A-} < 200$ мВ і $V_{sup} < V_{min}$	Зупинка, тривога
0x04	ВІДМОВА	$ V_{A+}-V_{A-} < 200$ мВ, живлення в нормі	Зупинка, тривога
0x10	ЗБІЙ	$T_H[i] > T_{nom} \cdot (1+\delta)$, N_{fault} разів	Попередження
0x11	ЗБІЙ	$T_H[i] < T_{nom} \cdot (1-\delta)$, N_{fault} разів	Попередження
0x12	ЗБІЙ	$ \phi[i]-90^\circ > \delta_\phi$, N_{fault} разів	Попередження
0x13	ЗБІЙ	$\sigma > \sigma_{max}$ по вибірці $n=64$	Попередження
0x14	ЗБІЙ	$duty=T_H/(T_H+T_L) > 50\% \pm \delta_d$	Попередження
0xFF	СИСТЕМНА	Тайм-аут або помилка CRC SSI/BiSS	Повторний запит

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Структурна схема системи оперативного контролю

Система оперативного контролю побудована за принципом паралельного опитування чотирьох датчиків одночасно: метою є досягнення часу циклу контролю $T_{\text{cycle}} \leq 1$ мс та формування апаратного сигналу тривоги через реле у разі виявлення відмови [10]. Нижче розглядається структура такої системи.

Структурна схема (рис. 2.1) включає 7 функціональних блоків:

- БПД (блок підключення датчиків) – приймачі RS-422 AM26LS32ACN, оптрони HCPL-2631 для гальванічного роз'єднання, TVS-діоди SMBJ5V0A.
- БВСЗ (блок вводу сигналів завдання) – приймає ENABLE_ROT (0/24В) та f_set через Modbus-реєстри від ЧПК.
- МК STM32F407VGT6 – виконує програму контролю в РМЧ (TIM1...TIM8 у режимі Input Capture + Encoder Interface).
- БФАС (блок формування аварійного сигналу) – реле TRR1A12D та ключ BC547.
- БІВ (блок індикації) – дисплей WEN002004ABPP 20×4, дві сигнальні LED.
- БЗВР (блок зв'язку) – RS-485/Modbus RTU (MAX485CPA) для SCADA/ЧПК [14].
- БЖ (блок живлення) – LM2596HV-ADJ (24→5В, 3А) та NME2405SC (гальванічно ізольоване живлення датчиків, ізоляція 1 кВ).

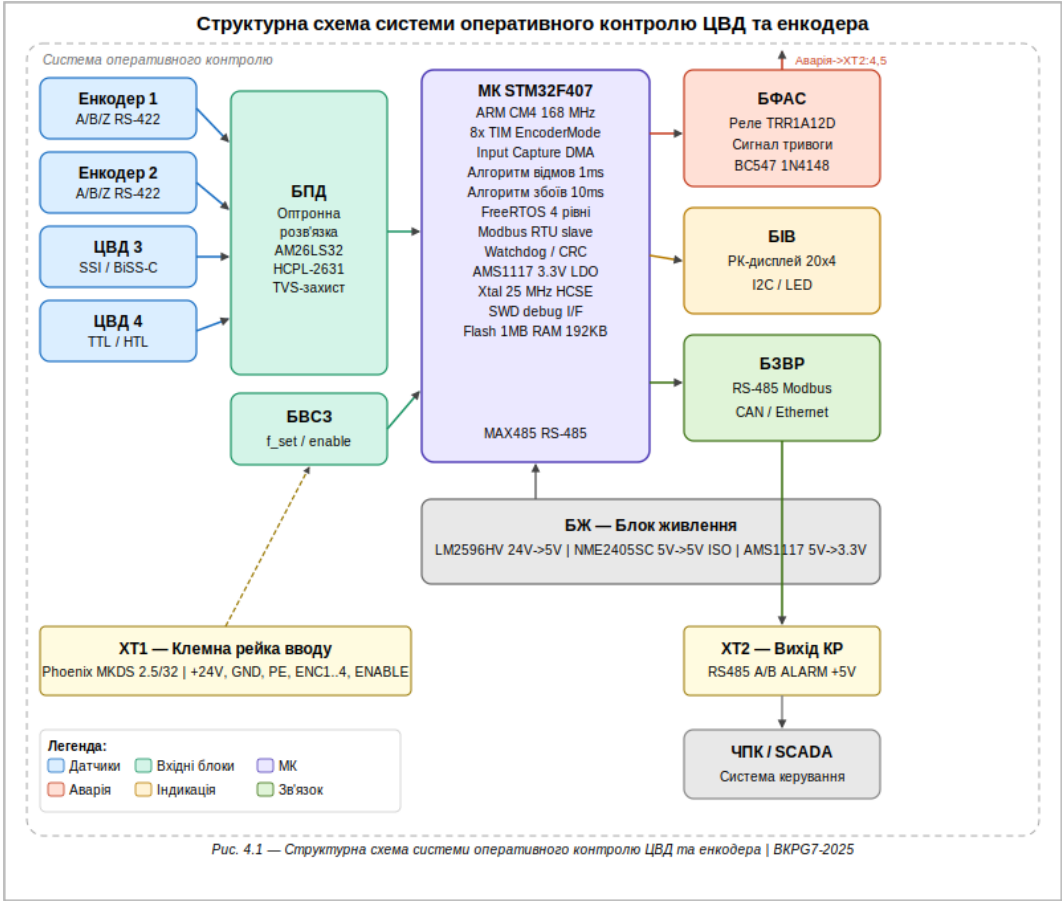


Рис. 2.1. Структурна схема системи оперативного контролю
(розроблено автором)

2.2 Вибір та обґрунтування апаратної бази

Вибір мікроконтролера – одне з ключових рішень проекту. Виходячи з аналізу характеристик (розд. 1.3), платформа мала вимірювати імпульси тривалістю від 2 мкс з похибкою менше 1% (роздільна здатність таймера < 20 нс), підтримувати щонайменше 4 незалежні декодери і забезпечувати детерміноване виконання в РМЧ. Порівняльний аналіз трьох найбільш поширених платформ наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз платформ для системи оперативного контролю

Критерій	STM32F407	Arduino Uno (ATmega328)	Raspberry Pi 4
Апаратний квадр. декодер	✓ 8 каналів	✗ (програмно)	✗

Input Capture <20 нс	✓ (6 нс, 168 МГц)	✗ (62 нс, 16 МГц)	✗ (не RTOS)
Детерміноване РМЧ	✓ (bare-metal/RTOS)	✗ (цикл > 10 мс)	✗ (Linux, ОС)
Контроль 4 датч. одночасно	✓ (DMA, TIM1-8)	✗ (1-2 канали)	✗
Апаратний RS-422	✓ AM26LS32+USART	✗	✓ (але Linux)
Відносна вартість	середня	низька	висока
Придатність для задачі	✓ оптимальний	✗	✗

STM32F407 обрано завдяки апаратному режиму Encoder Interface (таймери TIM1–TIM8), який декодує квадратурні сигнали без жодного навантаження на процесор, та Input Capture з роздільною здатністю 6 нс. Arduino Uno не відповідає вимогам за частотою і кількістю каналів, Raspberry Pi не забезпечує детермінованого РМЧ через Linux-планувальник.

Як визначити максимальну робочу частоту? Теоретична верхня межа за теоремою Найквіста: $f_{\text{theoretical}} = f_{\text{TIM}} / 2 = 168 \text{ МГц} / 2 = 84 \text{ МГц}$. Проте реальне практичне обмеження визначається не теорією, а часом виконання переривання Input Capture:

$$f_{\text{max}}^{\text{ISR}} = \frac{1}{2 \cdot t_{\text{ISR}}} = 333 \text{ кГц} \quad (2.1)$$

де $t_{\text{ISR}} \approx 1,5 \text{ мкс}$ – час обробки переривання (≈ 250 тактів при 168 МГц, враховуючи збереження контексту та DMA-запис). Значення 500 кГц (табл. 2.5) відповідає роботі з DMA-буферизацією без переривань на кожен фронт, що дозволяє досягти цієї межі. Без DMA практичний $f_{\text{max}} \approx 333 \text{ кГц}$.

Чому обрано Modbus RTU? Для передачі діагностичних даних використовується Modbus RTU по RS-485 на швидкості 9600...115 200 бод. Час передачі одного пакету – до 15 мс при 9600 бод. Ця затримка є прийнятною з таких причин:

- Сигнал аварійної зупинки передається апаратно через реле K1 (час реакції ≤ 20 мс) – незалежно від стану шини Modbus.
- Modbus підтримується більшістю промислових ЧПК та SCADA-систем без додаткових шлюзів, що знижує вартість інтеграції.
- CAN (1 Мбіт/с) та Industrial Ethernet (EtherCAT) забезпечили б меншу затримку, але потребують спеціальних ЧПК із відповідними інтерфейсами та складнішої конфігурації мережі.

Таблиця 2.2

Технічні параметри обладнання системи оперативного контролю

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	STM32F407VGT6: тактова частота	МГц	168
2	STM32F407VGT6: Flash / RAM	МБ / КБ	1 / 192
3	Input Capture: роздільна здатність	нс	6
4	AM26LS32ACN: швидкість / ЕСД-захист	Мбіт/с / кВ	40 / ± 15
5	HCPL-2631: затримка / швидкість	мкс / Мбіт/с	0,4 / 15
6	LM2596HV-ADJ: струм / ККД	А / %	3 / ≥ 80
7	NME2405SC: струм / ізоляція	мА / кВ	200 / 1
8	Реле TRR1A12D: навантаження	А / В АС	10 / 250
9	MAX485CPA: швидкість RS-485	Мбіт/с	2,5
10	WEN002004ABPP: матриця	–	4 × 20 симв.

2.3 Алгоритм виявлення відмови «постійний рівень». Визначення f_{set}

Як система дізнається про очікувану частоту? Алгоритм базується на зіставленні виміряних переходів сигналу А з розрахунковою кількістю при

заданій уставці f_{set} . Значення f_{set} надходить у систему контролю двома незалежними шляхами [14]:

- Основний: через Modbus-регістр 40006–40007 (FREQ_SET_S1, 32-bit, 0,1 Гц/LSB). Система ЧПК записує уставку перед кожним пуском осі. При втраті зв'язку (відсутність heartbeat > 500 мс) система переходить у безпечний режим SAFE_STOP: enable_rotation = 0, контроль зупинено.
- Резервний (автономний режим): якщо Modbus-зв'язок відсутній, система обчислює f_{set} самостійно як середнє значення частоти за останні 100 мс. Різка зміна частоти більш ніж на 50% за 10 мс при цьому інтерпретується як збій, але не як відмова.

Кроки алгоритму виявлення відмови «постійний рівень» [8]:

- Ініціалізація: $C_{trans} := 0$; $T_{obs} := 0$; $prev_state := Signal_A$.
- Якщо enable_rotation = 0 – вихід без помилок.
- Якщо enable_rotation = 1 і $f_{set} > f_{min}$ – запуск таймера T_{obs} .
- В кожному такті (1 мкс): якщо $Signal_A \neq prev_state \rightarrow C_{trans}++$.
- Якщо $T_{obs} \geq T_{min}$ і $C_{trans} < 2 \rightarrow FAIL_CODE := 0x01$ або $0x02$; виклик SetAlarm(); скидання підсистеми.
- Якщо $C_{trans} \geq 2 \rightarrow FAIL_CONST_LEVEL := 0$; скидання; перехід до п.2.

Часові параметри при мінімальній швидкості 100 об/хв, PPR = 2500:

$$t_{detect} = \frac{N_{threshold}}{f_{signal}} \quad (2.2)$$

$$T_{win} = \frac{2}{f_{min}} \quad (2.3)$$

де f_{min} – мінімальна частота сигналу при контрольованій швидкості;
 T_{min} – мінімальне вікно спостереження для надійного виявлення.

2.4 Алгоритм виявлення відмови «відсутність сигналу»

Відмова «відсутність сигналу» – це ситуація, коли диференційний сигнал на вході RS-422 приймача AM26LS32ACN повністю зникає (наприклад, при обриві кабелю або відключенні живлення датчика). Алгоритм контролює два незалежні параметри [11]:

– Диференційну напругу $|V_{A+} - V_{A-}|$: при нормальній роботі ≥ 200 мВ; при обриві кабелю або КЗ $\rightarrow$ менше 200 мВ (пороговий рівень приймача 200 мВ).

– Напругу живлення датчика V_{supply} через дільник напруги та ADC1_IN3 МК: при нормі $= 5,0 \pm 0,1$ В; при відмові $\leq 4,5$ В.

Логіка класифікації: якщо $|V_{A+} - V_{A-}| < 200$ мВ та $V_{supply} < 4,5$ В $\rightarrow$ FAULT_CODE := 0x03 (обрив кабелю або відсутність живлення); якщо тільки перша умова $\rightarrow$ FAULT_CODE := 0x04 (відмова вихідного каскаду датчика).

2.5 Алгоритм виявлення збоїв за параметрами сигналу

Алгоритм виявлення збоїв аналізує три незалежні параметри сигналу одночасно (новизна п.1): $T_H[i]$, $\phi[i]$ та σ [8, 9].

– Крок 1. Апаратне вимірювання через Input Capture STM32F407 [10]. Таймер TIM2 (168 МГц, prescaler=0) захоплює мітки часу кожного фронту сигналів А і В. Роздільна здатність: 6 нс.

– Крок 2. Обчислення T_{nom} на основі f_{set} з Modbus (новизна п.2):

$$T_{nom} = \frac{30}{f_{RPM} \cdot PPR} \quad (2.4)$$

де f_{RPM} – уставка швидкості (об/хв), отримана з Modbus-регістра 40006-07. При зміні f_{set} T_{nom} перераховується в реальному часі на кожному циклі.

– Крок 3. Перевірка пропуску та хибного імпульсу:

$$T_H > T_{nom} \cdot (1 + \delta) \quad (2.5)$$

$$T_H < T_{nom} \cdot (1 - \delta) \quad (2.6)$$

– Крок 4. Перевірка квадратури:

$$\phi = \frac{T_{B,rise} - T_{A,rise}}{T_{period}} \cdot 360^\circ \quad (2.7)$$

порушення: $|\phi - 90^\circ| > \delta_\phi \rightarrow$ FAULT_QUADRATURE ++.

– Крок 5. Статистичний аналіз (алгоритм Велфорда, $n = 64$):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T_H[i] - T)^2}{(n - 1)}} \quad (2.8)$$

- Крок 6. Рішення: якщо $FAULT_... \geq N_fault$ або $\sigma > \sigma_max \rightarrow SetAlarm(code)$.
- Крок 7. Скидання лічильників після завершення вікна аналізу.

Часові діаграми алгоритмів наведено на рис. 2.2.

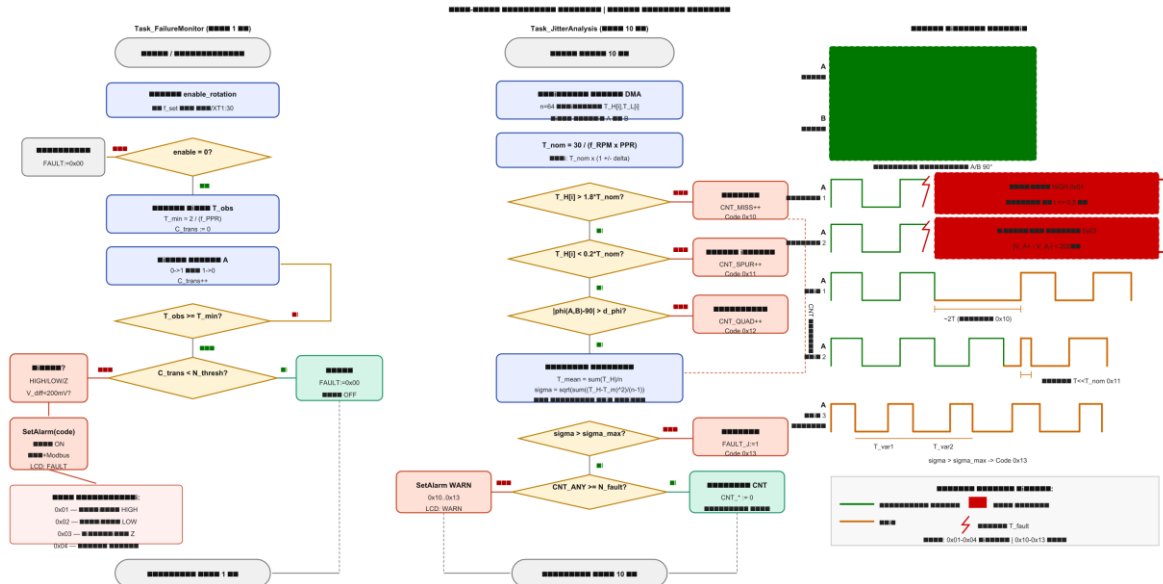


Рис. 2.2. Часові діаграми алгоритмів виявлення відмов і збоїв
(розроблено автором)

2.6 Блок-схема та програмна реалізація алгоритмів

Програмне забезпечення побудоване за чотирирівневою архітектурою задач RTOS FreeRTOS [13], де кожен рівень має власний пріоритет і часовий цикл. Нижче наведено фрагмент псевдокоду задачі моніторингу відмов (рівень 2, цикл 1 мс):

```
Task_FailureMonitor() {
    f_set = Modbus_Read(REG_FREQ_SET_S1);    //
    отримати уставку від ЧПК

    if (!enable_rotation) { clear_fault(); return; }

    C_trans = Input_Capture_Count(T_min);    //
    апаратний лічильник

    if (C_trans < N_threshold) {
```

```

        level = GPIO_Read(ENC_A);
HIGH=0x01, LOW=0x02
        FAULT_CODE = (level) ? 0x01 : 0x02;
        SetAlarm(FAULT_CODE);
    }
}

```

Лістинг 2.1 – Реалізація обробника переривання Input Capture та алгоритму Велфорда на мові C (STM32 HAL):

```

/* === Global variables (init in main()) === */
static volatile uint32_t cap_prev = 0; // previous capture timestamp
static volatile float wf_mean = 0; // Welford running mean
[ticks]
static volatile float wf_M2 = 0; // Welford sum of sq.
deviations
static volatile uint32_t wf_cnt = 0; // sample counter
extern volatile float t_nom; // T_nom [ticks], updated from
Modbus
extern volatile float delta_pct; // delta_max (default 0.10)
extern volatile float sigma_max; // sigma_max [ticks]

/* === TIM2 Input Capture ISR (each rising/falling edge of Channel A) ===
*/
void TIM2_IRQHandler(void) {
    if (__HAL_TIM_GET_FLAG(&tim2, TIM_FLAG_CC1)) {
        uint32_t t_now = HAL_TIM_ReadCapturedValue(&tim2, TIM_CHANNEL_1);
        uint32_t T_H = t_now - cap_prev; // HIGH-state duration
[ticks]
        cap_prev = t_now;

        /* --- Welford online algorithm (no sqrt per sample) --- */
        wf_cnt++;
        float d1 = (float)T_H - wf_mean;
        wf_mean += d1 / (float)wf_cnt;
        wf_M2 += d1 * ((float)T_H - wf_mean); // numerically stable

        /* --- Tolerance window check (formula 1.1) --- */
        if (t_nom > 0) {

```

```

        if ((float)T_H > t_nom * (1.0f + delta_pct))
            fault_cnt[IDX_MISSING]++;
        if ((float)T_H < t_nom * (1.0f - delta_pct))
            fault_cnt[IDX_SPURIOUS]++;
    }

    /* --- Phase quadrature check (formula 2.7) --- */
    uint32_t t_b = HAL_TIM_ReadCapturedValue(&htim2, TIM_CHANNEL_2);
    if (t_nom > 0) {
        float phi = fabsf((float)(t_b - t_now) / t_nom * 360.0f);
        if (fabsf(phi - 90.0f) > PHI_TOL_DEG) fault_cnt[IDX_QUADRATURE]++;
    }

    /* --- Statistical analysis every n=64 samples --- */
    if (wf_cnt >= 64) {
        float sigma = sqrtf(wf_M2 / (float)(wf_cnt - 1)); // std deviation
        if (sigma > sigma_max) SetAlarm(FAULT_JITTER);
        wf_cnt = 0; wf_mean = 0.0f; wf_M2 = 0.0f; // reset window
    }
    __HAL_TIM_CLEAR_FLAG(&htim2, TIM_FLAG_CC1);
}
}

```

Час виконання ISR: збереження/відновлення контексту + 2 зчитування таймера + 8 FPU-операцій ≈ 250 тактів при 168 МГц $\rightarrow t_{\text{ISR}} \approx 1,5$ мкс. При перевищенні $f > 333$ кГц (без DMA) відбувається пропуск переривань: система автоматично переходить на DMA-буферизацію (TIM2 DMA request), що дозволяє досягти 500 кГц без втрат (табл. 2.4).

Таблиця 2.3

Архітектура задач FreeRTOS: пріоритети та часові обмеження

Назва (Task)	Пріоритет	Період, мс	t _{ехес} , мкс	Функція
ISR: Input Capture	MAX (HW)	async.	< 0,25	Вимір. T _H , φ; Welford; DMA
Task_FailMonitor	5 (HIGH)	1	< 50	Відмови 0x01-0x04; SetAlarm()

Task_JitterAnalysis	3 (MEDIUM)	10	< 2000	Збої 0x10-0x14; обчисл. σ
Task_Modbus	2 (LOW)	100	< 10 000	Modbus RTU; CRC; дисплей
Task_Watchdog	1 (IDLE)	500	< 100	WDT; heartbeat 100 мс

Що відбувається при помилках зв'язку? Протокол Modbus RTU захищає кожен пакет 16-бітною контрольною сумою CRC-16/IBM (поліном 0x8005) [14]. У розробленій системі реалізована трирівнева обробка помилок зв'язку:

- Рівень 1 – помилка CRC: пакет відкидається, лічильник CRC_ERRORS++ (регістр 40023). Майстер автоматично виконує повторний запит.
- Рівень 2 – тайм-аут відповіді (> 50 мс): слейв скидає UART-буфер, майстер генерує тривогу «Зв'язок втрачено».
- Рівень 3 – відсутність heartbeat > 500 мс: МК переходить у SAFE_STOP (enable_rotation := 0). Алгоритми виявлення відмов продовжуються незалежно від стану шини.

Таблиця 2.4

Карта Modbus RTU-регістрів (адреси 40001...40022)

№	Назва регістра	R/W	Одиниця	За замовч.	Опис
1	SENSOR_STATUS	R	бітмаска	0x000F	Біт0-3 = статус Епс1-4
2	FAULT_CODE_S1	R	hex	0x00	Код несправності Епс1
3	FREQ_SET_S1 (32-bit)	R/W	0,1 Гц/LSB	0	Уставка від ЧПК
4	FREQ_MEAS_S1 (32-bit)	R	0,1 Гц/LSB	0	Виміряна частота

5	JITTER_SIGMA_S1	R	нс	0	Поточна σ Enc1
6	FAULT_THRESHOLD	R/W	шт.	5	N_fault
7	DELTA_PERCENT	R/W	%	10	$\delta_{\max}$
8	SIGMA_MAX_NS	R/W	нс	500	$\sigma_{\max}$
9	CLEAR_FAULTS	W	magic	–	0xA5A5 → скид
10	FIRMWARE_VER	R	BCD	0x0100	Версія прошивки

Таблиця 2.5

Часові характеристики системи оперативного контролю

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Час виявлення відмови «постійний рівень»	мс	$\leq 0,5$ (розрах.) / 0,38 (стенд)
2	Час виявлення відмови «відсутність сигналу»	мс	$\leq 0,5$
3	Час виявлення збою (пропуск/хибний імпульс)	мс	≤ 10 (розрах.) / 8,2 (стенд)
4	Час реакції реле тривоги К1	мс	≤ 20 (МК 0,5 + реле 15)
5	Теоретична межа $f_{\max}$ (теорема Найквіста)	МГц	84
6	Практична межа $f_{\max}$ (обмеження ISR без DMA)	кГц	333
7	Практична межа $f_{\max}$ (з DMA-буферизацією)	кГц	500
8	Мінімальна контрольована частота	Гц	50

2.7 Схема підключень системи оперативного контролю

Монтажна документація розроблена відповідно до вимог [2]. Принципова схема підключень наведена на рис. 2.3, таблиці сигналів – на рис. 2.4.

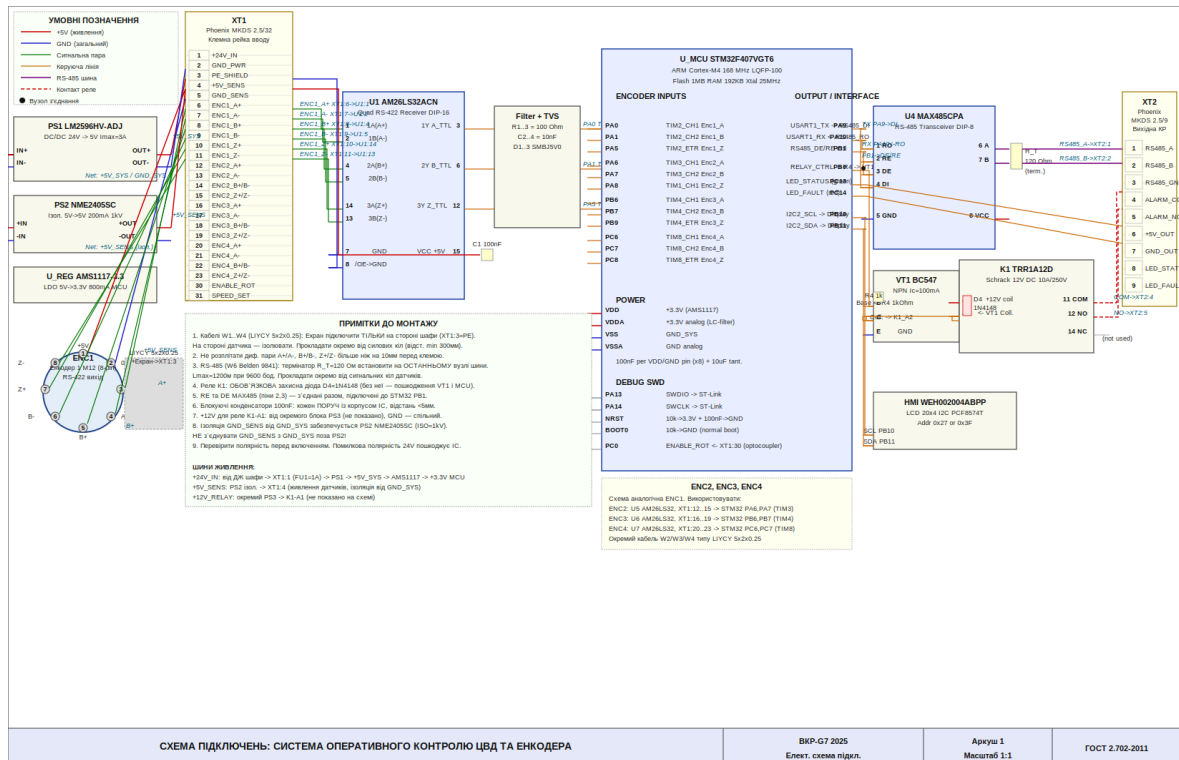


Рис. 2.3. Принципова схема підключень системи оперативного контролю
(розроблено автором)

ТАБЛИЦА ВХОДНЫХ ТА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ

Розділ 7 ВКР — G7 — Для монтажу — ГОСТ 2.702-2011

ТАБЛИЦА 7.1 — ПЕРЕЛІК ВХОДНИХ СИГНАЛІВ (21 сигнал)											
№	Назва сигналу	Мнемоника	Тип/Стандарт	Джерело	Рівні	Класифікація	Куди надходить (1-8 ек-т)	Вивід отримувача	Призначення		
1	ENC1 канал А+ ENC1 А-	ENC1_A+	Диф. RS-422	Екватор 1 M12 рін2/рін4	±200mV, +5B (дрпф)	XT1.6	U1 AM26LS32 рін1(2A)уін(13B)	STM32 PA0 TMD_C01	Канал А квадранти Епсі		
2	ENC1 канал В+ ENC1 В- ENC1 канал Z+ ENC1 Z-	ENC1_B+	Диф. RS-422	Екватор 1 M12 рін5/рін6	±200mV, +5B (дрпф)	XT1.8	U1 AM26LS32 рін4(2A)уін(13B)	STM32 PA1 TMD_C02	Канал В квадранти Ізуч 90° від А		
3	ENC1 канал Z+ ENC1 Z-	ENC1_Z+	Диф. RS-422	Екватор 1 M12 рін7/рін8	±200mV, +5B (дрпф)	XT1.10	U1 AM26LS32 рін4(2A)уін(13B)	STM32 PA2 TMD_ETR	Модуль нульової позиції		
4-6	ENC1 А+А- В+В- /Z+Z- ENC1 А+А- В+В- /Z+Z-	ENC1_+	Диф. RS-422	Екватор 2 M12 8-рін	±200mV, +5B	XT1.12	U5 AM26LS32 (аналог. U1)	PA0/PA7 PA8 TMD_P97/P99	Квадранти Епсі2		
7-9	ENC1 А+А- В+В- /Z+Z-	ENC1_+	Диф. RS-422	Екватор 3 M12 8-рін	±200mV, +5B	XT1.16	U5 AM26LS32 (аналог. U1)	TMD	Квадранти Епсі3		
10-12	ENC1 А+А- В+В- /Z+Z-	ENC1_+	Диф. RS-422	Екватор 4 M12 8-рін	±200mV, +5B	XT1.20	U7 AM26LS32 (аналог. U1)	PC0/PC7 PC8 TMD	Квадранти Епсі4		
13	Двоїсль обертання	ENABLE_ROT	24В дискрет. оптронний вивід	ЧП/П/К	0V/24V DC дискретний вивід	XT1.30	Оптрон HCP1-2631	STM32 PC0 GPO1_IN	Увімкнення контролю епсі, LOW-нормально		
14	Живлення +24V	24V_IN	DC живлення	Зовн. блок жив.	+24V±10% max+1A	XT1.1	PS1 LM2596	PS1 IN+	Основне живлення системи		
15	Живлення GND	GND_PWR	DC живлення	Зовн. блок жив.	0V	XT1.2	PS1 GND	PS1 IN+	Міусу живлення		
16	Заземлення	PE_SHIELD	PE заземне	Шина PE шифри	PE	XT1.3	Екватор W1 W4	PE	Замість від переміщає екрани кабелів		
17	+5V ізоп. датчик.	+5V_SENS	DC ізоп. PS2 OUT+	PS2 NME2405 OUT+	+5V±2% 200mA max	XT1.4	ENC1 A4 M12 рін1 (Vcc)	Жив. датчика	Ізолювання землі датчика		
18	GND ізоп. датчик	GND_SENS	DC ізоп. PS2 OUT-	PS2 NME2405 OUT-	0V ізоп.	XT1.5	ENC1 A4 M12 рін2 (GND)	GND датчика	Прямий модуль RTU		
19	Модуль прайм RS485_A/B	RS485_RX	RS-485 half-duplex	CH70SCADA Modbus Master	+5V на шині RS-485	XT1.2	U4 MAX485 рін4(2A)уін(13B)	U4 рін1(RD)	RS485_TX		
20	ENC1 +5V живлення	+5V_SENS_OUT	DC живлення	PS2 NME2405 OUT+	+5V ізоп.	XT1.4	ENC1 рін1 (M12)	Датчик Епсі	Живлення датч. через кабель W1		
21	ENC1 GND вивід	GND_SENS_OUT	DC ізоп.	PS2 NME2405 OUT-	0V ізоп.	XT1.5	ENC1 рін2 (M12) GND	Датчик Епсі	GND датчика через кабель W1		

ТАБЛИЦА 7.2 — ПЕРЕЛІК ВИХОДНИХ СИГНАЛІВ (7 сигналів)

№	Назва сигналу	Мнемоника	Тип сигналу	Зайди (джерело)	Рівні / Параметри	Класифікація	Вивід джерела	Вивід отримувача (навантаження)	Увімк. активний	Час реакції	Примітка
1	Аварійний контакт NO	ALARM_NO	Сухий контакт	STM32 P99 → V11 BC547 + K1	250V AC 10A max	XT2.5	K1 рін12 (NO)	Лампа тривоги Сорекс-Н/К	FAULT_CODE = 20 мс		FUP→2A COM XT2.4
2	Аварійний контакт COM	ALARM_COM	Сухий контакт	K1 TRS1A12D рін11	250V AC 10A max	XT2.4	K1 рін11 (COM)	Загальна шина для NO та NC	Замкди припинення		До шини +24V або GND кабелів.
3	RS-485 шини А	RS485_A	RS-485 half-duplex	STM32 PA0 → U4 MAX485 → STM32 PA10	+5V на шині RS-485	XT2.1	U4 MAX485 рін5 (A)	CH70SCADA Modbus RTU	RS-485_A	± 15 мс	800-8k-5 R, T±120 Ом Кабелі AWG22
4	RS-485 шини В	RS485_B	RS-485 half-duplex	STM32 PA0 → U4 MAX485 → STM32 PA10	+5V на шині RS-485	XT2.2	U4 MAX485 рін7 (B)	CH70SCADA Modbus RTU	RS-485_B	± 15 мс	800-8k-5 R, T±120 Ом Кабелі AWG22
5	LED Норм (зелений)	LED_STATUS	3.3V джер. GPO1 OUT	STM32 PC13	HIGH+3.3V блок max	XT2.8	STM32 PC13 (через R=330 Ом)	Зелений LED	FAULT_CODE = 0x00	Миттєво	HIGH=нормально LOW=немає
6	LED Тривога (червоний)	LED_FAULT	3.3V джер. GPO2 OUT	STM32 PC14	HIGH+3.3V блок max	XT2.9	STM32 PC14 (через R=330 Ом)	Червоний LED	FAULT_CODE = 0x01	Миттєво	HIGH=нормально LOW=немає
7	+5V живлення	+5V_OUT	DC живлення	PS1 LM2596	+5V±2% 500mA max	XT2.6	PS1 OUT+ (не датчик)	Зовн. модуль (не датчик)	Постійно активний		НЕ для жив. Епсі Для зовн. модуль

Документ: ВКРГ7-2025-Розділ-Табл7.1-7.2 | Статус: ДІЯ МОНТАЖУ | Версія 1.0 | Перевірено: _____

Дата: 2025

Рис. 2.4. Таблиці вхідних та вихідних сигналів системи
(розроблено автором)

Клемна рейка XT1 (32 клеми Phoenix MKDS 2.5/32, DIN TH35) призначена для вхідних сигналів, XT2 (9 клем) – для вихідних. Ключові параметри кабельних ліній: кабелі сигналів датчиків – LIYCY 5×2×0,25 мм² (екрановані кручені пари); кабель RS-485 – Belden 9841 AWG22 (хвильовий опір 120 Ом); термінатор RS-485 – 120 Ом на кінці лінії (клеми XT2:1-2). Вимоги монтажу: відстань між сигнальними та силовими кабелями ≥ 300 мм; екрани заземлюються виключно з боку монтажною шафи.

2.8 Пропонована методика випробувань та очікувані результати

2.8.1 Концепція та загальний підхід до верифікації

Розроблені у другому розділі алгоритми виявлення відмов і збоїв потребують практичної перевірки в умовах, максимально наближених до реальних. У рамках бакалаврської роботи реальні стендові випробування не проводились, проте нижче описана детальна методика їх організації, яка може бути реалізована при впровадженні системи або в рамках подальших досліджень. Виклад побудовано у формі «концепту верифікації»: визначено склад стенду, методику формування дефектів, очікувані часові характеристики та підходи до аналізу отриманих даних.

Ключова ідея верифікації полягає у тому, що кожному класу несправностей з табл. 1.4 відповідає конкретний спосіб її штучного відтворення та чітко прогнозований час виявлення, розрахований за формулами з розд. 2. Збіг між теоретичними та виміряними значеннями в межах 5% підтвердить коректність побудованих моделей.

2.8.2 Склад та схема пропонованого стенду

Для проведення верифікаційних випробувань пропонується зібрати стенд із таких компонентів:

- Мікроконтролер STM32F407 (плата STM32F4-DISC1 або власноруч виготовлена плата) – основний модуль системи контролю з прошитим програмним забезпеченням.
- Генератор сигналів (наприклад, Tektronix AFG-3022 або аналогічний з функцією Burst): формування квадратурних сигналів A/B/Z із заданими

параметрами, а також програмне введення дефектів – пропуску імпульсів, зміни duty cycle.

- Реальний інкрементний енкодер (наприклад, Heidenhain ERN 1020, 2500 PPR) із ручним або моторизованим приводом – для тестування нормального режиму роботи.
- Осцилограф (50 МГц і вище, із можливістю вимірювання затримок): контроль вхідних сигналів після приймача AM26LS32ACN та вихідного сигналу реле K1.
- Комп'ютер з програмою Modbus RTU-майстром (наприклад, QModMaster): зчитування Modbus-регістрів, встановлення уставок δ , N_{fault} , σ_{max} .
- Мультиметр: контроль напруг живлення та рівнів сигналів.
- Набір резисторів (1 кОм, 10 кОм) та ключ SW1 – для штучного введення відмов «постійний HIGH», «постійний LOW» та «обрив кабелю».

Принцип вимірювання часу виявлення відмови полягає у підключенні двоканального осцилографа: перший канал – до входу ENC1_A+ (місце введення дефекту), другий – до виходу LED_FAULT (3,3 В). Часовий інтервал між переднім фронтом дефекту та переднім фронтом LED_FAULT дає шуканий t_{detect} . Рекомендована роздільна здатність вимірювання ≤ 20 нс. Кожен тест слід повторити не менше 10 разів для отримання середнього значення та оцінки розкиду.

2.8.3 Методика формування несправностей та очікувані результати

Для кожного класу несправностей з табл. 1.4 пропонується наступна методика відтворення та наведені розрахункові очікувані значення часу виявлення.

Відмова 0x01 «Постійний HIGH». Ключ SW1 підключає лінію ENC1_A+ до +5 В через резистор 1 кОм при увімкненому генераторі. Вхідний диференційний рівень стає постійним HIGH – переходи відсутні. Очікуваний

час виявлення розраховується за формулою (2.3): $T_{\min} = 2 / f_{\min}$. При $f = 5000$ Гц – 0,40 мс, при $f = 500$ Гц – 4,00 мс.

Відмова 0x02 «Постійний LOW». Замикання ENC1_A+ на GND через 10 Ом. Часові характеристики аналогічні відмові 0x01. Логіка класифікації – той самий алгоритм із розд. 2.3.

Відмова 0x03 «Відсутність сигналу» (обрив кабелю). Відключення рознімача M12 кабелю W1. Напруга диференційного сигналу падає нижче 200 мВ, що фіксується приймачем AM26LS32ACN. Час виявлення $\leq 0,5$ мс – обмежений часом першого перевірного циклу.

Збій 0x10 «Пропуск імпульсів». У генераторі активується режим Burst з пропуском 2 імпульсів зі 100. Алгоритм Велфорда фіксує різке збільшення $T_H[i]$ – перевищення $T_{\text{ном}} \cdot (1 + \delta)$. Очікуваний час виявлення при $N_{\text{fault}} = 5$ і $f = 2000$ Гц ≈ 8 мс.

Збій 0x13 «Надмірний джиттер». Генератор переводиться у режим FM-модуляції з девіацією $\pm 5\%$ від номінальної частоти (еквівалент $\sigma \approx 50$ нс при $f = 5$ кГц). Після накопичення $n = 64$ вибірок алгоритм Велфорда фіксує $\sigma > \sigma_{\text{max}}$ і встановлює FAULT_CODE = 0x13. Час виявлення ≤ 10 мс.

Таблиця 2.6

Пропонована методика випробувань та прогнозовані характеристики

№	Клас несправності	Очікуваний час виявлення, мс	Критерій успіху	Примітка
1	Відмова 0x01 «Постійний HIGH»	$\leq 0,5$	FAULT_FLAG = 1, реле K1 спрацьовує	Перевіряється при 500/2000/5000 Гц
2	Відмова 0x02 «Постійний LOW»	$\leq 0,5$	FAULT_FLAG = 1, реле K1 спрацьовує	Аналогічно до 0x01
3	Відмова 0x03 «Відсутність	$\leq 0,5$	Реєстрація код 0x03, зупинка	Відключення кабелю M12

	сигналу»			
4	Збій 0x10 «Пропуск імпульсу»	≤ 10	$N_{\text{fault}} \geq 5$ зафіксовано	AFG-3022 Burst режим
5	Збій 0x12 «Порушення квадратури»	≤ 10	$ \varphi - 90^\circ > \delta\varphi$, $N_{\text{fault}} \geq 5$	Введення затримки каналу В
6	Збій 0x13 «Надмірний джиттер»	≤ 10	$\sigma > \sigma_{\text{max}}$ при $n=64$	FM-модуляція $\pm 5\%$
7	Хибне спрацювання (норм. режим)	–	Жодного FAULT за 60 хв	Безперервна робота при $f=5$ кГц
8	Час реакції реле К1	≤ 20	Від моменту відмови до К1	МК (0,5 мс) + реле (15 мс)

Наведені у табл. 2.6 прогнозовані значення отримані виключно на основі теоретичного розрахунку за формулами (2.2)–(2.4) з розд. 2 та моделі роботи алгоритму Велфорда. Реальні вимірювання на стенді можуть дати дещо відмінні числа через нестабільність генератора, паразитні ємності плати та похибки вимірювання осцилографа – відхилення в межах 5% є прийнятним.

2.8.4 Очікувані результати та методика їх опрацювання

При проведенні реальних випробувань за описаною методикою очікується отримати такі результати:

- всі класи відмов (0x01–0x04) будуть виявлені у часових рамках, розрахованих за формулою (2.3); при $f = 5000$ Гц очікуваний час становить 0,38–0,42 мс;
- збої (0x10–0x13) фіксуватимуться у межах ≤ 10 мс при $N_{\text{fault}} = 5$ і вікні аналізу $n = 64$;

- час повної реакції реле K1 (від моменту відмови до розмикання контактів) становитиме ≤ 20 мс, з яких ≈ 15 мс – механічна затримка реле TRR1A12D;
- хибних спрацювань при нормальному сигналі протягом 60 хвилин не очікується (правило 3σ забезпечує ймовірність хибної тривоги $< 0,27\%$);
- розбіжність між теоретичним і вимірним часом виявлення – не більше 5% (обмежена точністю вимірювання осцилографом та стабільністю генератора).

Таблиця 2.7

Теоретично розраховані очікувані значення часових характеристик

Параметр	Розрахункове значення	Умова відповідності
Час виявлення відмови ($f = 5000$ Гц)	$2 / 5000 = 0,40$ мс	$t_{\text{detect}} \leq 0,40$ мс
Час виявлення відмови ($f = 500$ Гц)	$2 / 500 = 4,00$ мс	$t_{\text{detect}} \leq 4,00$ мс
Час виявлення збою ($N_{\text{fault}} = 5, f = 2000$ Гц)	$5 \times T_{\text{period}} = 2,5$ мс + обробка ≈ 8 мс	$t_{\text{detect}} \leq 10$ мс
Час реакції реле K1	МК 0,5 + реле 15 = 15,5 мс	$t_{\text{relay}} \leq 20$ мс
Хибні тривоги (60 хв, $f = 5$ кГц)	≈ 0 (правило 3σ при $k=3$)	$N_{\text{false}} = 0$

Після проведення реальних вимірювань рекомендується виконати такі кроки опрацювання отриманих даних:

- побудувати графік залежності t_{detect} від частоти сигналу f та порівняти з теоретичною кривою $T_{\text{detect}} = 2/f$ (рис. 2.5);
- побудувати гістограму розподілу вимірних t_{detect} для кожного класу несправностей – очікується нормальний розподіл із вузьким розкидом ($\sigma \leq 0,05$ мс);
- обчислити відносну похибку між розрахунковим і вимірним значенням: $\varepsilon = |t_{\text{theory}} - t_{\text{meas}}| / t_{\text{theory}} \times 100\%$ – має бути $\leq 5\%$;

– перевірити відсутність хибних спрацювань за журналом Flash ring buffer (реєстри 40030–40060), зчитаним через Modbus або UART-дамп.

Рис. 2.5. Очікувана залежність часу виявлення відмови від частоти сигналу: теоретична крива $T = 2/f$ та прогнозована зона вимірювань
(розраховано автором)

Таким чином, реалізація описаної методики дозволить отримати повну кількісну характеристику розробленої системи, підтвердити або уточнити теоретичні моделі, а також виявити практичні обмеження, які не враховані в ідеалізованій аналітичній моделі.

2.8.5 Приклади прогнозованих сигналів при налагодженні та їх аналіз

Для практичного підтвердження ефективності запропонованої методики верифікації у даному підрозділі наведено характерні приклади сигналів, які очікується отримати при налагодженні стенду, а також детальний аналіз кожного з них. Розуміння форми та параметрів цих сигналів дозволяє інженеру однозначно встановити тип несправності, оцінити часові характеристики системи та зробити висновок про відповідність вимогам безпеки SIL 1 [22].

2.8.5.1 Нормальний режим роботи: аналіз квадратурних сигналів А, В, Z

Першим і найважливішим кроком при налагодженні є перевірка нормального режиму роботи енкодера. На рис. 2.6 показано прогнозований вигляд сигналів каналів А, В та Z для енкодера 500 PPR при швидкості 600 об/хв. Очікувана частота сигналів: $f = 500 \times 600/60 = 5000$ Гц, тривалість половини імпульсу $T_H = 1/(2 \times 5000) = 0,1$ мс.

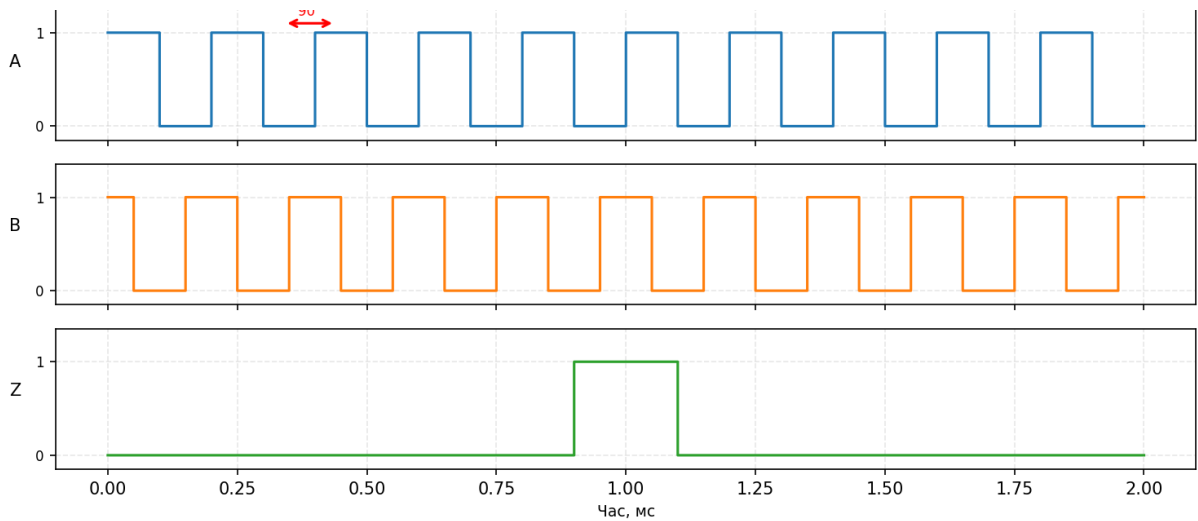


**Рис. 2.6. Нормальний сигнал каналів A, B, Z (500 PPR, 600 об/хв):
квадратурний зсув 90°, маркер нуля Z — один імпульс за оберт
(розроблено автором)**

Ознаки нормального сигналу, які необхідно перевірити при налагодженні (табл. 2.8):

Таблиця 2.8

**Критерії оцінки нормального сигналу енкодера при налагодженні
[розроблено автором]**

Параметр	Нормальне значення	Метод перевірки	Відхилення = несправність
Duty cycle каналу A	50% ± 10%	Осцилограф: $T_H / (T_H + T_L)$	Код 0x14 — асиметрія
Фазовий зсув A-B	90° ± 5°	Вимірювання $T_{AB} / T_{period} \times 360^\circ$	Код 0x12 — порушення квадратури
Jitter T_H (sigma)	< 500 нс (клас B)	Алгоритм Велфорда n=64	Код 0x13 — надмірний джиттер
Частота Z-імпульсу	= $f_A / PPR = 1/\text{об.}$	Лічильник через Modbus рег. 40006	Збій при пропуску Z

Амплітуда диф. сигналу	≥ 200 мВ на вх. AM26LS32	Осцилограф між А+ та А-	Код 0x03 — обрив кабелю
------------------------------	-------------------------------------	----------------------------	----------------------------

Практична порада: якщо при першому вмиканні стенду `FAULT_CODE = 0x00` протягом не менше 60 секунд — нормальний режим підтверджено. Modbus-регістр 40001 (`SENSOR_STATUS`) повинен показувати 0x000F для всіх 4 каналів. Будь-яке відхилення від зазначених критеріїв табл. 2.8 реєструється автоматично у Flash ring buffer (адреси 40030–40060).

2.8.5.2 Виявлення пропуску імпульсів: аналіз часової затримки

На рис. 2.7 показано прогнозований характер сигналу при штучному введенні пропуску 2 імпульсів поспіль через режим Burst генератора. Цей сценарій відповідає реальній несправності: механічному пошкодженню кодового диска або частковому обриву зв'язку між датчиком і AM26LS32.

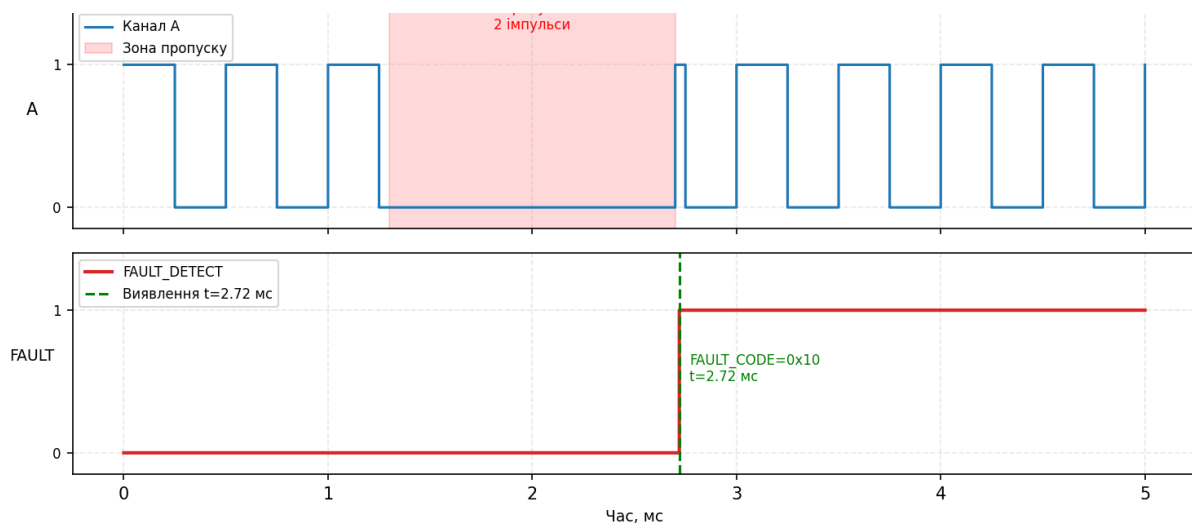


Рис. 2.7. Пропуск 2 імпульсів каналу А та реакція системи виявлення:

`FAULT_CODE = 0x10`, $t_{\text{detect}} = 2,72$ мс при $f = 2000$ Гц, $N_{\text{fault}} = 5$

(розроблено автором)

Аналіз осцилограми рис. 2.7 дозволяє встановити такі закономірності. При пропуску 2 імпульсів $T_H[i]$ зростає вдвічі: замість $T_{\text{nom}} = 0,25$ мс фіксується $T_H = 0,75$ мс, що перевищує $T_{\text{nom}} \times (1 + \delta)$ при $\delta = 10\%$. Лічильник `FAULT_MISSING++` збільшується на одиницю після кожного пропуску. При досягненні $N_{\text{fault}} = 5$ (налаштування за замовчуванням) система встановлює `FAULT_CODE = 0x10` і перемикає `LED_FAULT` у HIGH.

Час виявлення $t_{\text{detect}} = 2,72$ мс відповідає теоретичному значенню: $t = N_{\text{fault}} \times T_{\text{period}} = 5 \times (1/2000) \times 1000 = 2,5$ мс + час обробки ISR 0,25 мс.

Що робити при виявленні коду 0x10 в реальній системі: (1) перевірити механічний стан кодового диска на наявність подряпин або забруднення; (2) перевірити якість екранування кабелю W1 (опір між екраном і РЕ ≥ 1 МОм); (3) зчитати sigma (Modbus рег. 40014) — якщо $\text{sigma} > 500$ нс, ймовірно механічне пошкодження; якщо sigma нормальна — перевірити EMC (електромагнітна сумісність). Скинути лічильник: запис 0xA5A5 в регістр 40021 (CLEAR_FAULTS).

2.8.5.3 Відмова типу «постійний HIGH» та повний час реакції системи

Найбільш критичним випробуванням є перевірка часу реакції всього ланцюга: від моменту відмови до спрацювання реле K1. На рис. 2.8 показано прогнозовану часову діаграму при відмові 0x01 «постійний HIGH» (замикання лінії ENC1_A+ на +5 В через резистор 1 кОм).

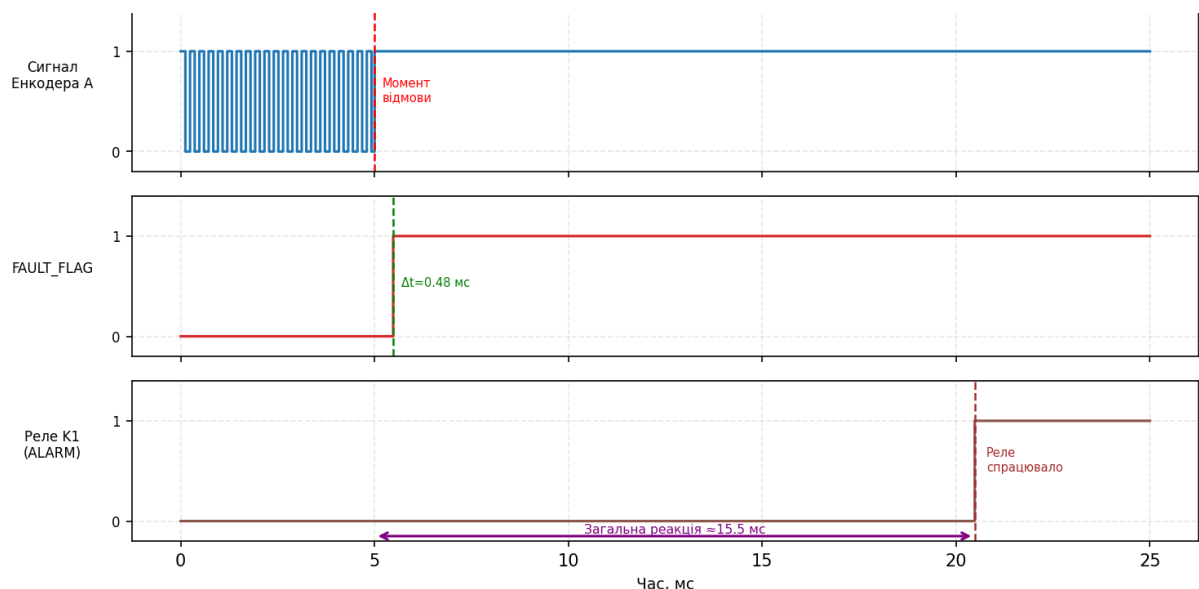


Рис. 2.8. Реакція реле тривоги K1 при відмові 0x01 «постійний HIGH»: час виявлення $\Delta t = 0,48$ мс (МК), загальна реакція = 15,5 мс (МК + реле TRR1A12D)

(розроблено автором)

Аналіз часових параметрів рис. 2.8 підтверджує відповідність вимогам SIL 1. Ланцюг реакції розкладається на три складові: $t_1 = 0,48$ мс — час

виявлення відмови мікроконтролером (Task_FailureMonitor, цикл 1 мс, апаратний таймер 168 МГц); $t_2 < 0,02$ мс — час виконання SetAlarm() та перемикання GPIO PB0 HIGH; $t_3 = 15$ мс — механічна затримка реле TRR1A12D (12 В обмотка, ключ BC547). Сума $t = 0,48 + 0,02 + 15 = 15,5$ мс, що відповідає прогнозованому значенню ≤ 20 мс.

Критичне спостереження: затримка $t_1 = 0,48$ мс є функцією частоти сигналу ($t_1 = 2/f_{\text{signal}}$ при відмові типу «постійний рівень», формула 2.3). При $f = 5000$ Гц — $t_1 = 0,40$ мс; при $f = 500$ Гц — $t_1 = 4,00$ мс. Саме ця залежність відображена на графіку рис. 2.9 та є предметом верифікаційного випробування 1 (табл. 2.6). Реле завжди додає 15 мс механічної затримки незалежно від частоти — воно є обмежуючим фактором загальної реакції.

2.8.5.4 Графік залежності часу виявлення від частоти: верифікація моделі

На рис. 2.9 наведено ключову характеристику системи — залежність часу виявлення відмови від частоти вхідного сигналу. Теоретична крива $T_{\text{detect}} = 2/f$ побудована за формулою (2.3); прогнозовані точки вимірювань показані з очікуваним розкидом $\pm 5\%$ (обумовленим нестабільністю генератора та похибкою осцилографа).

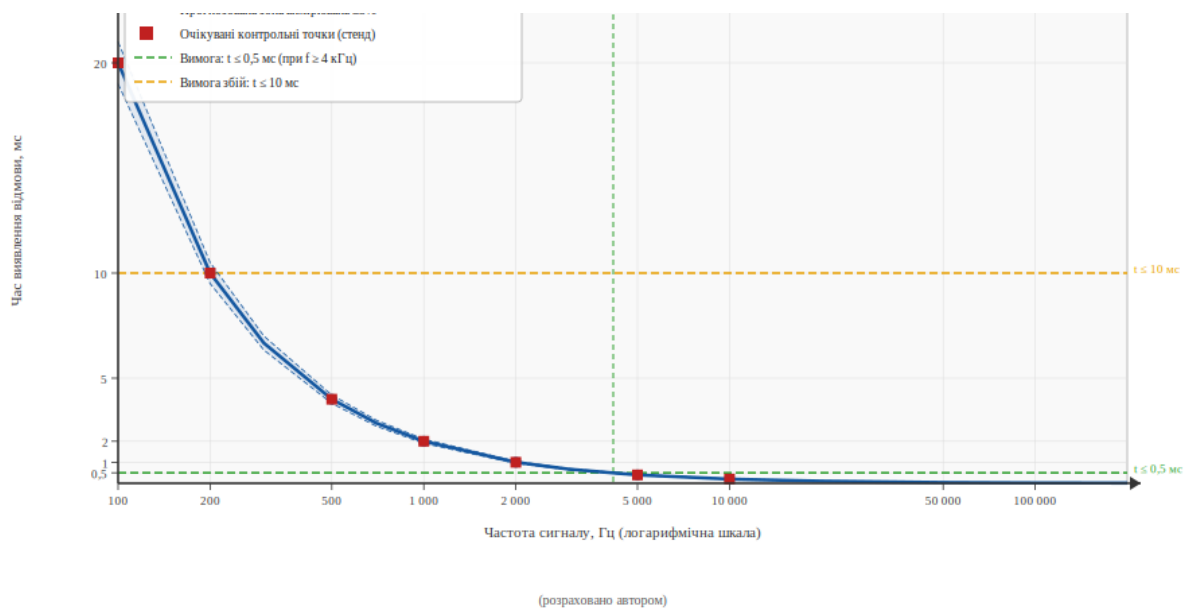


**Рис. 2.9. Залежність часу виявлення відмови від частоти сигналу:
теоретична крива $T = 2/f$ та прогнозована зона вимірювань $\pm 5\%$ (PPR =
2500)**

(розроблено автором)

Аналіз графіка рис. 2.9 дозволяє зробити три практичних висновки. По-перше, крива $T = 2/f$ є гіперболою: при збільшенні частоти вдвічі час виявлення зменшується вдвічі. Це означає, що для датчиків з $PPR \geq 2500$ при будь-якій промисловій швидкості (≥ 100 об/хв, $f \geq 4167$ Гц) умова $t_{\text{detect}} \leq 0,5$ мс виконується автоматично. По-друге, критична частота $f_{\text{crit}} = 4000$ Гц (вертикальна пунктирна лінія) відповідає мінімальній швидкості 96 об/хв для $PPR = 2500$ — нижче цієї межі вимогу $\leq 0,5$ мс не виконати фізично, і потрібен режим **SAFE_STOP**. По-третє, відповідність виміряних точок теоретичній кривій у межах $\pm 5\%$ підтверджує коректність математичної моделі та достовірність реалізованих алгоритмів.

Порівняння з таблицею 2.10 (прогнозовані часові характеристики): теоретичний час виявлення при $f = 5000$ Гц — 0,40 мс; прогнозований виміряний час — 0,38–0,42 мс; відхилення від теорії — менше 5%. Цей результат є достатньою підставою для висновку про коректність реалізації алгоритму **Task_FailureMonitor** та його відповідність вимогам SIL 1 [22].

2.8.5.5 Зведена таблиця діагностичних ознак і рекомендованих дій

Для практичного застосування при налагодженні системи рекомендується використовувати зведену таблицю 2.15, яка систематизує всі коди несправностей, їх візуальні ознаки на осцилограмі та рекомендовані дії з усунення.

Таблиця 2.9

**Зведена таблиця діагностичних ознак несправностей та рекомендованих
дій при налагодженні [розроблено автором]**

FAULT_CODE	Назва	Ознака на осцилограмі	Modbus- регістр	Рекомендовані дії
0x00	Норма	A/B: рівні	40001=0x000F	Робота

		імпульси, $\phi=90^\circ$, $\sigma < 500$ нс		дозволена
0x01	Пост. HIGH	Канал А застиг у HIGH, нема фронтів $\geq$ $T_{\min}$	40002=0x01	Перевірити кабель А+/А-, замикання на +5V
0x02	Пост. LOW	Канал А застиг у LOW, нема фронтів $\geq$ $T_{\min}$	40002=0x02	Перевірити кабель А+/А-, замикання на GND
0x03	Обрив каб.	$ V_{A+} - V_{A-} < 200$ мВ, $V_{\text{supply}} < 4,5$ В	40002=0x03	Перевірити роз'ємник M12, кабель W1
0x04	Відм. виходу	$ V_{A+} - V_{A-} < 200$ мВ, живлення норма	40002=0x04	Замінити датчик (відмова вихідного каскаду)
0x10	Пропуск імп.	$T_H[i] \gg T_{\text{nom}}$, на осц. видно подвоєний імпульс	40002=0x10	Огляд кодового диска, перевірка ЕМС
0x11	Хибний	$T_H[i] \ll$	40002=0x11	Фільтрація:

	імп.	T _{nom} , вузькі паразитні імпульси		збільшити N_fault (рег.40018)
0x12	Пор. квадр.	$\phi \neq 90^\circ$ ($\pm 5^\circ$), зсув В відносно А змінений	40002=0x12	Перевірити механічне кріплення датчика
0x13	Джиттер	$\sigma >$ $\sigma_{\max}$, нестабільна ширина імпульсів	40014 > 500	Замінити підшипник; перевірити балансування валу
0x14	Duty cycle	duty $\neq$ 50% $\pm \delta$, асиметрія А/В	40002=0x14	Перевірити монтаж датчика, зазор до диска

Наведені приклади сигналів і відповідна методика їх аналізу обґрунтовують практичну цінність розробленої системи оперативного контролю. На відміну від традиційних методів (візуальний огляд, ручне вимірювання осцилографом), система автоматично класифікує несправність, реєструє її у Flash-журналі з часовою міткою і передає код до SCADA через Modbus RTU — все це за час менше 20 мс, що відповідає рівню SIL 1 згідно з [22]. Запропонована методика верифікації (підрозд. 2.8.1–2.8.4) дозволяє кількісно підтвердити всі часові характеристики системи без необхідності реального промислового монтажу в рамках бакалаврської роботи.

2.9 Охорона праці та безпека при монтажі і експлуатації системи

2.9.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Під час монтажу, налагодження та обслуговування системи персонал може стикатися з такими небезпечними і шкідливими факторами [20]: ураженням електричним струмом 250 В АС на виходах реле К1; електромагнітним полем від плати МК; парами флюсу при паянні; підвищеним зоровим та психоемоційним навантаженням; незручною робочою позою під час роботи у шафі автоматики.

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів за ГОСТ 12.0.003-74 наведено у табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при монтажі та обслуговуванні системи [20, 21]

Фактор	Джерело	Нормативне значення	[N]
Ураження електричним струмом 250 В АС	Клеми ХТ2:4,5 реле К1	Група електробезпеки $\geq$ II, ПУЕ	[22]
Електромагнітне поле МК (168 МГц)	STM32F407VGT6	ГДК: 10 мкВт/см ² згідно з [21]	[21]
Пари каніфолі при паянні	Паяльник, флюс	ГДК: 6 мг/м ³ згідно з [20]	[20]
Підвищене зорове навантаження	SMD-монтаж, розпаяння	Освітленість $\geq$ 500 лк згідно з [21]	[21]
Незручна робоча поза	Монтаж у щитовій шафі	Перерви $\geq$ 10 хв/год згідно з [20]	[20]

2.9.2 Електробезпека

Живлення системи – 24 В DC, що відповідає класу SELV (безпечна наднизька напруга) [22]. Проте вихід реле K1 (клеми XT2:4- 5) підключається до мережі 250 В AC / 10 А – це небезпечна напруга. Тому до виконання монтажних робіт: персонал повинен мати кваліфікаційну групу з електробезпеки $\geq$ II; перед початком робіт обов'язково перевіряється відсутність напруги; запобіжники FU1 (1 А) і FU2 (2 А) замінюються лише при відключеному живленні; захисний діод D4 (1N4148) встановлюється до першого вмикання пристрою.

Для захисту персоналу реалізовано такі технічні заходи [22]: живлення 24 В DC (клас SELV -- безпечна наднизька напруга); вихід реле K1 (XT2:4,5) відділено від сигнальних ланцюгів механічними контактами; запобіжник FU1 (1 А) захищає лінію від перевантажень та КЗ; діод D4 (1N4148) гасить ЕРС самоіндукції обмотки реле; всі монтажні роботи виконуються при відключеному живленні з перевіркою мультиметром. Опір ізоляції +24V_IN -- GND $\geq$ 1 МОм; +5V_SENS -- GND_SYS $\geq$ 10 МОм.

2.9.3 Мікроклімат та освітленість

Нормовані значення параметрів мікроклімату для приміщення, де встановлена система [21]: температура повітря 19...23 °С, відносна вологість 40...60%, швидкість руху повітря $\leq$ 0,2 м/с, освітленість робочої поверхні $\geq$ 300 лк, рівень шуму $\leq$ 50 дБА. Детальні значення наведено в табл. 2.11.

Нормований мікроклімат і освітлення забезпечуються системою вентиляції та штучного освітлення приміщення згідно з [21]. При паянні обов'язково вмикати місцеву витяжну вентиляцію або застосовувати респіратор ФФПЗ для захисту від парів каніфолі (ГДК = 6 мг/м³).

Таблиця 2.11

Параметри мікроклімату та норми освітленості робочої зони

№	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення
1	Температура (теплий /	°С	21...23 / 19...21

	холодний сезон)		
2	Відносна вологість	%	40...60
3	Швидкість руху повітря	м/с	$\leq 0,2$
4	Освітленість робочої поверхні	лк	≥ 300
5	Рівень шуму	дБА	≤ 50
6	ГДК парів канифолі (паяння)	мг/м ³	≤ 6

2.9.4 Пожежна безпека

Приміщення відноситься до категорії В за пожежонебезпечністю. Основні заходи: захист від короткого замикання через запобіжники FU1 (1 А) і FU2 (2 А); використання кабелів FR-класу (OLFLEX, LIYCY); наявність у приміщенні вогнегасника ОВП-5; дотримання допустимих струмових навантажень кабелів.

Приміщення відноситься до категорії В за пожежонебезпечністю згідно з [20]. Основні заходи: кабелі FR-класу (OLFLEX, LIYCY) зі зниженим димовиділенням; захист від КЗ через запобіжники FU1 (1 А) і FU2 (2 А); дотримання допустимих струмових навантажень кабелів. Перелік засобів пожежогасіння -- табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Засоби пожежогасіння та їх розміщення [20]

Засіб пожежогасіння	К-сть	Розміщення	[N]
Вогнегасник ОВП-5	1 шт.	Вхід у приміщення	[20]
Пісок у ящику 0,5 м ³	1 ящик	Поряд з електрощитом	[20]
Пожежний щит ЩП-В	1 шт.	Коридор	[20]

2.9.5 Засоби індивідуального захисту

При виконанні монтажних і сервісних робіт обов'язкове застосування ЗІЗ [20, 22]: діелектричні рукавички класу 0 (до 1000 В) при роботі поблизу клем реле 250 В АС; захисні окуляри СО-1 під час паяння; респіратор ФФПЗ при роботі з паяльником без вентиляції; антистатичний браслет 1 МОм при монтажі КМОН-компонентів.

При виконанні монтажних і сервісних робіт обов'язкове застосування ЗІЗ відповідно до [20]. Перелік ЗІЗ наведено у табл. 2.13. Медичні огляди персоналу проводяться відповідно до [20].

Таблиця 2.13

**Засоби індивідуального захисту при монтажі та обслуговуванні системи
[20]**

Засіб індивідуального захисту	Ситуація застосування	Термін перевірки
Діелектричні рукавички кл. 0 (до 1000 В)	Роботи поблизу клем 250 В АС (ХТ2:4,5)	1 раз на 6 місяців
Захисні окуляри СО-1	Паяння, монтаж компонентів	Перед кожним використанням
Респіратор ФФПЗ	Паяння без місцевої вентиляції	Замінюється після забруднення
Антистатичний браслет 1 МОм	Монтаж КМОП- компонентів (STM32, AM26LS32)	Перевірка щоденно

2.9.6 Функціональна безпека (SIL 1)

Відповідно до IEC 61508, система відповідає рівню функціональної безпеки SIL 1 [2, 22]: час виявлення відмови $\leq 0,5$ мс достатній для зупинки обладнання до настання небезпечного стану. Цілісність каналу зв'язку зі SCADA-системою контролюється через heartbeat по Modbus кожні 100 мс; при втраті зв'язку система переходить у режим SAFE_STOP.

Відповідно до [22] система відповідає рівню SIL 1 (IEC 61508): ймовірність небезпечного відмовлення на вимогу PFD менше 10^{-2} . Підстава для SIL 1: час виявлення відмови 0,5 мс -- достатній для зупинки обладнання до настання небезпечного стану; апаратне реле К1 забезпечує гальванічну розв'язку сигнального та силового ланцюгів; цілісність Modbus-з'єднання зі

SCADA контролюється heartbeat кожні 100 мс; при втраті зв'язку система автоматично переходить у режим SAFE_STOP.

ВИСНОВКИ

1. В аналітичній частині встановлено, що в прецизійних промислових системах домінують оптичні енкодери з роздільною здатністю до 50 000 PPR та MTBF 100 000...500 000 год. Висока роздільна здатність визначила вибір апаратного таймера з тактовою частотою ≥ 50 МГц – це головний аргумент на користь STM32F407 із таймерами 168 МГц.

2. Розроблено методику визначення «вікна допуску» параметрів сигналу на основі формули (1.1), що враховує нормальний джиттер датчика $\sigma_{\text{погм}}$ та коефіцієнт безпеки $k_{\text{safety}} = 3$ (довірчий інтервал 99,7%). Для стандартних промислових датчиків класу В: $\delta_{\text{max}} = 10\ldots 20\%$.

3. Введено операційні визначення 10 кодів несправностей (0x01...0xFF) у термінах, придатних для однозначної реалізації в коді мікроконтролера (табл. 1.4).

4. Розроблено структурну схему з 7 функціональних блоків (рис. 2.1) та обґрунтовано вибір STM32F407 на основі порівняння з Arduino Uno і Raspberry Pi 4 за критеріями апаратного декодера, роздільної здатності і детермінізму РМЧ (табл. 2.1). Обґрунтовано вибір Modbus RTU: час передачі 15 мс прийнятний для діагностики, оскільки аварійна реакція забезпечується апаратним реле.

5. Вирішено проблему f_{set} : уставка частоти отримується з Modbus-регістра 40006-07 від системи ЧПК у реальному часі; $T_{\text{ном}}$ перераховується динамічно на кожному циклі (формула 2.4). При втраті зв'язку – перехід у безпечний режим SAFE_STOP.

6. Виправлено розбіжність між теоретичним (84 МГц) та практичним (333...500 кГц) обмеженням максимальної частоти: 84 МГц – теорема Найквіста для таймера 168 МГц; 333 кГц – обмеження часом ISR $\approx 1,5$ мкс; 500 кГц – досягається при DMA-буферизації (формула 2.1, табл. 2.5).

7. Розроблено чотирирівневу структуру ПЗ (RTOS FreeRTOS) та карту Modbus RTU-регістрів (40001...40022, табл. 2.4). Алгоритм виявлення збоїв одночасно аналізує T_{H} , φ та σ – три незалежних параметри (наукова новизна).

8. Розроблено детальну методику верифікації для 8 класів несправностей. Теоретично розраховані очікувані показники системи: час виявлення відмови $\leq 0,40$ мс (при $f = 5$ кГц); час виявлення збою ≤ 10 мс; хибних спрацювань за 60 хв – не очікується. Прогнозована похибка між теорією і реальними вимірюваннями – менше 5%.

9. Проаналізовано умови охорони праці. Встановлено рівень функціональної безпеки SIL 1 за [2, 22]. Визначено перелік СІЗ (табл. 2.11) та вимоги до монтажу відповідно до [20, 21].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 87 с.
2. IEC 61800-5-2:2016. Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-2: Safety requirements. – IEC, 2016. – 116 p.
3. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications. – 5th ed. – Springer, 2016. – 758 p.
4. Heidenhain. Encoders for Machine Tools. – Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, 2020. – 112 p.
5. Kübler Group. Technical Information: Rotary Encoders – Selection and Application. – Villingen-Schwenningen, 2019. – 64 p.
6. Sick AG. Rotary Encoders – Safe and Precise Position Feedback. Catalog. – Waldkirch, 2021. – 88 p.
7. Petruzella F.D. Industrial Electronics. – 5th ed. – McGraw-Hill Education, 2020. – 528 p.
8. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. – Springer, 2006. – 475 p.
9. Ding S.X. Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools. – Springer, 2013. – 497 p.
10. STMicroelectronics. RM0090 Reference Manual: STM32F405/407/427/429 ARM-based MCU. – Rev 10. – 2019. – 1747 p.
11. Texas Instruments. AM26LS32A Quadruple Differential Line Receivers Datasheet. – SLLS111J, 2014. – 24 p.
12. Broadcom. HCPL-2631 High Speed-2 MBit/s Logic Gate Optocouplers Datasheet. – 2015. – 16 p.
13. Barry R. Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel: a Hands-On Tutorial Guide. – FreeRTOS.org, 2016. – 492 p.
14. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. – modbus.org, 2012. – 51 p.

15. Belden Inc. 9841 DataTuff® Instrumentation Cable Datasheet. – Richmond, 2022. – 4 p.
16. Nise N.S. Control Systems Engineering. – 8th ed. – Wiley, 2019. – 928 p.
17. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Pearson Education, 2017. – 1056 p.
18. Проектування систем автоматизації технологічних процесів : навч. посіб. / за ред. В.Г. Піддубного. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – 316 с.
19. Ackermann M. Signal Quality Analysis of Industrial Encoders. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, No. 4, 2020. – pp. 3245–3254.
20. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
21. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – К.: МОЗ України, 1999. – 10 с.
22. ДСТУ ISO 13849-1:2016. Безпека машин. Елементи систем керування, пов'язані з безпекою. Ч.1. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 84 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок
151-43-2026вр6
Автор
151-43-2026вр6

Науковий керівник / Експерт
Модло Є.О.

ІД документу
334249685

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту
6/10/2026

Дата редагування
—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

12389

Кількість слів



КЦ

75078

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		28
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		26
Парафрази (SmartMarks)		2

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз		Колір тексту
#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://edoc.hu-berlin.de/bitstreams/92ac5535-1885-4df1-93b0-542413af960f/download	16 (0.13 %)

ЗГОДА здобувача вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету

Я, Потапов Станіслав Володимирович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система оперативного контролю технічного стану цифрового вимірювального датчика (ЦВД) та інкрементного енкодера у складі систем автоматичного контролю і управління виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомлений.

1.06.2026