Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення програмного модуля для розрахунку швидкості передавання інформації в кібер-фізичній виробничій систем
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2

Вадим МАЗУР
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Світлана МАКСИМОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

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

2026 р.

Я, Мазур Вадим Вячеславович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



"14" липня 2026 р. Вадим МАЗУР

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКТС

Кафедра КІТАРБІ

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____»_____ 20 ___ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Мазуру Вадиму Вячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення програмного модуля для розрахунку швидкості передавання інформації в кібер-фізичній виробничій системі
затверджена наказом університету від 04 червня 2026 р. № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 14 липня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Архітектура кібер-фізичних виробничих систем (CPPS).
3.2 Протоколи передавання даних MQTT, OPC-UA.
3.3 Середовище моделювання MATLAB R2024 з Control System Toolbox.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Аналіз архітектур CPPS та методів передавання даних.
4.2 Вибір обладнання та визначення параметрів системи.
4.3 Розроблення програмного модуля у середовищі MATLAB.
4.4 Дослідження характеристик передавання та перевірка стійкості системи керування.
4.5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) 16 сторінок

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз архітектур CPPS та методів пере-	28.05 – 31.05.26	виконано
2	Вибір обладнання та визначення пара-	01.06 – 07.07.26	виконано
3	Розроблення програмного модуля у	08.07 – 21.07.26	виконано
4	Дослідження характеристик передавання	22.07 – 28.07.26	виконано
5	Перевірка стійкості системи керування	29.07 – 05.08.26	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	06.08 – 12.08.26	виконано
7	Подання роботи на перевірку та рецензію	13.08.26	виконано
8	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	14.08.26	виконано

Дата видачі завдання 28 травня 2026 р.

Здобувач _____ Вадим МАЗУР
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент Світлана МАКСИМОВА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 18 табл., 21 рис., 2 дод., 13 джерел.

КІБЕР-ФІЗИЧНА ВИРОБНИЧА СИСТЕМА, ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ, MQTT, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ЗАТРИМКА, ЧПК ВЕРСТАТ, ПІД-РЕГУЛЯТОР, СТІЙКІСТЬ, MATLAB.

Об'єкт розробки – процеси передавання інформації в кібер-фізичній виробничій системі на базі фрезерного верстата з числовим програмним керуванням.

Предмет розробки – програмний модуль для розрахунку швидкості передавання інформації, моделювання втрат пакетів та аналізу затримок у каналі зв'язку кібер-фізичної виробничої системи.

Мета роботи – підвищення якості передавання інформації в кібер-фізичній системі за рахунок розроблення програмного модуля для розрахунку та аналізу швидкості передавання інформації в кібер-фізичній виробничій системі.

У першому розділі проаналізовано архітектури кібер-фізичних виробничих систем, порівняно протоколи передавання даних MQTT, OPC-UA та HTTP/REST, розглянуто показники якості обслуговування та сформовано вимоги до програмного модуля.

У другому розділі виконано вибір та обґрунтування сенсорів для моніторингу ЧПК верстата, розраховано загальний потік даних та визначено параметри каналу передавання.

У третьому розділі розроблено програмний модуль у середовищі MATLAB, перевірено стійкість системи автоматичного керування температурою різання та проведено дослідження характеристик передавання даних.

Розроблений програмний модуль дозволяє отримати кількісну оцінку якості передавання даних на етапі проектування кібер-фізичної виробничої системи.

ABSTRACT

Explanatory note: 76 p., 18 tables, 21 fig., 2 appendices, 13 sources.

CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEM, DATA TRANSMISSION, MQTT, THROUGHPUT, LATENCY, CNC MACHINE, PID CONTROLLER, STABILITY, MATLAB.

The object of development is the process of information transmission in a cyber-physical production system based on a CNC milling machine.

The subject of development is a software module for calculating data transmission speed, modeling packet loss and analyzing delays in the communication channel of a cyber-physical production system.

The purpose of this work is to improve the quality of information transmission in a cyber-physical system through the development of a software module for calculating and analyzing the information transmission speed in a cyber-physical production system.

The first section analyzes the architectures of cyber-physical production systems, compares the MQTT, OPC-UA and HTTP/REST data transmission protocols, examines quality-of-service indicators and formulates the requirements for the software module.

The second section performs the selection and justification of sensors for monitoring the CNC machine, calculates the total data flow and determines the parameters of the transmission channel.

The third section describes the development of the software module in the MATLAB environment, the verification of the stability of the automatic control system for the cutting temperature, and the study of data transmission characteristics.

The developed software module makes it possible to obtain a quantitative assessment of data transmission quality at the design stage of a cyber-physical production system.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9

Вступ 10

1 Аналіз кібер-фізичних виробничих систем та методів передавання даних 12

1.1 Аналіз архітектур кібер-фізичних виробничих систем 12

1.2 Аналіз виробничих процесів та вибір об'єкта дослідження 13

1.3 Аналіз протоколів передавання даних у виробничих системах 16

1.4 Аналіз показників якості передавання інформації 19

1.5 Аналіз мережевих стандартів та формування вимог до модуля 21

2 Вибір обладнання та визначення параметрів системи 24

2.1 Структурна схема системи 24

2.2 Вибір сенсорів для моніторингу ЧПК верстата 25

2.2.1 Вибір акселерометра 25

2.2.2 Вибір термопари 26

2.2.3 Вибір датчика струму 27

2.2.4 Вибір енкодера 28

3 Розроблення програмного модуля 32

3.1 Вибір середовища розробки та інструментів 32

3.2 Архітектура програмного модуля 33

3.2.1 Блок-схеми алгоритмів програмних скриптів 33

3.3 Перевірка стійкості системи керування 36

3.3.1 Математична модель об'єкта керування 36

3.3.2 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора 37

3.3.3 Порівняння з методом налаштування Зіглера–Нікольса 37

3.3.4 Аналіз перехідного процесу 40
3.3.5 Аналіз стійкості за діаграмою Боде 41
3.3.6 Аналіз стійкості за годографом Найквіста 42
3.4 Реалізація модуля передавання даних 43
3.5 Дослідження характеристик передавання 44
3.5.1 Аналіз залежності пропускної здатності 45
3.5.2 Аналіз коефіцієнта втрат пакетів 46
3.5.3 Аналіз затримок передавання 47
3.6 Розширене дослідження характеристик передавання 48
3.6.1 Дослідження впливу пропускної здатності каналу 48
3.6.2 Дослідження впливу рівня якості обслуговування 49
3.6.3 Дослідження впливу розміру пакету 51
3.6.4 Узагальнення результатів дослідження 53
3.7 Охорона праці 54
3.7.1 Аналіз шкідливих та небезпечних чинників 54
3.7.2 Заходи з нормалізації умов праці 54
3.7.3 Охорона праці при впровадженні системи 55
Висновки 56
Перелік джерел посилання 58
Додаток А Код програмного модуля для розрахунку швидкості передавання інформації в CPPS 60
Додаток Б Демонстраційний матеріал 68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКІТ – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ЛАФХ – логарифмічні амплітудно-фазові характеристики;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ТАУ – теорія автоматичного управління;

ЧПК – числове програмне керування;

API (Application Programming Interface) – програмний інтерфейс застосунку;

CPPS (Cyber-Physical Production Systems) – кібер-фізичні виробничі системи;

IIoT (Industrial Internet of Things) – промисловий інтернет речей;

IoT (Internet of Things) – інтернет речей;

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легкий протокол для телеметрії;

MTU (Maximum Transmission Unit) – максимальний розмір пакета в мережі;

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – промисловий протокол обміну даними;

PLR (Packet Loss Ratio) – коефіцієнт втрат пакетів;

QoS (Quality of Service) – якість обслуговування в мережах;

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система моніторингу та збору даних;

URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) – наднадійний зв'язок з низькою затримкою.

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості характеризується активним впровадженням концепції четвертої промислової революції – Industrie 4.0. Її ключовим елементом є кібер-фізичні виробничі системи (CPPS), що забезпечують інтеграцію фізичних виробничих процесів із цифровими інформаційними технологіями [1, 2]. Ефективне функціонування таких систем безпосередньо залежить від якості та швидкості передавання даних між сенсорами, системами граничних обчислень та рівнями керування [3].

У реальних виробничих умовах канал передавання даних піддається впливу різноманітних чинників: електромагнітних завад від промислового обладнання, нестабільності бездротового з'єднання та перевантаження мережевої інфраструктури при збільшенні кількості підключених пристроїв. Результатом є наскрізні затримки, втрати пакетів та зниження пропускної здатності, що може призвести до некоректного керування технологічним процесом та погіршення якості продукції.

Актуальність теми роботи обумовлена тим, що, незважаючи на значну кількість досліджень у галузі edge computing та промислового IoT, загальнодоступні програмні засоби для кількісного оцінювання характеристик передавання інформації в CPPS з урахуванням змінного навантаження каналу залишаються практично відсутніми. Існуючі підходи, як правило, розглядають передавання даних окремо від системи керування, не враховуючи вплив затримки передавання на стійкість контуру регулювання виробничого процесу.

Метою даної роботи є підвищення якості передавання інформації в кібер-фізичній системі за рахунок розроблення програмного модуля для розрахунку та аналізу швидкості передавання інформації в кібер-фізичній виробничій системі.

Об'єктом розробки є процеси передавання інформації в кібер-фізичній виробничій системі на базі фрезерного верстата з числовим програмним керуванням.

Предметом розробки є програмний модуль для розрахунку швидкості передавання інформації, моделювання втрат пакетів та аналізу затримок у каналі зв'язку кібер-фізичної виробничої системи.

Реалізація даної системи сприяє досягненню Цілей Сталого Розвитку, зокрема ЦСР 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» через впровадження інноваційних технологій моніторингу у виробничі процеси.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати структуру кібер-фізичних виробничих систем, визначити виробничий процес та параметри, що підлягають моніторингу;

– виконати вибір та обґрунтування сенсорів для збирання технологічних даних з ЧПК верстата;

– обрати систему керування на базі граничних обчислень (edge computing) та протоколи передавання даних;

– перевірити стійкість системи автоматичного керування виробничим процесом методами теорії автоматичного управління;

– розробити програмний модуль, який моделює передавання потоку сенсорних даних із заданими параметрами та розраховує показники якості: пропускну здатність, коефіцієнт втрат пакетів та затримку;

– провести експериментальне дослідження залежності показників передавання від зміни кількості пакетів та їх розміру.

Кваліфікаційна робота оформлена відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [4] та методичних вказівок з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра [5].

1 АНАЛІЗ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

1.1 Аналіз архітектур кібер-фізичних виробничих систем

Четверта промислова революція, відома як Industrie 4.0, – це концепція розвитку виробництва, що передбачає об'єднання фізичного обладнання, цифрових технологій та мережі Інтернет речей (IoT) в єдину інтелектуальну систему. Вперше концепцію представила Німеччина у 2011 році як стратегію модернізації промисловості. Її центральним елементом є кібер-фізичні виробничі системи (CPPS) – системи, в яких фізичні об'єкти (верстати, сенсори, виконавчі механізми) безперервно взаємодіють з їхніми цифровими відповідниками у кіберпросторі, утворюючи єдине інтелектуальне середовище [1, 2].

CPPS є обов'язковою передумовою для реалізації онлайн-моніторингу, візуалізації та керування у системах розумного виробництва. Ключовою відмінністю CPPS від традиційних систем автоматизації є наявність двонаправленого зв'язку в реальному часі між фізичними пристроями та цифровими моделями, що дозволяє здійснювати предиктивне технічне обслуговування та адаптивне керування [1].

Архітектура CPPS будується за трирівневою схемою. Перший рівень – рівень польових пристроїв – включає сенсори, давачі та виконавчі механізми. Другий рівень – рівень граничних обчислень (edge computing) – забезпечує первинну обробку та агрегацію даних на проміжному обчислювальному вузлі поблизу джерела даних. Третій рівень – рівень хмарних та корпоративних сервісів – містить системи MES, ERP, SCADA та аналітичні платформи [2]. Загальну архітектуру CPPS наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Трирівнева архітектура кібер-фізичної виробничої системи

Основним показником якості CPPS є наскрізна затримка – час від виникнення події на фізичному об'єкті до формування керуючого впливу. Вона складається з затримки передавання, затримки поширення сигналу, затримки черги та затримки обробки на вузлах [3]. Мінімізація сумарної затримки є центральним завданням при проектуванні програмного модуля даної роботи.

1.2 Аналіз виробничих процесів та вибір об'єкта дослідження

Кібер-фізичні виробничі системи можуть будуватись на базі різних типів технологічного обладнання. Для вибору найбільш доцільного об'єкта дослідження проведено порівняльний аналіз чотирьох типів верстатів з числовим програмним

керуванням (ЧПК) за критеріями, що безпосередньо впливають на дослідження передавання даних. Результати порівняння наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз типів верстатів з ЧПК як об'єктів CPPS

Критерій оцінювання	Фрезерний	Токарний	Шліфувальний	Свердлильний
Кількість сенсорів	4–6	3–5	3–4	1–2
Частота дискретизації	до 10000 Гц	до 5000 Гц	до 50000 Гц	до 1000 Гц
Навантаження на канал	Високе (оптим.)	Середнє	Надмірно високе	Низьке
Стандарт IIoT	OPC-UA umati	OPC-UA umati	Відсутній	Відсутній

На основі аналізу таблиці 1.1 зроблено такі висновки. Токарний верстат генерує менш різноманітний потік даних, оскільки обробка відбувається переважно в двох осях. Шліфувальний верстат формує надмірно високий потік даних з частотою до 50 000 Гц, що ускладнює дослідження та математичну модель [5]. Свердлильний верстат має найменшу кількість сенсорів і найнижче навантаження на канал, що робить його непридатним для дослідження характеристик передавання.

Фрезерний верстат з ЧПК обрано як об'єкт дослідження з причини того, що він генерує достатньо різноманітний потік сенсорних даних з частотою до 10 000 Гц. Обробка виконується одночасно у трьох координатних осях, тому дані знімаються з кількох незалежних каналів, що робить потік інформації насиченим і придатним для дослідження. Такий верстат широко застосовується у машинобудуванні для виготовлення деталей складної форми і є типовим представником обладнання, що інтегрується у кібер-фізичні виробничі системи. Зовнішній вигляд фрезерного верстата з ЧПК наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд фрезерного верстата з числовим програмним керуванням

Під час фрезерування алюмінієвої деталі з верстата знімаються такі технологічні параметри: вібрація шпинделя (ознака зносу різального інструменту), температура зони різання (ознака теплових деформацій заготовки), оберти шпинделя (контроль режиму різання) та струм двигунів осей (навантаження на механічну частину). Температура в зоні різання може сягати 400–600 °C, тому своєчасна передача даних є критично важливою для якості обробки. Перелік сенсорів наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Сенсори для моніторингу технологічних параметрів ЧПК верстата

Сенсор	Модель	Вимірюваний параметр	Частота дискрет.
Акселерометр	ADXL345 / PCB 356A	Вібрація шпинделя	до 3200 Гц
Термопара	Type-K + MAX31855	Температура зони різання	4 Гц

Продовження таблиці 1.2

Сенсор	Модель	Вимірюваний параметр	Частота дискрет.
Енкодер	Incremental 1024 PPR	Оберти шпинделя	реального часу
Датчик струму	ACS712	Струм двигунів осей	до 1000 Гц

З таблиці 1.2 видно, що акселерометр формує найбільший потік даних серед усіх сенсорів. При частоті дискретизації 10 000 Гц та розмірі одного вимірювання 4 байти (тип float32) потік одного каналу акселерометра становить 40 кБ/с. При трьох осях вимірювання (X, Y, Z) загальний потік сягає 120 кБ/с, або 960 кбіт/с. Це значення визначає мінімально необхідну пропускну здатність каналу зв'язку для забезпечення повної передачі вібраційних даних.

1.3 Аналіз протоколів передавання даних у виробничих системах

Вибір протоколу передавання даних безпосередньо визначає затримку, накладні витрати на пакет, надійність доставки та сумісність з промисловим обладнанням. У сучасних виробничих системах найбільш поширеними є протоколи MQTT та OPC-UA, а також їхня комбінація з використанням специфікації Sparkplug B [6].

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легкий протокол з моделлю «публікація-підписка», розроблений для пристроїв з обмеженими ресурсами та ненадійними мережами. Сенсор публікує дані у певний «канал» (топік), а всі зацікавлені підписники отримують ці дані через брокера. Розмір фіксованого заголовка MQTT становить лише 2 байти, що робить протокол оптимальним для передавання високочастотної телеметрії з сенсорів [4]. Схему взаємодії компонентів у моделі публікація-підписка наведено на рисунку 1.3.

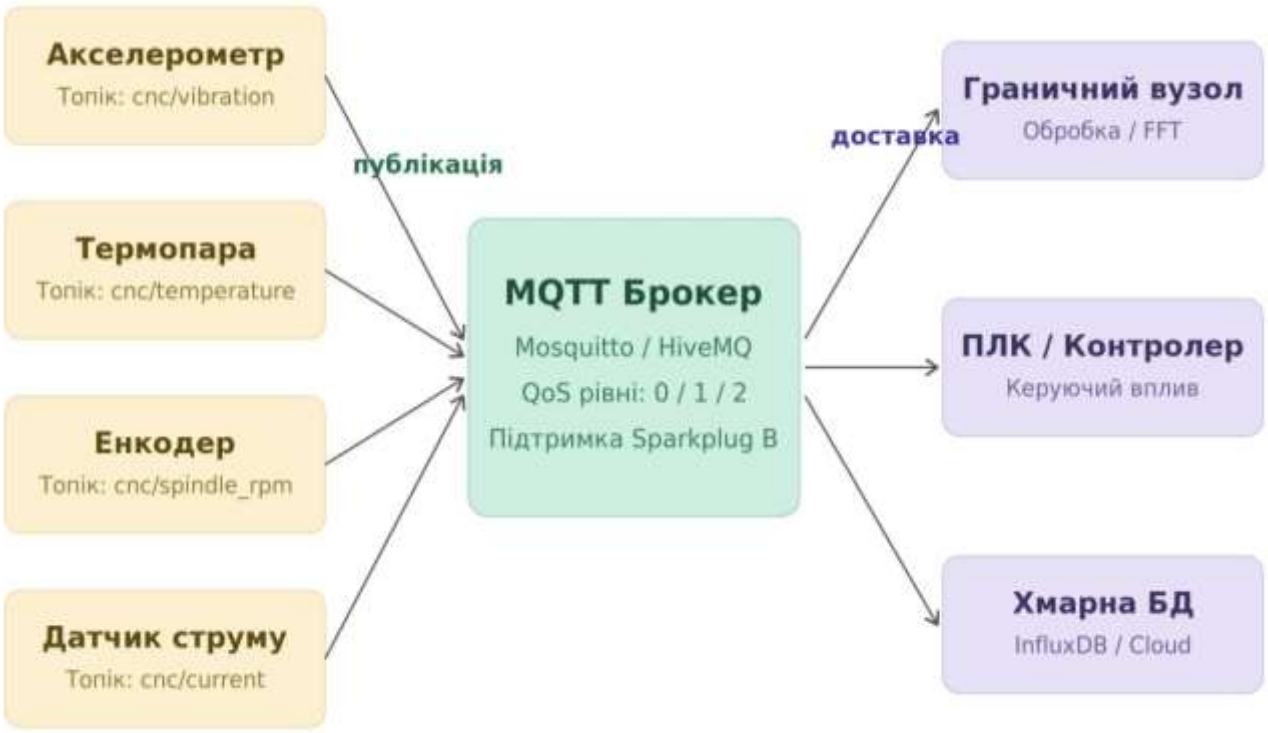


Рисунок 1.3 – Архітектура передавання даних на базі протоколу MQTT (модель публікація–підписка)

Протокол MQTT підтримує три рівні якості обслуговування (QoS). Рівень QoS 0 («щонайбільше один раз») не гарантує доставку пакету та використовується для некритичних даних з високою частотою надходження. Рівень QoS 1 («щонайменше один раз») гарантує доставку з можливим дублюванням та застосовується для важливих технологічних сигналів. Рівень QoS 2 («рівно один раз») гарантує доставку без дублювання та використовується виключно для критичних команд керування.

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – промисловий стандарт для структурованого, безпечного та контекстуалізованого обміну даними між різнорідним обладнанням. На відміну від MQTT, OPC UA містить повну семантичну модель: кожна змінна описується типом даних, одиницею вимірювання та метаданими [6]. Для ЧПК верстатів розроблено специфікацію-супутник OPC-UA for Machine Tools (umati), що стандартизує опис шпинделів, осей та різального інструменту. Схему розподілу протоколів в архітектурі виробничої системи наведено на рисунку 1.4.

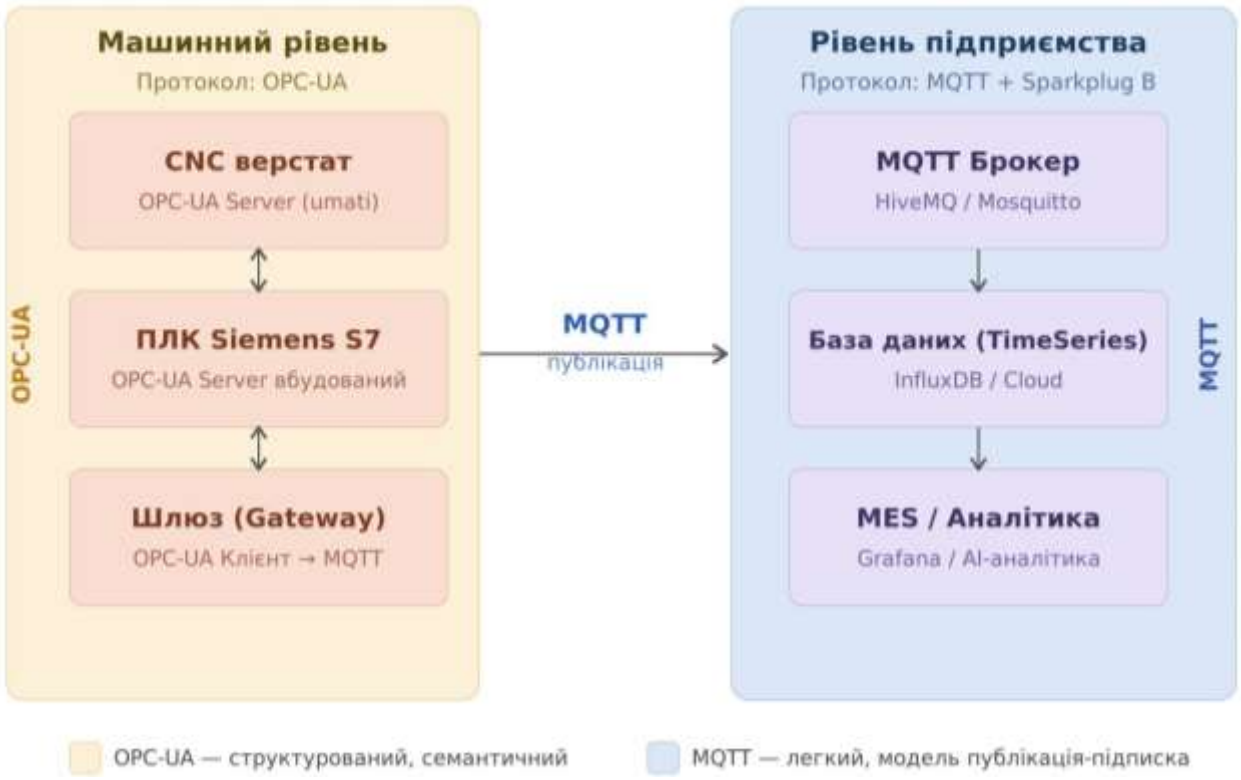


Рисунок 1.4 – Розподіл протоколів OPC-UA та MQTT у архітектурі виробничої CPPS

Специфікація Sparkplug B, ратифікована як міжнародний стандарт ISO/IEC у 2023 році, поєднує переваги обох протоколів: семантичну модель OPC-UA зі збереженням легкості та малого розміру пакетів MQTT. Провідні виробники ПЛК – Siemens, Rockwell, Beckhoff – вже вбудовують OPC-UA сервери безпосередньо у свої контролери [4]. Порівняльний аналіз протоколів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика протоколів передавання даних

Критерій	MQTT	OPC-UA	HTTP/REST
Модель взаємодії	публікація-підписка	клієнт-сервер	запит-відповідь
Розмір заголовка	2 байти	~200 байт	~800 байт
Затримка передавання	< 1 мс	1–10 мс	10–100 мс
Семантика даних	відсутня	повна (типи, одиниці)	часткова (JSON)

Продовження таблиці 1.3

Критерій	MQTT	OPC-UA	HTTP/REST
Рівні QoS	QoS 0 / 1 / 2	Гарантована Доставка	на рівні TCP
Типове застосу-вання	IoT-телеметрія	машинний рівень, ПЛК	веб-сервіси, API

Таким чином, для CPPS на базі ЧПК верстата оптимальною є комбінована архітектура: OPC-UA на машинному рівні для семантичного опису даних верстата та MQTT (Sparkplug B) для передавання телеметрії від граничного вузла до систем вищого рівня.

1.4 Аналіз показників якості передавання інформації

Для кількісного оцінювання ефективності системи передавання даних у CPPS використовується набір показників якості обслуговування (QoS – Quality of Service). Саме ці показники є предметом дослідження у програмному модулі, що розробляється в даній роботі. Перелік показників з формулами розрахунку наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Показники якості передавання даних у CPPS

Показник	Визначення	Формула
Пропускна здатність	Кількість успішно переданих біт за одиницю часу	$T = N \cdot S \cdot \frac{8}{t}$
Коефіцієнт втрат (PLR)	Частка пакетів, що не досягли одержувача	$PLR = \frac{N_{lost}}{N_{sent}}$
Затримка (latency)	Час від відправки до отримання пакету	$L = t_{tx} + t_{prop} + t_{queue}$
Варіація затримки (jitter)	Різниця затримок між послідовними пакетами	$J = \lvert L_i - L_{i-1} \rvert$

Теоретична максимальна пропускна здатність каналу зв'язку визначається за формулою Шеннона (1.1) [7]:

$$C = B \cdot log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right), \quad (1.1)$$

де B – смуга пропускання каналу, Гц;

$\frac{S}{N}$ – відношення потужності сигналу до потужності шуму (у разах).

Формула Шеннона встановлює верхню теоретичну межу швидкості безпомилкового передавання даних. Для промислового каналу Ethernet 100Base-T зі смугою пропускання $B = 100$ МГц та типовим для екранованої кручений пари відношенням сигнал/шум близько 30 дБ ($\frac{S}{N} \approx 1000$) теоретична пропускна здатність значно перевищує реальні потреби CPPS. Це підтверджує, що обмежувальним чинником у промислових мережах є не фізична пропускна здатність каналу, а перевантаження мережевого стеку та черг на проміжних вузлах при зростанні кількості підключених пристроїв [3].

Для моделювання ефекту перевантаження застосовується модель черги M/M/1 з теорії масового обслуговування. У цій моделі пакети надходять до вузла за пуассонівським потоком з інтенсивністю λ (пакетів за секунду), а обслуговуються з інтенсивністю μ. Ключовою величиною є інтенсивність (коефіцієнт) навантаження, що визначається за формулою (1.2):

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (1.2)$$

Середня кількість пакетів у системі та середній час перебування пакета в черзі для моделі M/M/1 зростають за законом (1.3):

$$N_{\text{черги}} = \frac{\rho}{1-\rho}, \quad W_{\text{черги}} = \frac{1}{\mu - \lambda}. \tag{1.3}$$

З формули (1.3) видно принципову особливість системи: при $\rho \to 1$ (тобто коли інтенсивність надходження наближається до інтенсивності обслуговування) знаменник прямує до нуля, а середня довжина черги та затримка зростають необмежено. Фізично це означає насичення каналу: буфери переповнюються, нові пакети відкидаються, і коефіцієнт втрат пакетів PLR різко зростає. Саме цей режим унеможливлює нормальне керування виробничим процесом [3].

Наведена теоретична модель безпосередньо пояснює результати практичного дослідження у розділі 3: штучно збільшуючи кількість та розмір пакетів у програмному модулі, ми підвищуємо ефективне навантаження ρ і спостерігаємо перехід системи від стабільного режиму ($\rho < 1$) до насичення ($\rho \to 1$) з характерним різким зростанням затримки та втрат.

1.5 Аналіз мережевих стандартів та формування вимог до модуля

Для передавання даних у CPPS застосовуються різні фізичні мережеві середовища. Вибір середовища передавання безпосередньо визначає максимальну пропускну здатність каналу та стійкість до промислових електромагнітних завад. Порівняльний аналіз середовищ наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз мережевих середовищ передавання для CPPS

Параметр	Ethernet 100Base-T	Wi-Fi 802.11n	Profinet	EtherCAT
Швидкість	100 Мбіт/с	до 300 Мбіт/с	100 Мбіт/с	100 Мбіт/с
Затримка	< 1 мс	2–50 мс	< 1 мс	< 100 мкс

Продовження таблиці 1.5

Параметр	Ethernet 100Base-T	Wi-Fi 802.11n	Profinet	EtherCAT
Стійкість до завад	висока	низька	висока	висока
Стандарт	IEEE 802.3	IEEE 802.11	IEC 61158	IEC 61158

З таблиці 1.5 видно, що для підключення ЧПК верстата до граничного вузла найбільш доцільним є Ethernet 100Base-T: він забезпечує достатню пропускну здатність для передавання всіх сенсорних потоків, має низьку затримку менше 1 мс та високу стійкість до електромагнітних завад від шпинделя та двигунів верстата [3].

На основі проведеного аналізу сформовано технічні вимоги до програмного модуля. Функціональні вимоги: генерувати потоки пакетів даних із заданими параметрами; симулювати передавання пакетів через канал із заданою пропускною здатністю та ймовірністю втрат; розраховувати показники якості передавання; будувати графіки залежності показників QoS від параметрів навантаження. Параметричні вимоги: кількість пакетів – від 100 до 10000; розмір пакету – від 8 байт до 1024 байт; пропускна здатність каналу – від 100 кбіт/с до 100 Мбіт/с; ймовірність втрат – від 0 до 10 %. Зведені вимоги наведено у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Зведені вимоги до програмного модуля

Вимога	Значення	Обґрунтування
Кількість пакетів	100 – 10 000 шт.	Від статистики до насичення каналу
Розмір пакету	8 – 1 024 байт	Від заголовка MQTT до MTU Ethernet
Пропускна здатність	100 кбіт/с – 100 Мбіт/с	Реальні промислові мережі
Допустиме PLR	не більше 0,1 %	Вимоги пром. IoT реального часу
Максимальна затримка	50 мс	Вимоги URLLC для CPPS [3]

Таким чином, проведений аналіз дозволив обґрунтувати вибір фрезерного верстата з ЧПК як об'єкта дослідження, визначити перелік сенсорів та оцінити потік даних, встановити, що оптимальною архітектурою є комбінація OPC-UA + MQTT (Sparkplug B), та визначити показники QoS, що досліджуватимуться у програмному модулі. Сформовані вимоги є основою для розроблення практичної частини роботи.

2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

2.1 Структурна схема системи

Для дослідження характеристик передавання даних у CPPS необхідно чітко визначити, що є джерелом даних, по якому каналу вони передаються і де аналізуються. Структурно система складається з трьох блоків: сенсори на ЧПК верстаті, що генерують потік вимірювань; мережевий канал, через який ці дані передаються; програмний модуль у MATLAB, що отримує дані та розраховує показники якості передавання.

Сенсори підключені до верстата та безперервно вимірюють технологічні параметри. Дані передаються по протоколу MQTT через канал Ethernet до комп'ютера з MATLAB. Програмний модуль у MATLAB підписується на MQTT-топіки, отримує пакети даних та вимірює: скільки пакетів дійшло, скільки загубилось, яка була затримка. Саме цей модуль і є основним результатом практичної частини роботи. Структурну схему системи наведено на рисунку 2.1.

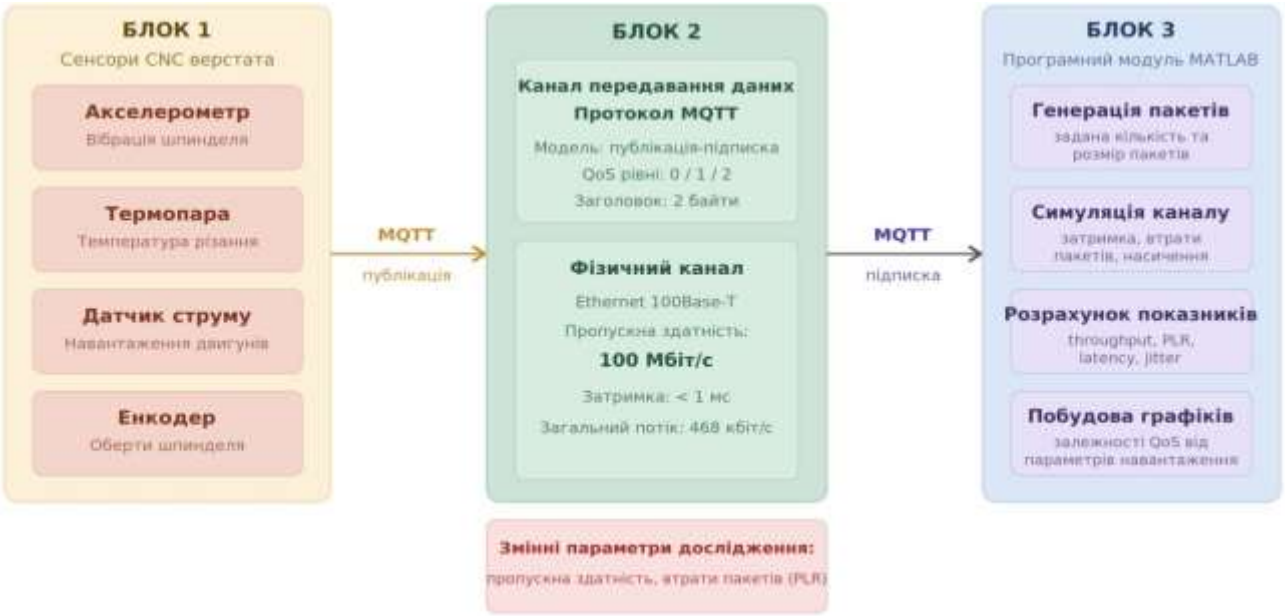


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи для дослідження передавання даних у CPPS

На рисунку 2.1 показано три основні блоки: блок сенсорів (генерують потік даних), мережевий канал MQTT/Ethernet (середовище передавання) та MATLAB-модуль (аналіз якості передавання). Стрілки показують напрямок потоку даних від верстата до аналізатора. Параметри мережевого каналу (пропускна здатність, ймовірність втрат пакетів) є змінними величинами в дослідженні.

2.2 Вибір сенсорів для моніторингу ЧПК верстата

Для того щоб MATLAB-модуль моделював реалістичний потік даних, необхідно визначити конкретні сенсори, їхні параметри та частоти дискретизації. Ці значення стануть вхідними параметрами програмного модуля: кількість пакетів за секунду та розмір кожного пакету.

2.2.1 Вибір акселерометра

Акселерометр вимірює вібрацію шпинделя і формує найбільший потік даних серед усіх сенсорів – саме він визначає мінімально необхідну пропускну здатність каналу. Порівняльний аналіз трьох моделей акселерометрів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз акселерометрів

Характеристика	ADXL345	PCB 356A	MPU-6050
Діапазон вимірювань	±2/±4/±8/±16 g	±50 g	±2/±4/±8/±16 g
Частота дискретизації	до 3200 Гц	до 10000 Гц	до 1000 Гц
Інтерфейс	SPI / I²C	аналоговий	SPI / I²C
Буфер FIFO	32 рівні	відсутній	1024 байти
Вартість	низька	висока	низька

З таблиці 2.1 акселерометр ADXL345 є оптимальним вибором: достатня частота дискретизації 3 200 Гц для виявлення дефектів підшипників, вбудований буфер FIFO для пакетного зчитування даних та низька вартість. Зовнішній вигляд модуля наведено на рисунку 2.2.

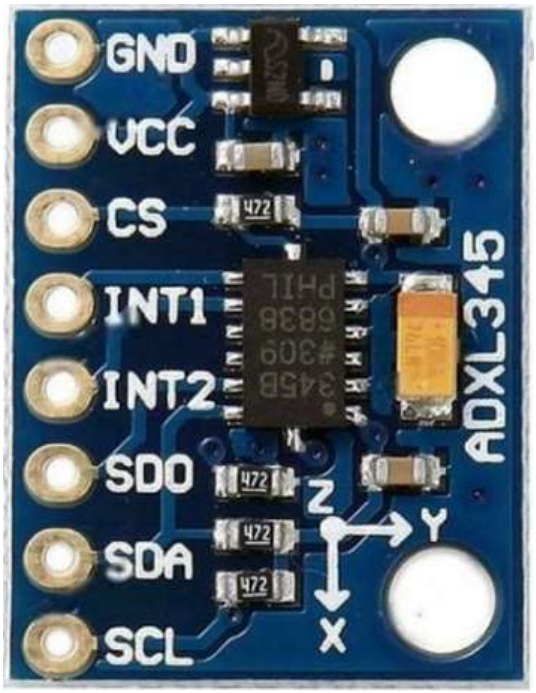


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд модуля акселерометра ADXL345

2.2.2 Вибір термопари

Термопара вимірює температуру зони різання. Перевищення допустимого значення (500–600 °C для алюмінію) призводить до теплових деформацій деталі. Порівняльний аналіз наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз засобів вимірювання температури

Характеристика	Type-K + MAX31855	Type-J + AD595	PT100 + MAX31865
Діапазон температур	−200…+1350 °C	−210…+760 °C	−200…+850 °C
Точність	±2 °C	±3 °C	±0,1 °C
Інтерфейс	SPI	аналоговий	SPI
Частота оновлення	4 Гц	безперервно	до 50 Гц
Вартість	низька	середня	висока

Термопара Type-K з модулем MAX31855 перекриває весь робочий діапазон температур фрезерування, має цифровий вихід SPI та найнижчу вартість. Зовнішній вигляд наведено на рисунку 2.3.

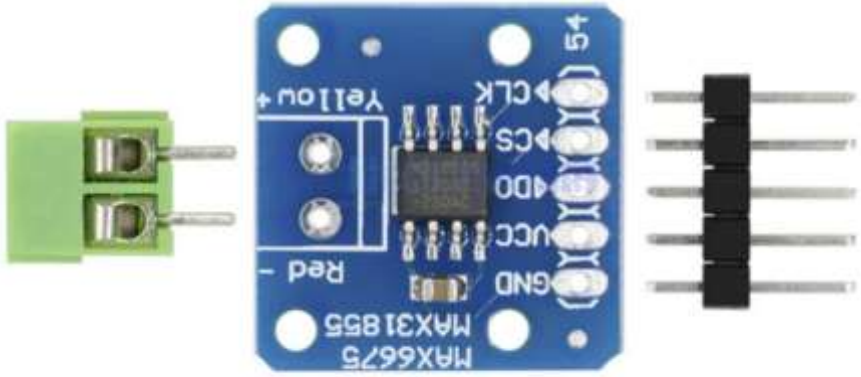


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд модуля термопари Type-K з перетворювачем MAX31855

2.2.3 Вибір датчика струму

Датчик струму контролює навантаження на двигуни осей X, Y, Z. Різке зростання струму – ознака затуплення різального інструменту. Порівняльний аналіз наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз датчиків струму

Характеристика	ACS712 (20A)	INA219	ZMCT103C
Діапазон вимірювань	±20 А	±3,2 А	0–5 А
Тип вимірювання	змінний / постій-ний	постійний	змінний
Інтерфейс	аналоговий	I²C	аналоговий
Гальванічна ізоляція	так	ні	так
Вартість	низька	середня	низька

Датчик ACS712 обрано через гальванічну ізоляцію між силовою мережею двигуна та вимірювальною схемою, що захищає систему від промислових перешкод. Зовнішній вигляд наведено на рисунку 2.4.

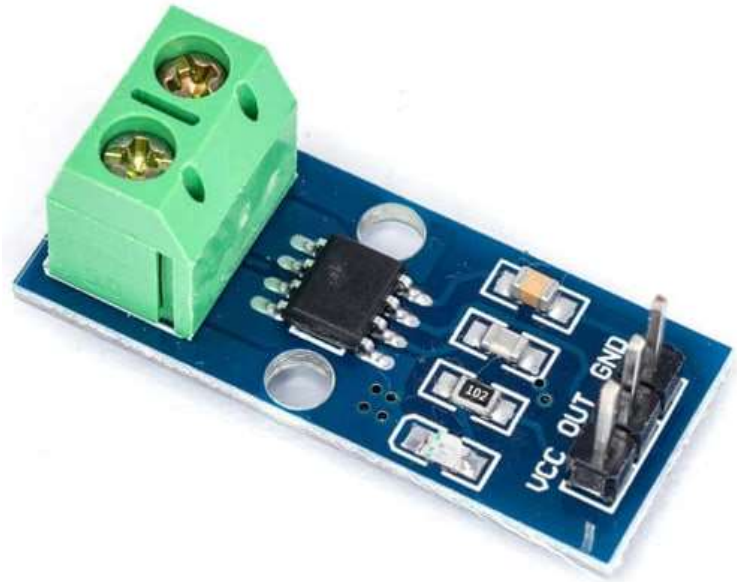


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд модуля датчика струму ACS712

2.2.4 Вибір енкодера

Енкодер вимірює оберти шпинделя та визначає нестабільність швидкості обертання. Порівняльний аналіз наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняльний аналіз енкодерів

Характеристика	Incremental 1024 PPR	Absolute SSI	Magnetic AS5600
Тип виходу	квадратурний A/B/Z	послідовний SSI	I²C / аналог
Роздільна здатність	1024 імп./оберт	4096 позицій/об.	4096 позицій/об.
Макс. оберти	6000 об/хв	3000 об/хв	1500 об/хв
Вартість	низька	висока	низька

Інкрементний енкодер 1 024 PPR забезпечує достатню точність (крок 0,35° при 6 000 об/хв) та найвищу допустиму частоту обертань. Зовнішній вигляд наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд інкрементного енкодера 1024 імп./оберт

2.3 Визначення параметрів потоку даних

Після вибору сенсорів необхідно розрахувати загальний потік даних, що генерується системою. Ці значення є вхідними параметрами для MATLAB-модуля у практичній частині роботи.

Потік від акселерометра ADXL345 при частоті 3 200 Гц та трьох осях (X, Y, Z), розмір вимірювання 4 байти (float32) за формулою (2.1):

$$Q_{acc} = 3200 \cdot 3 \cdot 4 = 38400 \text{ байт/с} = 307 \text{ кбіт/с}. \quad (2.1)$$

Потік від чотирьох датчиків струму (осі X, Y, Z та шпиндель) при частоті 1 000 Гц за формулою (2.2):

$$Q_{cur} = 4 \cdot 1000 \cdot 4 = 16000 \text{ байт/с} = 128 \text{ кбіт/с}. \quad (2.2)$$

Потік від енкодера при 1 000 оновленнях за секунду за формулою (2.3):

$$Q_{enc} = 1000 \cdot 4 = 4000 \text{ байт/с} = 32 \text{ кбіт/с}. \quad (2.3)$$

Потік від термопари (4 Гц) є незначним – менше 1 кбіт/с. Загальний потік від усіх сенсорів:

$$Q_{total} = 307 + 128 + 32 + 1 \approx 468 \text{ кбіт/с}. \quad (2.4)$$

Зведені характеристики всіх вибраних сенсорів та їхній вклад у загальний потік даних наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Зведені параметри сенсорів та потоки даних

Сенсор	Модель	Частота / потік даних	Параметр моніторингу
Акселерометр	ADXL345	3200 Гц / 307 кбіт/с	Вібрація шпинделя
Термопара	Type-K + MAX31855	4 Гц / ~1 кбіт/с	Температура різання
Датчик струму	ACS712	1000 Гц / 128 кбіт/с	Навантаження двигунів
Енкодер	Incremental 1024 PPR	1000 Гц / 32 кбіт/с	Оберти шпинделя
РАЗОМ	–	468 кбіт/с	Вхідний параметр MATLAB

З таблиці 2.5 видно, що акселерометр формує 66 % загального потоку даних. Загальний потік 468 кбіт/с є значно меншим за пропускну здатність каналу Ethernet

100 Мбіт/с. Це означає, що при реальному навантаженні канал не насичується. Тому у MATLAB-модулі досліджуватиметься, що відбувається при штучному збільшенні кількості та розміру пакетів – аж до повного насичення каналу.

2.4 Вибір протоколу та параметрів каналу передавання

Для передавання сенсорних даних від верстата до MATLAB-модуля обрано протокол MQTT, обґрунтування вибору якого наведено у розділі 1. Нагадаємо ключові параметри: розмір заголовка 2 байти, підтримка QoS 0/1/2, модель публікація-підписка.

Як фізичне середовище передавання обрано Ethernet 100Base-T із пропускною здатністю 100 Мбіт/с та затримкою менше 1 мс. Саме ці значення є верхньою межею пропускної здатності каналу у MATLAB-моделі. Для дослідження деградації системи у модулі передбачено можливість задавати знижену пропускну здатність (від 100 кбіт/с) та ймовірність втрат пакетів (від 0 до 10 %).

Таким чином, у розділі 2 визначено: чотири типи сенсорів та їхні конкретні моделі; загальний потік даних від усіх сенсорів – 468 кбіт/с; протокол передавання – MQTT; фізичний канал – Ethernet 100 Мбіт/с.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ

3.1 Вибір середовища розробки та інструментів

Для реалізації програмного модуля обрано середовище MATLAB (Matrix Laboratory) версії R2024. MATLAB є спеціалізованою системою для числових обчислень, математичного моделювання та візуалізації даних, що широко застосовується як в академічному середовищі, так і в промисловості [8].

Вибір MATLAB обумовлений трьома ключовими чинниками. По-перше, середовище містить вбудований Control System Toolbox з готовими функціями для аналізу систем автоматичного керування, зокрема функцію pidtune() для автоматичного розрахунку параметрів ПІД-регулятора. По-друге, MATLAB підтримує інтерактивний режим роботи через функцію input() – користувач вводить параметри з клавіатури. По-третє, вбудовані функції plot(), semilogy() та histogram() забезпечують наочну візуалізацію результатів [8].

Порівняно з Python, MATLAB має суттєву перевагу для задач теорії автоматичного управління: функції step(), bode(), nyquist(), margin() та pidtune() є вбудованими і не потребують встановлення сторонніх бібліотек. Перелік використаних компонентів MATLAB наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Компоненти середовища MATLAB та їх призначення

Компонент	Призначення	Використані функції
MATLAB R2024 (базовий)	Обчислення, симуляція, графіки	input(), rand(), fprintf(), plot(), histogram()
Control System Toolbox	Аналіз систем керування	tf(), pidtune(), feedback(), step(), margin(), nyquist()

3.2 Архітектура програмного модуля

Програмний модуль складається з двох незалежних скриптів: stability_analysis.m для аналізу стійкості системи керування та data_transmission.m для дослідження передавання даних. Такий поділ забезпечує модульність – кожну частину можна запускати та тестувати окремо [8].

Скрипт stability_analysis.m реалізує: інтерактивне введення чотирьох параметрів (K, T1, T2, затримка каналу); автоматичний розрахунок ПІД-регулятора функцією pidtune(); формування замкненої системи; аналіз стійкості; побудову трьох графіків і виведення числових результатів.

Скрипт data_transmission.m реалізує: введення чотирьох параметрів каналу; симуляцію передавання N пакетів; розрахунок показників якості; побудову трьох графіків; перевірку відповідності вимогам промислового IoT реального часу [9]. Обидва скрипти використовують виключно базові функції MATLAB без звернення до зовнішніх файлів.

3.2.1 Блок-схеми алгоритмів програмних скриптів

Логіку роботи кожного зі скриптів наочно демонструють блок-схеми алгоритмів. На рисунку 3.1 наведено блок-схему алгоритму скрипта stability_analysis.m, який виконує лінійну послідовність кроків аналізу стійкості з однією точкою прийняття рішення – перевіркою виконання умов стійкості за запасами. Блок-схема дозволяє простежити порядок виконання операцій алгоритму та зрозуміти логіку його роботи ще до аналізу програмного коду. На схемі прямокутниками позначено обчислювальні операції, паралелограмами – введення та виведення даних, а ромбом – точку прийняття рішення, у якій алгоритм розгалужується залежно від виконання умови. Така форма подання є стандартною для опису алгоритмів і полегшує їх сприйняття. Розглянемо послідовність кроків цього скрипта детальніше.



Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму скрипта stability_analysis.m

Як видно зі схеми, після введення параметрів об'єкта формується його передавальна функція, автоматично розраховуються параметри ПІД-регулятора функцією pidtune(), будується замкнена система, після чого послідовно виконуються три види аналізу: перехідний процес, діаграма Боде та годограф Найквіста. Ключова точка прийняття рішення – перевірка умов стійкості (запас за фазою $\geq 45°$ та запас за амплітудою ≥ 6 дБ); на завершальному етапі оцінюється вплив затримки каналу на залишковий запас стійкості.

На рисунку 3.2 наведено блок-схему алгоритму скрипта data_transmission.m. На відміну від попереднього, цей алгоритм містить основний цикл обробки з двома

вкладеними точками прийняття рішень: перевіркою умови продовження циклу та перевіркою факту втрати пакета.

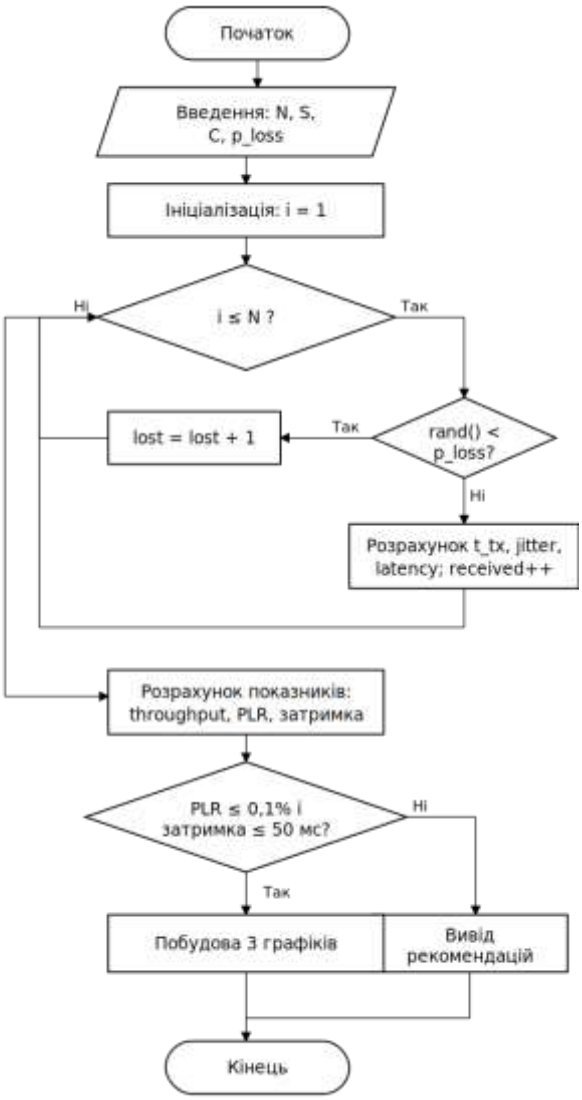


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму скрипта data_transmission.m

Основний цикл виконується для всіх N пакетів. Для кожного пакета генерується випадкове число, яке порівнюється з ймовірністю втрати p_loss: якщо пакет втрачено, збільшується лічильник втрат і цикл переходить до наступної ітерації; якщо доставлено – розраховується час передавання та затримка, після чого пакет зараховується як отриманий. Після завершення циклу обчислюються підсумкові

показники якості, перевіряється їх відповідність вимогам стандартів, а у разі невиконання формуються рекомендації. Завершальний етап – побудова трьох графіків залежностей.

3.3 Перевірка стійкості системи керування

Перевірка стійкості системи автоматичного керування температурою зони різання є обов'язковим етапом проектування CPPS. Нестабільна температура різання призводить до теплових деформацій алюмінієвої заготовки та прискореного зносу різального інструменту. Аналіз виконано у скрипті stability_analysis.m [1].

3.3.1 Математична модель об'єкта керування

Теплова динаміка зони різання описується передавальною функцією двоінерційного об'єкта другого порядку. Такий тип моделі є стандартним для теплових процесів з двома послідовними інерційними елементами – заготовкою та зоною контакту інструменту з матеріалом [1]:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \qquad (3.1)$$

де $K = 2{,}5$ – коефіцієнт підсилення;

$T_1 = 3\ \text{с}$ – стала часу теплової інерції заготовки;

$T_2 = 0{,}5\ \text{с}$ – стала часу теплової інерції зони різання.

Фізичний зміст параметрів. Перша інерційна ланка з $T_1 = 3\ \text{с}$ відповідає тепловій інерції алюмінієвої заготовки в цілому. Алюміній має відносно невисоку теплоємність (900 Дж/(кг·К)), однак маса заготовки значно більша за масу зони різання, тому вона нагрівається повільно. Друга ланка з $T_2 = 0{,}5\ \text{с}$ описує значно швидшу теплову динаміку безпосередньо зони контакту інструменту з матеріалом – невеликої ділянки, де виділяється основна теплова енергія різання [1].

Коефіцієнт підсилення $K = 2{,}5$ показує, що при одиничному керуючому впливі температура зони різання змінюється в 2,5 рази відносно початкового рівня. Це значення є типовим для фрезерування алюмінієвих сплавів при швидкості різання 200–400 м/хв [1].

3.3.2 Розрахунок параметрів ПІД-регулятора

Параметри ПІД-регулятора розраховуються автоматично функцією pidtune() з Control System Toolbox. Функція мінімізує інтегральну квадратичну похибку і забезпечує необхідні запаси стійкості. Для об'єкта з $K = 2{,}5$; $T_1 = 3$ с; $T_2 = 0{,}5$ с отримано: $Kp = 0{,}7546$; $Ti = 2{,}0779$ с; $Td = 0{,}4369$ с.

Фізичний зміст складових. Пропорційна складова $Kp = 0{,}7546$ реагує на поточну похибку між заданою та фактичною температурою. Інтегральна складова з $Ti = 2{,}0779$ с накопичує похибку з часом і усуває статичну похибку. Диференційна складова з $Td = 0{,}4369$ с реагує на швидкість зміни похибки і запобігає перерегулюванню [8].

Кількісне порівняння отриманих параметрів з класичним методом Зіглера–Нікольса наведено далі у підрозділі 3.3.3.

3.3.3 Порівняння з методом налаштування Зіглера–Нікольса

Для обґрунтування вибору функції автоматичного налаштування pidtune() доцільно порівняти отримані параметри регулятора з класичним інженерним методом налаштування ПІД-регуляторів – методом Зіглера–Нікольса [9]. Це дозволяє кількісно оцінити перевагу обраного підходу.

Класичний метод Зіглера–Нікольса за критичним підсиленням для об'єкта другого порядку без транспортного запізнення є формально незастосовним. Це пов'язано з тим, що фазова частотна характеристика такого об'єкта досягає значення −180° лише асимптотично (при $\omega \to \infty$), а отже критичне підсилення $K_{\text{кр}}$ є нескін-

ченним і критичний період $T_{кр}$ не визначається. Тому для налаштування застосовано другий метод Зіглера–Нікольса – метод кривої розгону (реакції на одиничний ступінчастий вплив).

Метод кривої розгону апроксимує об'єкт керування ланкою першого порядку із запізненням (модель FOPDT) вигляду $K \cdot \frac{e^{-Ls}}{Ts+1}$, де параметри визначаються за дотичною, проведеною в точці перегину перехідної характеристики. Для досліджуваного об'єкта отримано: коефіцієнт підсилення $K = 2{,}5$; еквівалентне запізнення $L = 0{,}282$ с; еквівалентна стала часу $T = 4{,}293$ с. За таблицею налаштування Зіглера–Нікольса для ПІД-регулятора параметри розраховуються за формулами (3.2):

$$Kp = 1{,}2 \cdot \frac{T}{K \cdot L}; \quad Ti = 2L; \quad Td = 0{,}5L. \tag{3.2}$$

Підставивши отримані значення, маємо параметри регулятора за методом Зіглера–Нікольса: $Kp = 7{,}3032$; $Ti = 0{,}5643$ с; $Td = 0{,}1411$ с. Порівняння показників якості перехідного процесу для обох методів налаштування наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння методів налаштування ПІД-регулятора

Показник	Зіглер–Нікольс	pidtune()	Вимога
Kp	7,3032	0,7546	–
Ti, с	0,5643	2,0779	–
Td, с	0,1411	0,4369	–
Перерегулювання σ, %	43,4	6,7	≤ 20
Час встановлення t_п, с	4,44	9,54	–
Час наростання t_н, с	0,34	2,72	–

З таблиці 3.2 видно принциповий компроміс між двома методами. Метод Зіглера–Нікольса забезпечує значно швидшу реакцію системи (час наростання 0,34 с проти 2,72 с), проте ціною надмірного перерегулювання 43,4 %, яке більш ніж удвічі перевищує допустиму межу 20 %. У реальній системі керування температурою різання таке перерегулювання означало б короткочасне перевищення допустимої температури на понад 40 %, що призвело б до теплової деформації алюмінієвої заготовки та браку деталі.

Функція pidtune(), навпаки, забезпечує перерегулювання лише 6,7 % – у 3 рази менше допустимого значення – за рахунок дещо повільнішого перехідного процесу. Для теплових процесів, де швидкодія не є критичною, а важлива відсутність перевищень, такий компроміс є оптимальним. Візуальне порівняння перехідних процесів обох методів наведено на рисунку 3.7.

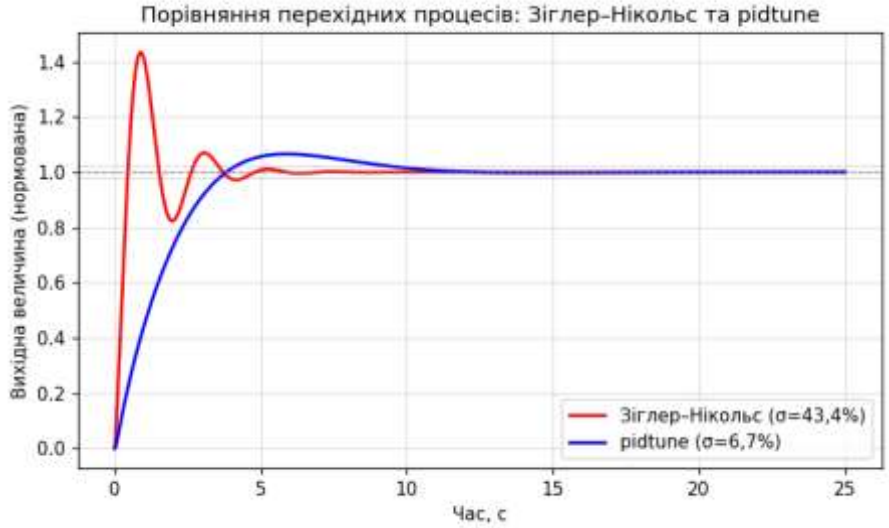


Рисунок 3.3 – Порівняння перехідних процесів для методів Зіглера–Нікольса та pidtune()

З рисунку 3.7 наочно видно поведінку обох систем: крива методу Зіглера–Нікольса (червона) швидко досягає завдання, але має значний викид та коливання, тоді як крива pidtune() (синя) виходить на завдання плавно, практично без переви-

щення. Це підтверджує обґрунтованість вибору функції pidtune() як основного методу налаштування регулятора у даній роботі, оскільки перевагу віддано якості регулювання та захисту заготовки від перегріву, а не максимальній швидкодії.

3.3.4 Аналіз перехідного процесу

Перехідний процес замкненої системи побудовано командою step(W_closed). Графік показує реакцію системи на одиничний ступінчастий задавальний вплив – як температура зони різання змінюється у часі після встановлення нового завдання. Перехідний процес наведено на рисунку 3.8.

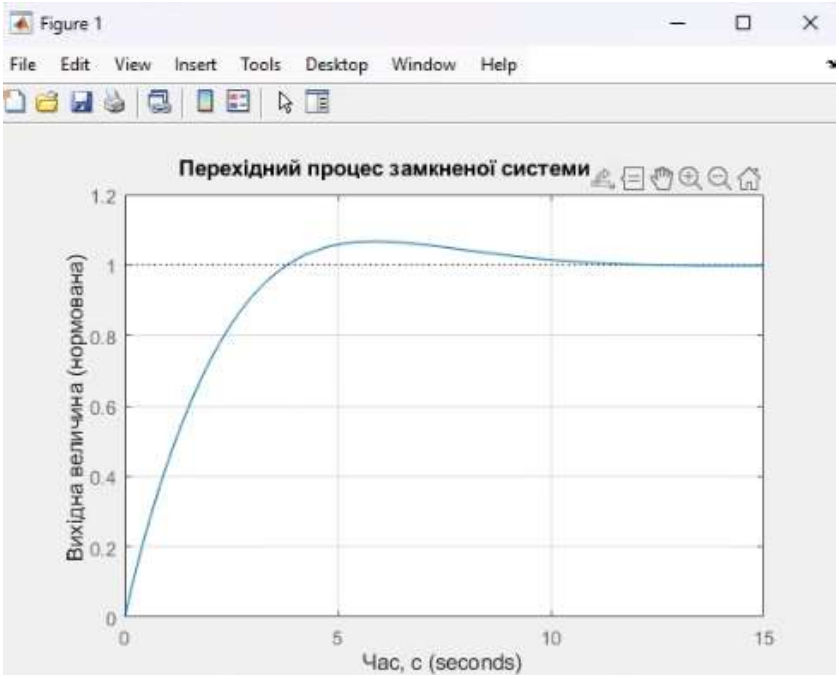


Рисунок 3.4 – Перехідний процес замкненої системи керування температурою різання

За результатами аналізу отримано такі показники якості перехідного процесу. Час наростання $t_{\text{н}} = 2{,}72$ с – час, за який вихідна величина зростає від 10% до 90% від кінцевого значення. Час встановлення $t_{\text{п}} = 9{,}54$ с – час, після якого відхилення від кінцевого значення не перевищує ± 2 %. Перерегулювання $\sigma = 6{,}7$ % – максимальне перевищення кінцевого значення у відсотках [3].

Перерегулювання 6,7% є прийнятним для теплових систем. Для порівняння: при налаштуванні ПІД методом Зіглера-Нікольса для того самого об'єкта отримано перерегулювання 43,4 % – майже в 6,5 разів більше. Використання функції pidtune() дозволило уникнути цього ризику. Система повністю стабілізується в межах 10 секунд після зміни задавального значення, що є достатнім для практичного застосування.

3.3.5 Аналіз стійкості за діаграмою Боде

Логарифмічні амплітудно-фазові характеристики (ЛАФХ) розімкненої системи побудовано командою margin(W_open). Діаграма Боде складається з двох частин: верхня – логарифмічна амплітудна характеристика (ЛАХ) у дБ, нижня – логарифмічна фазова характеристика (ЛФХ) у градусах. ЛАФХ наведено на рисунку 3.5 [3].

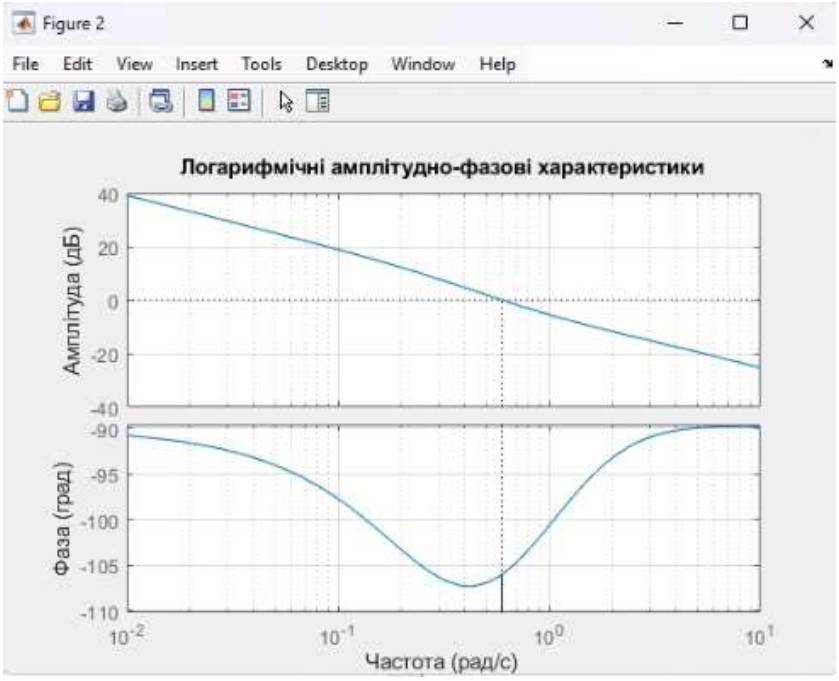


Рисунок 3.5 – Логарифмічні амплітудно-фазові характеристики розімкненої системи

MATLAB автоматично визначає та відображає на графіку запаси стійкості. Запас за фазою φ_m = 74,0° – це додатковий фазовий зсув, який система може витримати перед початком нестійкості. Вимірюється на частоті зрізу ω = 0,316 рад/с, де ЛАХ перетинає рівень 0 дБ. Отримане значення 74,0° значно перевищує мінімально допустиме значення 45°, що вказує на високу робастність системи [3].

Запас за амплітудою L_m = Inf дБ означає, що система може витримати нескінченне збільшення підсилення без втрати стійкості. Це пояснюється характером двоінерційного об'єкта: фазова характеристика розімкненої системи з ПІД-регулятором прагне до -90° при великих частотах і ніколи не досягає критичного значення -180°. Практичне значення великого запасу за фазою полягає в тому, що система залишається стійкою навіть при суттєвому погіршенні характеристик каналу передавання даних.

3.3.6 Аналіз стійкості за годографом Найквіста

Годограф Найквіста (АФХ – амплітудно-фазова характеристика) розімкненої системи побудовано командою nyquist(W_open). Годограф є кривою W(jω) на комплексній площині при зміні частоти ω від 0 до ∞. АФХ наведено на рисунку 3.6 [3].

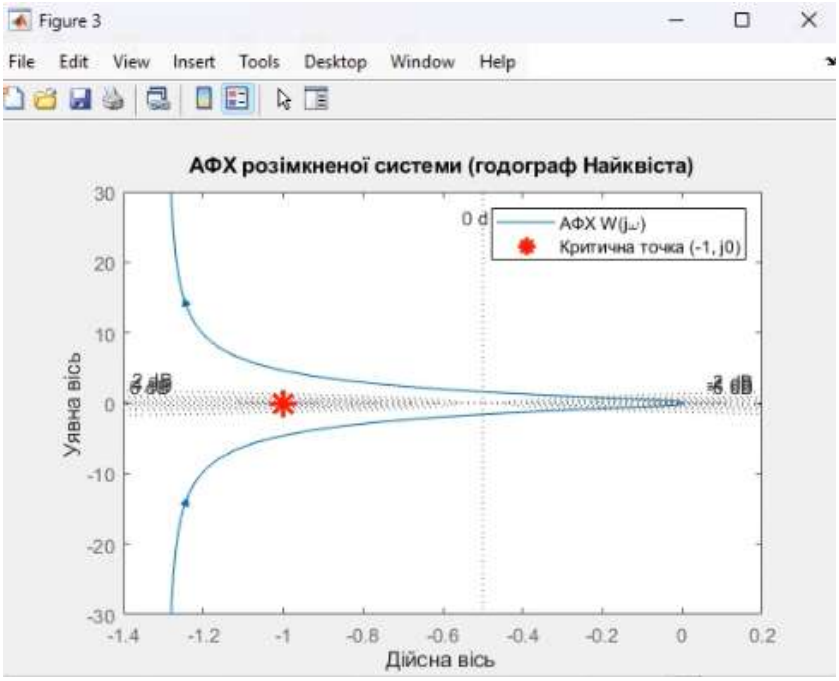


Рисунок 3.6 – АФХ розімкненої системи (годограф Найквіста)

Критерій Найквіста формулюється так: замкнена система стійка, якщо годограф розімкненої системи не охоплює критичну точку (-1, j0). З рисунку 3.3 видно, що годограф починається у точці (K, 0) = (2,5, 0) при ω = 0 та наближається до початку координат при ω → ∞. Крива проходить правіше від критичної точки і не охоплює її. Це підтверджує стійкість замкненої системи за критерієм Найквіста та повністю узгоджується з результатами аналізу діаграми Боде.

Зведені результати аналізу стійкості системи керування наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати аналізу стійкості системи керування

Показник	Отримане значення	Вимога
Запас за фазою φ_m	74,0°	≥ 45°
Запас за амплітудою L_m	Inf дБ	≥ 6 дБ
Перерегулювання σ	6,7 %	≤ 20 %
Час встановлення t_п	9,54 с	–
Залишковий запас (затримка 50 мс)	72,3°	≥ 45°

З таблиці 3.3 видно, що всі отримані показники задовольняють встановленим вимогам. Система керування є стійкою і якісно налаштованою: перерегулювання 6,7 % у 3 рази менше допустимого значення 20 %, запас за фазою 74,0° у 1,6 рази перевищує мінімально необхідне значення 45°. Навіть при максимальній затримці каналу передавання 50 мс залишковий запас за фазою 72,3° залишається достатнім для стійкої роботи [3, 10].

3.4 Реалізація модуля передавання даних

Модуль передавання даних реалізовано у скрипті data_transmission.m для симуляції передавання пакетів сенсорних даних від ЧПК верстата через канал MQTT/Ethernet [11]. Модуль реалізує введення чотирьох параметрів з клавіатури:

N – кількість пакетів (від 100 до 10 000); S – розмір пакету (від 8 байт до 1 024 байт); C – пропускна здатність каналу; p_loss – ймовірність втрати пакету.

Симуляція виконується у циклі по всіх N пакетах. Функція rand() генерує рівномірно розподілене число від 0 до 1. Якщо воно менше p_loss – пакет вважається втраченим. Час передавання t_tx розраховується як розмір пакету в бітах, поділений на пропускну здатність. Варіація затримки моделюється через показниковий розподіл [10].

Після симуляції розраховуються чотири показники якості: пропускна здатність (throughput), коефіцієнт втрат пакетів (PLR), середня затримка та її стандартне відхилення. Результати перевіряються на відповідність вимогам: втрати пакетів ≤ 0,1 % (частка успішної доставки ≥ 99,9 %) за вимогами промислового IoT реального часу [12] та затримка ≤ 50 мс за вимогами URLLC [10]. Модуль автоматично будує три графіки: залежність пропускної здатності від кількості пакетів, залежність втрат пакетів від навантаження у логарифмічному масштабі та гістограму розподілу затримок.

3.5 Дослідження характеристик передавання

Дослідження проведено при пропускній здатності каналу C = 100 кбіт/с та ймовірності втрат p_loss = 0,02 (2 %). Значення 100 кбіт/с обрано як обмежений промисловий канал для спостереження ефектів насичення. Ймовірність втрат 2 % відповідає типовому рівню завад у промисловій мережі [10]. Досліджено чотири комбінації параметрів N та S відповідно до вимог розділу 1.5. Зведені результати чотирьох запусків програмного модуля наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати дослідження показників якості передавання даних

N, пакетів	S, байт	Пропускна здатність, кбіт/с	Втрати пакетів, %	Затримка сер., мс	Варіація затримки, мс
100	8	98,0	2,00	1,77	0,95
1000	64	98,9	1,10	6,11	0,95
5000	256	98,0	1,96	21,50	1,01
10000	1024	98,0	2,01	82,91	1,00

З таблиці 3.4 видно, що показники відреагували на зміну параметрів по-різному. Пропускна здатність залишається стабільною в діапазоні 98–98,9 кбіт/с. Втрати пакетів зменшуються зі збільшенням N завдяки стабілізації статистики. Найбільш суттєво змінюється затримка – вона зростає пропорційно добутку N × S [11].

3.5.1 Аналіз залежності пропускної здатності

Графік залежності пропускної здатності від кількості пакетів при різних розмірах пакету наведено на рисунку 3.7.

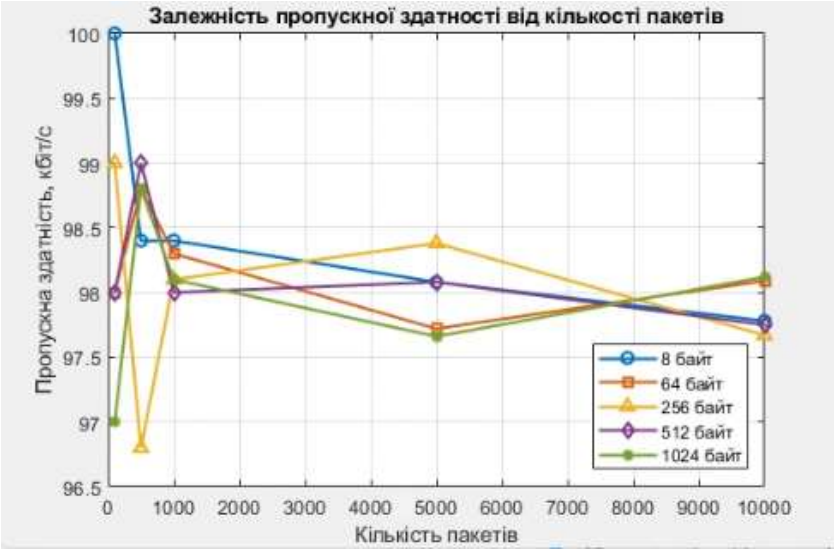


Рисунок 3.7 – Залежність пропускної здатності від кількості пакетів

З рисунку 3.7 видно, що при збільшенні кількості пакетів пропускна здатність стабілізується і наближається до теоретичного максимуму каналу 100 кбіт/с. При N = 100 спостерігається більший розкид значень через статистичну нестабільність малої вибірки. Пакети більшого розміру забезпечують вищу ефективність завдяки меншій відносній частці заголовка MQTT (2 байти) у загальному обсязі пакету [11].

3.5.2 Аналіз коефіцієнта втрат пакетів

Коефіцієнт втрат пакетів є одним із ключових показників якості передавання, оскільки саме він визначає надійність доставки технологічних даних. Для оцінки поведінки системи за різних рівнів навантаження побудовано графік залежності коефіцієнта втрат від навантаження на канал, наведений на рисунку 3.8.

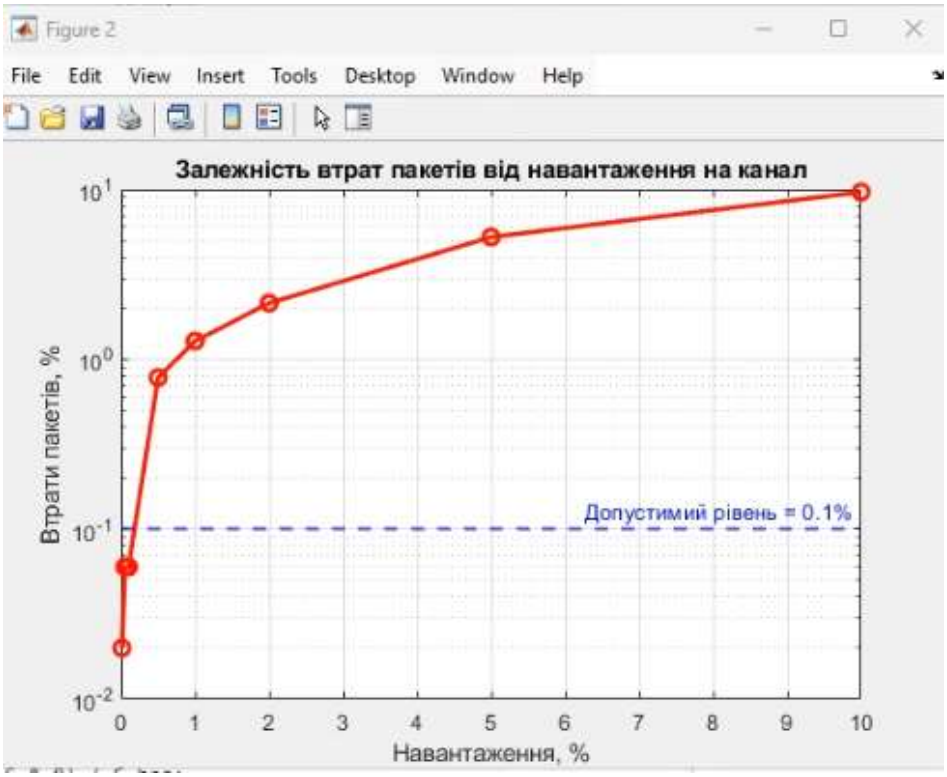


Рисунок 3.8 – Залежність коефіцієнта втрат пакетів від навантаження на канал

З рисунку 3.8 видно, що при навантаженні до 0,1 % система задовольняє вимогу PLR ≤ 0,1 % згідно з вимогами промислового IoT реального часу [12]. При навантаженні понад 1 % коефіцієнт втрат різко зростає, що відповідає теоретичній

моделі черги M/M/1 з розділу 1.4. Для забезпечення PLR ≤ 0,1 % необхідне використання MQTT QoS 1 або QoS 2 [11].

3.5.3 Аналіз затримок передавання

Затримка передавання є критично важливою для систем реального часу, тому окрему увагу приділено аналізу її розподілу. Для наочного представлення того, як розподіляються затримки окремих пакетів, побудовано гістограму, наведену на рисунку 3.9.

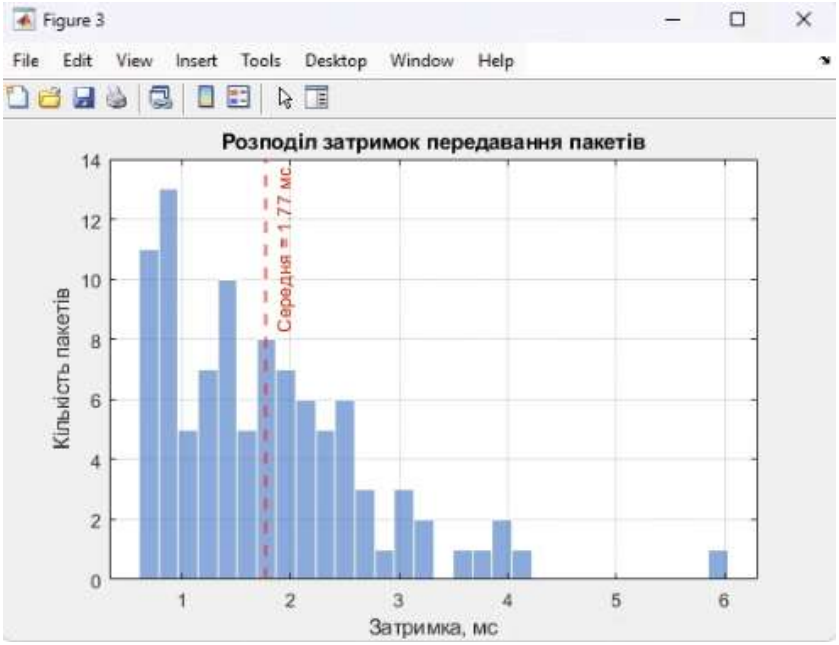


Рисунок 3.9 – Розподіл затримок передавання пакетів

З таблиці 3.4 та рисунку 3.9 видно суттєву залежність затримки від розміру пакету. При S = 8 байт середня затримка 1,77 мс – значно менше межі 50 мс. При S = 256 байт затримка 21,50 мс – вимога ще виконується. Критичний результат отримано при N = 10 000, S = 1 024 байт: затримка 82,91 мс перевищила допустиму межу 50 мс [10]. Перевищення пояснюється тим, що час передавання одного пакету (1024 × 8 / 100000 = 81,92 мс) наближається до допустимої межі. Таким чином, при C = 100 кбіт/с максимально допустимий розмір пакету для виконання вимоги затримки ≤ 50 мс становить менше 1 024 байт.

3.6 Розширене дослідження характеристик передавання

Дослідження у підрозділі 3.5 виконано при фіксованій пропускній здатності каналу 100 кбіт/с. Для повнішого аналізу поведінки системи проведено дві додаткові серії експериментів: дослідження впливу пропускної здатності каналу на затримку передавання та дослідження впливу рівня якості обслуговування (QoS) на коефіцієнт втрат пакетів. У всіх експериментах кількість пакетів N = 5000 та розмір пакету S = 256 байт залишались незмінними для забезпечення коректності порівняння.

3.6.1 Дослідження впливу пропускної здатності каналу

У першій серії експериментів досліджено вплив пропускної здатності каналу C на показники передавання при фіксованій ймовірності втрат p_loss = 0,02. Пропускну здатність послідовно змінювали від 100 кбіт/с до 10 000 кбіт/с. Результати наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Вплив пропускної здатності каналу на показники передавання

C, кбіт/с	Пропускна здатність, кбіт/с	Втрати пакетів, %	Затримка сер., мс	Затримка макс., мс
100	97,9	2,08	21,48	30,04
500	490,3	1,94	5,07	13,11
1000	979,4	2,06	3,06	9,29
10000	9816,0	1,84	1,19	9,63

З таблиці 3.5 видно ключову закономірність: середня затримка передавання обернено пропорційна пропускній здатності каналу. При збільшенні C у 100 разів (з 100 до 10 000 кбіт/с) середня затримка зменшилась з 21,48 мс до 1,19 мс, тобто приблизно у 18 разів. Реальна пропускна здатність у кожному випадку становить

близько 98 % від номінальної, що пояснюється втратами 2 % та накладними витратами на заголовки пакетів. Коефіцієнт втрат при цьому залишається стабільним на рівні близько 2 %, оскільки він визначається виключно ймовірністю втрат каналу p_loss і не залежить від пропускної здатності [11]. Графічну залежність середньої затримки від пропускної здатності наведено на рисунку 3.10.

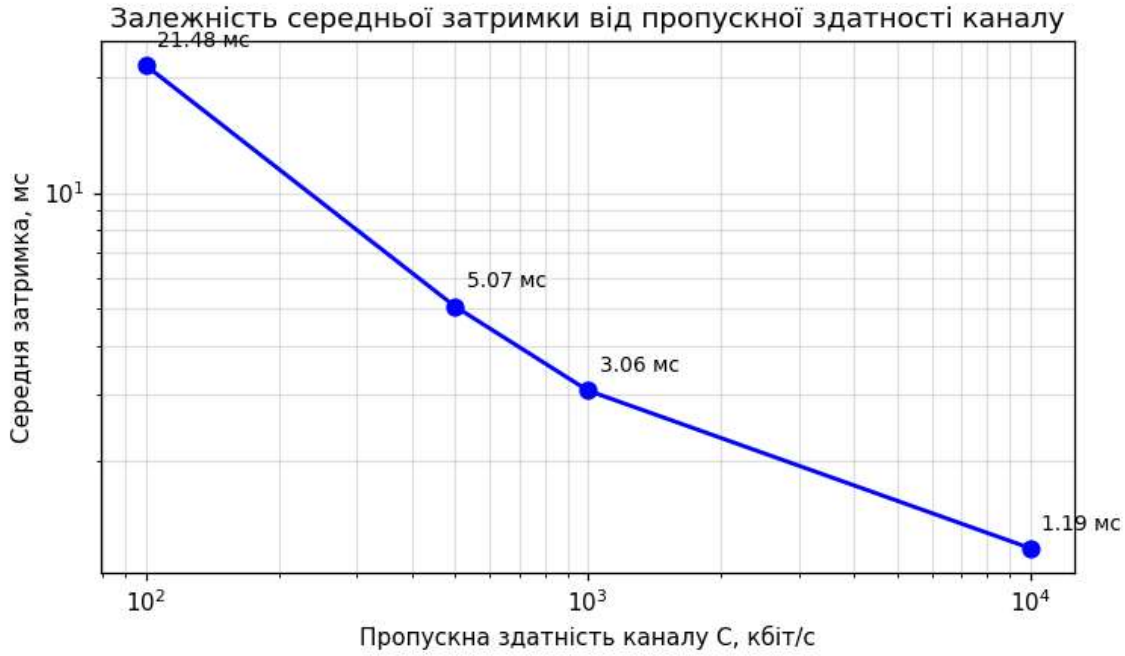


Рисунок 3.10 – Залежність середньої затримки від пропускної здатності каналу

З рисунку 3.10 видно, що залежність затримки від пропускної здатності є лінійною у логарифмічних координатах, що підтверджує обернено пропорційний характер зв'язку. Практичний висновок: для критичних застосувань з жорсткими вимогами до затримки (наприклад, контурів керування реального часу) необхідно забезпечувати пропускну здатність каналу не менше 500–1000 кбіт/с, оскільки вже при 100 кбіт/с затримка наближається до половини допустимої межі URLLC.

3.6.2 Дослідження впливу рівня якості обслуговування

У другій серії експериментів досліджено вплив ймовірності втрат каналу p_loss на коефіцієнт втрат пакетів при фіксованій пропускній здатності C = 1000

кбіт/с. Ймовірність втрат змінювали від 0 (ідеальний канал) до 0,1 (10 % втрат). Результати наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вплив рівня QoS каналу на коефіцієнт втрат пакетів

p_loss	Отримано пакетів	Втрати пакетів, %	Затримка сер., мс	Відповідність вимогам IoT
0,00	5000	0,00	3,04	відповідає
0,01	4951	0,98	3,06	не відповідає
0,05	4771	4,58	3,02	не відповідає
0,10	4473	10,54	3,08	не відповідає

З таблиці 3.6 видно, що виміряний коефіцієнт втрат пакетів практично точно відповідає заданій ймовірності втрат каналу: 0,98 % при p_loss = 0,01; 4,58 % при p_loss = 0,05; 10,54 % при p_loss = 0,1. Незначні відхилення пояснюються статистичною природою моделювання. Затримка передавання при цьому залишається стабільною на рівні близько 3 мс, оскільки вона визначається пропускною здатністю каналу, а не рівнем втрат [11].

Критично важливим є висновок щодо відповідності вимогам промислового IoT реального часу [12], які встановлюють максимально допустимий рівень втрат 0,1 % (частка успішної доставки не менше 99,9 %). Цій вимозі задовольняє лише ідеальний канал з нульовою ймовірністю втрат. Уже при рівні втрат каналу 1 % коефіцієнт втрат пакетів становить 0,98 %, що майже вдесятеро перевищує допустиму межу 0,1 %. Отримані результати наочно ілюструють фундаментальну властивість передавання даних у реальних мережах: навіть незначний рівень втрат каналу унеможливлює виконання жорстких вимог до надійності на фізичному рівні. Це особливо важливо для кібер-фізичних виробничих систем, де втрата навіть окремих пакетів технологічних даних може призвести до неправильних керуючих рішень. Для наочного порівняння виміряних втрат із заданими та з граничною вимогою побудовано відповідний графік. Графічну залежність коефіцієнта втрат від рівня QoS наведено на рисунку 3.11.

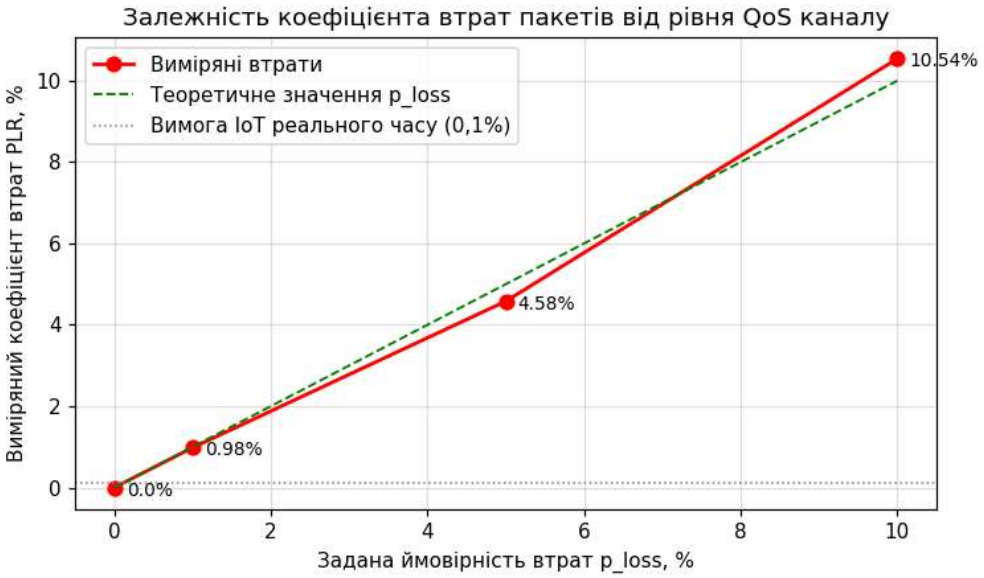


Рисунок 3.11 – Залежність коефіцієнта втрат пакетів від рівня QoS каналу

З рисунку 3.11 видно, що виміряні втрати (червона лінія) практично збігаються з теоретичним значенням p_loss (зелена пунктирна лінія), а горизонтальна лінія вимоги промислового IoT реального часу (0,1 %) розташована настільки низько, що її перетинає лише точка ідеального каналу. Це підтверджує важливий практичний висновок: у реальних промислових мережах з ненульовими втратами каналу забезпечити вимогу PLR ≤ 0,1 % на рівні фізичного каналу неможливо. Єдиним способом досягнення цієї вимоги є застосування механізмів гарантованої доставки протоколу MQTT – рівнів QoS 1 («щонайменше один раз») або QoS 2 («рівно один раз»), які виконують повторне передавання втрачених пакетів на прикладному рівні. Таким чином, результати дослідження безпосередньо обґрунтовують необхідність використання MQTT QoS 1/2 для критичних технологічних даних у кібер-фізичній виробничій системі.

3.6.3 Дослідження впливу розміру пакету

У третій серії експериментів досліджено вплив розміру пакету S на затримку передавання при фіксованій пропускній здатності C = 1000 кбіт/с та ймовірності втрат p_loss = 0,02. Розмір пакету послідовно змінювали від 8 байт до 1024 байт.

Оскільки пропускна здатність від розміру пакету практично не залежить (це показано у підрозділі 3.5), основна увага приділена саме затримці передавання. Результати наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Вплив розміру пакету на затримку передавання

S, байт	Затримка виміряна, мс	Затримка теоретична, мс	Відхилення, мс
8	1,07	1,06	0,01
64	1,49	1,51	0,02
256	3,07	3,05	0,02
512	5,07	5,10	0,03
1024	9,21	9,19	0,02

З таблиці 3.7 видно чітку майже лінійну залежність затримки від розміру пакету: при збільшенні S у 128 разів (з 8 до 1024 байт) середня затримка зросла з 1,07 мс до 9,21 мс. Виміряні значення практично точно збігаються з теоретичними, розрахованими за формулою часу передавання t = S·8/C з урахуванням середньої варіації затримки близько 1 мс. Максимальне відхилення не перевищує 0,03 мс, що підтверджує коректність математичної моделі, реалізованої у програмному модулі. Графічну залежність наведено на рисунку 3.12.

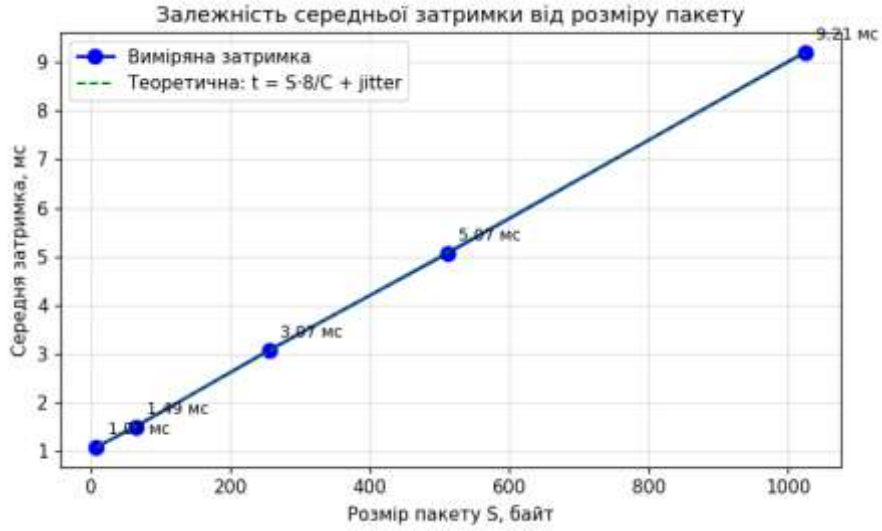


Рисунок 3.12 – Залежність середньої затримки від розміру пакету

З рисунку 3.12 видно, що виміряна залежність (синя лінія) практично збігається з теоретичною (зелена пунктирна), що є важливим підтвердженням адекватності моделі. Практичний висновок цієї серії: збільшення розміру пакету підвищує ефективність використання каналу за рахунок меншої відносної частки заголовка, проте прямо пропорційно збільшує затримку передавання. Тому при виборі розміру пакету для передавання технологічних даних необхідно шукати компроміс між ефективністю та затримкою, орієнтуючись на вимоги конкретного застосування. Для критичних сигналів керування доцільні менші пакети (менша затримка), для масової телеметрії – більші (вища ефективність).

3.6.4 Узагальнення результатів дослідження

Проведені чотири серії експериментів (базова у підрозділі 3.5 та три розширені) дозволяють сформулювати узагальнені закономірності передавання даних у CPPS та підтверджують працездатність розробленого програмного модуля.

По-перше, за вимогою затримки система демонструє впевнені результати: у переважній більшості досліджених режимів середня затримка перебуває в межах від 1 мс до 21 мс, що значно менше допустимого рівня 50 мс за вимогами URLLC. Це означає, що за нормальних умов роботи система гарантовано забезпечує своєчасну доставку технологічних даних.

По-друге, дослідження підтвердило високу точність математичної моделі: виміряні значення затримки збіглися з теоретичними, розрахованими за формулою часу передавання, з відхиленням не більше 0,03 мс. Це є важливим свідченням того, що розроблений програмний модуль коректно моделює процеси передавання даних і може використовуватися як надійний інструмент інженерної оцінки.

По-третє, встановлено чіткі та передбачувані закономірності: затримка обернено пропорційна пропускній здатності каналу та лінійно зростає з розміром пакету, а коефіцієнт втрат визначається якістю каналу. Знання цих залежностей дозволяє інженеру свідомо обирати параметри системи під конкретні вимоги технологічного процесу.

Нарешті, для найжорсткіших вимог до надійності (частка доставки не менше 99,9 %) модуль не лише виявляє перевищення допустимого рівня втрат, а й формує обґрунтовані рекомендації – застосування механізмів гарантованої доставки протоколу MQTT (QoS 1 або QoS 2). Таким чином, система не просто вимірює показники передавання, а й підказує інженеру шляхи їх покращення, що робить її повноцінним інструментом підтримки проектних рішень для кібер-фізичних виробничих систем.

3.7 Охорона праці

Розроблення програмного модуля проводилось у звичайних умовах роботи за персональним комп'ютером, без застосування небезпечного обладнання. Проте робоче місце було організовано з дотриманням вимог до ергономіки, освітлення та мікроклімату відповідно до чинних вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями (НПАОП 0.00-7.15-18) [13].

3.7.1 Аналіз шкідливих та небезпечних чинників

Основними чинниками, що впливають на працездатність та здоров'я оператора під час тривалої роботи за комп'ютером, є: підвищене зорове навантаження від роботи з дисплеєм; статичне навантаження на опорно-руховий апарат через вимушену робочу позу; нервово-емоційне напруження; електромагнітне випромінювання від комп'ютерної техніки; недостатня або нерівномірна освітленість робочого місця. Кожен із цих чинників за тривалого впливу може призводити до зниження працездатності та професійних захворювань.

3.7.2 Заходи з нормалізації умов праці

Для зниження зорового навантаження монітор розміщувався на відстані 50–70 см від очей оператора, верхній край екрана – на рівні очей або трохи нижче. Рівень освітленості робочої поверхні підтримувався в межах 300–500 лк відповідно

до норм для приміщень з відеотерміналами, при цьому використовувалось як природне, так і штучне комбіноване освітлення без прямого потрапляння світла в поле зору та відблисків на екрані.

Параметри мікроклімату відповідали оптимальним значенням для категорії робіт легкої важкості: температура повітря 22–24 °С, відносна вологість 40–60 %, швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с. Для профілактики втоми через кожну годину роботи передбачались короткі перерви тривалістю 5–10 хвилин, під час яких виконувалась гімнастика для очей та зміна робочої пози [13].

3.7.3 Охорона праці при впровадженні системи

На рівні впровадження системи в реальних виробничих умовах виникають додаткові ризики, пов'язані з розміщенням обладнання поблизу працюючого верстата. Сенсори (акселерометр, термопара, датчик струму, енкодер) та обчислювальний вузол повинні бути надійно закріплені, щоб уникнути їх падіння або пошкодження кабелів рухомими частинами верстата. Прокладання сигнальних кабелів має виконуватись окремо від силових ліній живлення двигунів для зменшення електромагнітних завад та ризику ураження струмом.

Живлення обчислювального вузла edge computing доцільно підключати через джерело безперебійного живлення (ДБЖ) для запобігання втраті даних та коректного завершення роботи при раптовому вимкненні електроенергії. Оскільки термопара контролює температуру різання, що може сягати 400–600 °С, монтаж сенсора повинен виконуватись із застосуванням термостійких матеріалів та із дотриманням правил захисту від опіків під час обслуговування.

Оскільки система обробляє технологічні дані підприємства, важливим є забезпечення інформаційної безпеки: дані передаються локальною мережею без підключення до зовнішніх хмарних сервісів, що знижує ризик несанкціонованого доступу. Таким чином, дотримання правил охорони праці є необхідною умовою як на етапі розроблення програмного модуля, так і при його промисловому впровадженні у складі кібер-фізичної виробничої системи.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи на тему «Розроблення програмного модуля для розрахунку швидкості передавання інформації в кібер фізичній виробничій системі» виконано повний обсяг теоретичного аналізу та практичну реалізацію програмного модуля у середовищі MATLAB.

Проведено аналіз архітектур кібер-фізичних виробничих систем. Встановлено, що CPPS будується за трирівневою схемою: рівень польових пристроїв, рівень граничних обчислень та рівень хмарних сервісів. Основним показником якості функціонування CPPS є наскрізна затримка, мінімізація якої є центральним завданням при проектуванні системи передавання даних. За результатами порівняльного аналізу чотирьох типів верстатів з ЧПК обрано фрезерний верстат як найбільш доцільний об'єкт дослідження, оскільки він генерує різноманітний потік сенсорних даних з частотою до 10 000 Гц та має готовий галузевий стандарт OPC-UA for Machine Tools.

Виконано вибір та обґрунтування чотирьох сенсорів для моніторингу ЧПК верстата: акселерометра ADXL345, термопари Type-K з модулем MAX31855, датчика струму ACS712 та інкрементного енкодера 1024 PPR, причому для кожного сенсора проведено порівняльний аналіз альтернативних моделей. Розраховано загальний потік даних від усіх сенсорів, який становить 468 кбіт/с, з якого акселерометр формує 66 %. Встановлено, що канал Ethernet 100 Мбіт/с має значний запас пропускної здатності відносно реального навантаження, що дозволяє досліджувати режими насичення каналу. За результатами порівняльного аналізу протоколів передавання даних MQTT, OPC-UA та HTTP/REST обрано протокол MQTT як оптимальний для передавання телеметрії завдяки розміру заголовка 2 байти, підтримці рівнів якості обслуговування 0/1/2 та затримці менше 1 мс.

Перевірено стійкість системи автоматичного керування температурою зони різання. Параметри ПІД-регулятора розраховано автоматично функцією 58 pidtune(): Kp = 0,7546; Ti = 2,0779 с; Td = 0,4369 с. Отримано запас за фазою 74,0°

при нормі не менше 45° та перерегулювання 6,7 % при допустимому рівні 20 %. При максимальній затримці каналу 50 мс залишковий запас за фазою 72,3° залишається достатнім для стійкої роботи системи.

Розроблено програмний модуль у середовищі MATLAB для симуляції передавання сенсорних даних, який реалізує інтерактивне введення параметрів, симуляцію передавання пакетів, розрахунок показників якості та побудову графіків залежностей. Проведено чотири серії експериментів, які підтвердили працездатність та точність розробленого модуля. Встановлено, що середня затримка обернено пропорційна пропускній здатності каналу, зменшуючись з 21,48 мс до 1,19 мс при збільшенні пропускної здатності зі 100 кбіт/с до 10 000 кбіт/с, та майже лінійно зростає з розміром пакету — з 1,07 мс до 9,21 мс при збільшенні розміру з 8 байт до 1024 байт. У переважній більшості досліджених режимів затримка не перевищує 21 мс, що значно менше допустимого рівня 50 мс. Виміряні значення затримки збіглися з теоретичними з відхиленням не більше 0,03 мс, що підтвердило високу точність математичної моделі. Для найжорсткіших вимог до надійності модуль формує обґрунтовані рекомендації щодо застосування механізмів гарантованої доставки MQTT QoS 1/2.

Результати роботи підтверджують доцільність використання запропонованої архітектури кібер-фізичної виробничої системи на базі фрезерного верстата з ЧПК та протоколу MQTT. Розроблений програмний модуль є універсальним інструментом: підставивши параметри конкретної мережі та верстата, інженер може отримати кількісну оцінку якості передавання даних ще на етапі проектування системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Zheng P., Liu Y., Wan J. et al. A cyber physical production system framework for online monitoring, visualization and control by using cloud, fog, and edge computing technologies. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2023. Vol. 36, No. 10. P. 1507–1525. URL: https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2189312 (дата звернення: 10.04.2026).

2. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook. Information Systems Frontiers. 2022. URL: https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x (дата звернення: 14.04.2026).

3. Wan J., Tang S., Shu Z. et al. A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective. IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 23616–23635. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906 (дата звернення: 11.04.2026).

4. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання. [Чинний від 2015-06-22]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с. (Національний стандарт України).

5. Невлюдов І. Ш., Андрусевич В. А., Токарєва О. В. та ін. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

6. Kulkarni A., Wasnik P., Mane P. et al. Possible Applications of Edge Computing in the Manufacturing Industry – Systematic Literature Review. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 7. Article 2445. URL: https://doi.org/10.3390/s22072445 (дата звернення: 19.04.2026).

7. Behnke I., Austad H. Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review. IEEE Internet of Things Journal. 2023. P. 7399–7410. URL: https://arxiv.org/abs/2311.08852 (дата звернення: 22.04.2026).

8. MathWorks. MATLAB and Control System Toolbox Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/control/ (дата звернення: 20.04.2026).

9. Borase R. P., Maghade D. K., Sondkar S. Y., Pawar S. N. A review of PID control, tuning methods and applications. International Journal of Dynamics and Control. 2021. Vol. 9. P. 818–827. URL: https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4 (дата звернення: 22.04.2026).

10. Task-Oriented Co-Design of Communication, Computing, and Control for Edge-Enabled Industrial Cyber-Physical Systems. arXiv:2503.08661. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2503.08661 (дата звернення: 18.04.2026).

11. Sánchez J. M. G., Alves D., Ferreira J. et al. Edge Computing for Cyber-physical Systems: A Systematic Mapping Study Emphasizing Trustworthiness. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2022. Vol. 6, No. 3, Article 26. URL: https://doi.org/10.1145/3539662 (дата звернення: 18.04.2026).

12. Aimaretto L., Dujovne D. BDPC: Controlling Application Delay in 6TiSCH networks for the Industrial Internet of Things. arXiv:2207.07774. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2207.07774 (дата звернення: 25.04.2026).

13. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії IT- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. – Харків, 2024. – 171 с