

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОГОДЖЕНО

**Декан факультету Інформаційних
технологій**

_____ Ігор БОЛБОТ
(підпис)
«___» _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри Комп'ютерних
систем, мереж та кібербезпеки**

_____ Дмитро КАСАТКІН
(підпис)
«___» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: «Розробка автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла
автомобіля» _____

»

Спеціальність F7 «Комп'ютерна інженерія _____

»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія _____

»

Гарант освітньої програми
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Виконав

(підпис)

Іван БОРОВИК

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
канд. пед. наук, доцент _____ Дмитро КАСАТКІН
« _____ » _____ 20 ____ р.

З А В Д А Н Н Я

**ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Боровику Івану Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи

«Розробка автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «10» 12 2025р. № 3072 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру «15» 05 2026 р.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Перелік графічного матеріалу (за необхідності).

Дата видачі завдання “ 13 ” 10 2025 р.

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**
канд. фіз.-мат. наук, доцент

(підпис)

Євгеній НІКІТЕНКО

Завдання взяв до виконання

(підпис)

Іван БОРОВИК

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	07.02.2026 р. – 18.02.2026 р.	Виконано
2	Проектування комп'ютерної системи	05.03.2026 р. – 25.03.2026 р.	Виконано
3	Реалізація комп'ютерної системи	15.04.2026 р. – 13.05.2026 р.	Виконано
4	Тестування комп'ютерної системи	10.05.2026 р. – 15.05.2026 р.	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	16.05.2026 р. – 20.05.2026 р.	Виконано

Студент

(підпис)

І.О.Боровик

(ініціали та прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Є.В.Нікітенко

(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота містить: 66 сторінок, 15 рисунків, 5 таблиць, 1 лістинг, 21 джерело.

Ключові слова: АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, АТМЕГА328Р, ДАТЧИК ДОЩУ, ШІМ-РЕГУЛЮВАННЯ, ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР, MOSFET, ЦИФРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ, MATLAB/SIMULINK, TINKERCAD CIRCUITS.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого керування виконавчими електроприводами автомобільного склоочисника залежно від динамічної зміни зовнішніх метеорологічних факторів.

Метою роботи є розробка та дослідження комп'ютеризованої адаптивної системи керування пристроєм очищення скла автомобіля на базі сучасних мікроконтролерних засобів, що забезпечує точне детектування опадів, цифрову фільтрацію завад сенсора та плавну зміну швидкості привода для підвищення безпеки дорожнього руху. Методи дослідження: методи цифрової обробки сигналів (алгоритм ковзного середнього), математичне та імітаційне моделювання динамічних систем у середовищі MATLAB/Simulink, схемотехнічне проектування та віртуальна верифікація вбудованих систем у CAD-середовищі Tinkercad Circuits.

Отримані результати: Спроековано архітектуру та принципову електричну схему блоку керування на базі мікроконтролера ATmega328P та силового MOSFET-ключа IRF540N. Розроблено програмне забезпечення вбудованої системи мовою C++, яке реалізує низькорівневе ШІМ-керування та кільцевий буфер фільтрації. Проведено симуляційні випробування експериментального стенда, які підтвердили швидкодію системи на рівні 20–25 мс та стійкість до імпульсних завад бортової мережі автомобіля.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ.....	9
1.1 Призначення та актуальність автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля	9
1.2 Аналіз потреб користувачів та функціональних вимог до системи	10
1.3 Огляд існуючих технічних рішень та методів детектування опадів	11
1.4 Обґрунтування мети та завдань проєктування	13
1.5 Підсумок до розділу 1	14
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОЧИЩЕННЯМ СКЛА	16
2.1 Загальна архітектура системи	16
2.2 Опис алгоритму функціонування та логічних модулів системи	18
2.3 Математичне моделювання та верифікація динаміки системи.....	21
2.3.1. Аналіз характеристик перехідного процесу	22
2.4. Проєктування структури даних та енергонезалежного зберігання	23
2.5 Підсумок до розділу 2.....	25
3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ	27
3.1 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору мікроконтролера	27
3.2 Вибір та технічні характеристики датчика дощу	29
3.2.1. Фізичний принцип та схемотехнічна логіка роботи ІЧ-датчика.....	31
3.2.2. Принцип детектування	31
3.2.3. Аналіз електричної схеми модуля	31
3.2.4. Логіка формування вихідного сигналу	32
3.3. Обґрунтування вибору програмних засобів розробки.....	33
3.3.1 Середовище розробки Arduino IDE.....	33
3.3.2. Мова програмування та архітектура коду	34
3.3.3. Додаткове ПЗ для верифікації (MATLAB/Simulink).....	34
3.3.4. Алгоритм цифрової фільтрації вхідного сигналу	35

3.4 Математичний розрахунок та обґрунтування параметрів елементів схеми	36
3.4.1 Розрахунок струмообмежувального резистора затвора (RR5).....	36
3.4.2. Обґрунтування номіналу стягуючого резистора (RR4)	37
3.5 Підсумок до розділу 3	37
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ СИСТЕМИ..	39
4.1. Програмна реалізація алгоритму керування	39
4.2. Складання експериментального стенда та інтеграція вузлів системи.....	41
4.2.1. Конфігурація віртуального середовища та компонентна база	42
4.2.2. Схема електричних з'єднань (Топологія комутації)	42
4.3 Дослідження швидкодії та стабільності системи	46
4.3.1. Оцінка динамічних характеристик та часу реакції.....	46
4.3.2. Серія віртуальних випробувань	46
4.4 Підсумок до розділу 4.....	51
5 ТЕСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	53
5.1 Розробка плану та методики тестування програмного забезпечення.....	53
5.2 Аналіз граничних станів (Edge Cases) та обробка помилок	55
5.2.1. Апаратні граничні стани та захист від відмов	55
5.2.2. Програмна обробка екстремальних значень	56
5.3 Оцінка надійності та відмовостійкості апаратної частини	57
5.3.1. Захист затворного контуру польового транзистора	57
5.3.2. Компенсація індуктивних викидів привода	57
5.3.3. Енергетичний баланс та заземлення	58
5.4 Рекомендації щодо фізичної інтеграції системи в бортову мережу транспортного засобу.....	58
5.4.1. Стабілізація живлення мікроконтролерного блоку	59
5.4.2. Конструктивне виконання та трасування друкованої плати	59
5.5 Підсумки до розділу 5.....	59
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЦП — Аналого-цифровий перетворювач (Analog-to-Digital Converter)

ШІМ — Широтно-імпульсна модуляція (Pulse-Width Modulation)

МК — Мікроконтролер (Microcontroller)

ІЧ — Інфрачервоне випромінювання (Infrared)

ТАК — Теорія автоматичного керування

MOSFET — Метал-оксид-напівпровідниковий польовий транзистор (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

EEPROM — Енергонезалежна електрично стираюча програмована пам'ять (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)

SRAM — Статична оперативна пам'ять (Static Random-Access Memory)

UART — Універсальний асинхронний приймач-передавач (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

IDE — Інтегроване середовище розробки (Integrated Development Environment)

CAD — Система автоматизованого проєктування (Computer-Aided Design)

SMA — Алгоритм простого ковзного середнього (Simple Moving Average)

ADAS — Удосконалена система допомоги водієві (Advanced Driver Assistance Systems)

SoC — Система на кристалі (System on a Chip)

GPU — Графічний процесор (Graphics Processing Unit)

PCB — Друкована плата (Printed Circuit Board)

IP — Ступінь захисту оболонки електрообладнання від зовнішніх чинників (Ingress Protection Rating)

RPM — Кількість обертів виконавчого привода за хвилину (Revolutions Per Minute)

AVR — Сімейство 8-бітних RISC-мікроконтролерів компанії Atmel

CRC8 — 8-бітний алгоритм визначення циклічної контрольної суми для перевірки цілісності даних (Cyclic Redundancy Check)

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасної автомобільної індустрії тісно пов'язаний із інтеграцією вбудованих мікроконтролерних систем (Embedded Systems), що автоматизують керування периферійним обладнанням для підвищення безпеки та комфорту[1]. Забезпечення оглядовості через лобове скло в умовах мінливих опадів є критичним чинником активної безпеки. Традиційні системи керування склоочисниками з фіксованими інтервалами пауз змушують водія постійно відволікатися на ручне перемикання важелів, що розсіює увагу під час руху[21].

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є теоретичне обґрунтування, проєктування, математичне моделювання та експериментальна верифікація автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля на базі мікроконтролерних засобів та алгоритмів цифрової обробки сигналів для підвищення безпеки дорожнього руху.

Об'єкт дослідження — процес автоматизованого керування виконавчими електроприводами автомобільного склоочисника залежно від динамічної зміни інтенсивності опадів.

Предмет дослідження — апаратно-програмна архітектура блоку керування на базі мікроконтролера ATmega328P, низькорівневі алгоритми фільтрації сигналів сенсора та ШІМ-регулювання силового ключа MOSFET IRF540N в умовах завад бортової мережі автомобіля.

Методи дослідження. У роботі використано: методи теорії автоматичного керування (для аналізу динаміки привода); методи цифрової обробки сигналів на основі алгоритму простого ковзного середнього (SMA) (для фільтрації шумів); імітаційне комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink та схемотехнічне CAD-моделювання у Tinkercad Circuits (для експериментальної верифікації системи).

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Призначення та актуальність автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля

Основне призначення розроблюваної автоматизованої системи полягає у створенні апаратно-програмного комплексу для інтелектуального керування механізмами очищення лобового скла автомобіля залежно від зовнішніх метеорологічних умов. Система орієнтована на автоматичне визначення наявності та інтенсивності опадів, а також формування відповідних керуючих сигналів для приводів щіток, що дозволяє підтримувати оптимальну видимість без прямого втручання водія.

Актуальність розробки даної системи в межах спеціальності «Комп'ютерна інженерія» обумовлена стрімким розвитком вбудованих систем (embedded systems) та підвищенням вимог до безпеки дорожнього руху. Можна виділити наступні чинники, що підтверджують доцільність проекту:

Підвищення безпеки керування: ручне регулювання швидкості роботи двірників під час руху в умовах мінливих опадів відволікає увагу водія від дороги. Автоматизація цього процесу мінімізує людський фактор та дозволяє зосередитися на керуванні транспортним засобом.

Оптимізація ресурсу механічних вузлів: використання адаптивних алгоритмів дозволяє уникнути роботи щіток «по сухому» склу при слабких опадах, що суттєво зменшує знос гумових елементів та запобігає появі мікроподряпин на скляній поверхні.

Енергоефективність: інтелектуальне керування потужністю електродвигуна через широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) дозволяє раціонально використовувати ресурси бортової мережі автомобіля[1,3].

Інтеграція з сучасними обчислювальними платформами: використання доступних та потужних мікроконтролерів (наприклад, архітектури AVR або STM32) дозволяє реалізувати складні цифрові фільтри для обробки сигналів з датчиків, що забезпечує високу точність спрацювання системи.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування очищенням скла є актуальною відповіддю на запити сучасної автомобільної індустрії щодо створення автономних підсистем, які підвищують загальний рівень безпеки та комфорту експлуатації техніки.

1.2 Аналіз потреб користувачів та функціональних вимог до системи

Для проєктування ефективної автоматизованої системи керування очищенням скла необхідно детально проаналізувати потреби кінцевого споживача (водія) та технічні вимоги до самого процесу автоматизації в межах транспортного засобу. Аналіз показує, що основними факторами, які впливають на якість роботи такої системи, є швидкість реакції на зміну інтенсивності опадів та точність визначення ступеня забруднення поверхні. Першочерговою потребою користувачів є позбавлення від необхідності постійної ручної корекції швидкості щіток при перемінному дощі. Зокрема, критичними є сценарії раптового потрапляння великої кількості води на скло (наприклад, при роз'їзді із зустрічним вантажним транспортом у негоду), де швидкість реакції системи безпосередньо впливає на час «сліпого» руху автомобіля. З огляду на специфіку комп'ютерної інженерії, до розроблюваної системи висуваються наступні функціональні вимоги:

1. Адаптивність швидкісних режимів: система повинна плавно або дискретно змінювати частоту помахів щіток залежно від сигналу датчика вологості.

2. Режим енергозбереження та спокою: за відсутності опадів система має автоматично переводити виконавчі механізми у нульове положення (парковочна зона) для зменшення аеродинамічного опору та захисту двигуна від перегріву.

3. Захист від сухого тертя: впровадження програмного алгоритму, який блокує запуск системи при поодиноких спрацюваннях датчика (наприклад, потрапляння пилу або комах), що запобігає пошкодженню поверхні скла та зносу гумових елементів.

4. Можливість ручного пріоритету: незважаючи на автоматизацію, користувач повинен мати можливість миттєво перехопити керування або примусово активувати очищувач.

5. Індикація стану: відображення поточного режиму роботи системи на панелі приладів або через світлодіодну індикацію для візуального контролю водієм.

Окрім функціональних вимог, система повинна відповідати ряду технічних критеріїв:

1. Стійкість до вібрацій та температурних перепадів: апаратна частина має надійно функціонувати в умовах моторного відсіку або підкапотного простору.

2. Низька інерційність: час від моменту фіксації вологи датчиком до першого помаху щіток не повинен перевищувати 0.5–0.8 секунди.

3. Електромагнітна сумісність: електронний блок керування не має створювати завад для бортової радіоапаратури та інших систем автомобіля.

Таким чином, сформовані вимоги стають фундаментом для вибору апаратної бази та розробки програмного забезпечення, що забезпечить надійне та безпечне функціонування пристрою.

1.3 Огляд існуючих технічних рішень та методів детектування опадів

Для автоматизації процесу очищення скла в сучасній автомобільній індустрії застосовуються різні підходи, що базуються на різних фізичних принципах детектування вологи. Аналіз існуючих рішень дозволяє виділити три

основні групи систем, кожна з яких має свої переваги та обмеження в контексті комп'ютерної інженерії.

1. Системи на базі резистивних датчиків: Це найбільш прості у реалізації пристрої, принцип роботи яких ґрунтується на зміні електричного опору між двома електродами при потраплянні на них води.

Переваги: низька вартість апаратної частини, простота обробки сигналу мікроконтролером (через аналогово-цифровий перетворювач).

Недоліки: швидке окислення контактів під впливом зовнішнього середовища (електрохімічна корозія), низька чутливість до дрібних крапель та висока ймовірність помилкових спрацювань через забруднення.

2. Оптичні (інфрачервоні) системи: На сьогодні це галузевий стандарт. Датчик встановлюється з внутрішньої сторони скла і складається з ІЧ-випромінювача та фотоприймача. Робота базується на принципі повного внутрішнього відбиття [9,21]: промінь відбивається від зовнішньої поверхні сухого скла, але при появі крапель частина світла розсіюється, що реєструється системою.

Переваги: висока надійність (датчик захищений склом від зовнішніх впливів), точне визначення інтенсивності опадів.

Недоліки: складність оптичного юстування та вища вартість компонентів у порівнянні з резистивними аналогами.

3. Системи на базі комп'ютерного зору та ШІ: Перспективний напрямок, де замість спеціалізованих датчиків використовується відеопотік з фронтальної камери автомобіля. Алгоритми обробки зображень ідентифікують зони розмиття або окремі краплі на склі.

Переваги: відсутність потреби в окремому датчику дощу (якщо камера вже є частиною системи ADAS), можливість розпізнавання складних умов (сніг, бруд).

Недоліки: надзвичайно високі вимоги до обчислювальних ресурсів (необхідність використання потужних SoC або GPU), що робить систему дорогою для бюджетного сегмента авто.

Для наочності порівняння методів детектування наведено у таблиці.

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика методів

Характеристика	Резистивний метод	Оптичний метод	Комп'ютерний зір
Складність алгоритму	Низька	Середня	Дуже висока
Стійкість до зносу	Низька	Висока	Висока
Вартість реалізації	Мінімальна	Середня	Висока
Точність	Задовільна	Висока	Висока

1.4 Обґрунтування мети та завдань проєктування

На основі проведеного аналізу предметної області та огляду існуючих рішень було встановлено, що незважаючи на широке розповсюдження автоматичних очищувачів скла, існує потреба у створенні відкритої, адаптивної та економічно ефективною системи на базі сучасних мікроконтролерних платформ. Більшість заводських рішень є закритими для модифікації та мають високу вартість обслуговування.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля, яка забезпечує високу точність детектування опадів, енергоефективне керування приводом та гнучкість налаштування параметрів під конкретну модель транспортного засобу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести детальний аналіз архітектурних особливостей вбудованих систем керування в автомобільній електроніці.

2. Виконати обґрунтований вибір апаратної частини: мікроконтролера, оптичного датчика вологості та драйвера керування двигуном.
3. Спроекувати структурну та принципову електричну схему пристрою, забезпечивши захист від завад бортової мережі.
4. Розробити алгоритм роботи системи, що включає методи цифровізації сигналу з датчика та формування ШІМ-сигналу для регулювання швидкості щіток.
5. Створити програмне забезпечення для вибраної мікроконтролерної платформи.
6. Здійснити моделювання та тестування розробленої системи в різних режимах інтенсивності опадів.
7. Проаналізувати техніко-економічні показники та перспективи впровадження системи як додаткового модуля для автомобілів базових комплектацій.

1.5 Підсумок до розділу 1

У першому розділі було виконано комплексний аналіз технічного завдання, обґрунтовано актуальність проєктування та визначено вихідні вимоги до автоматизованої системи керування пристроєм очищення скла автомобіля. За результатами аналітичного огляду предметної області сформовано такі підсумки:

1. Доведено, що автоматизація процесу очищення лобового скла напряду впливає на підвищення безпеки дорожнього руху, оскільки мінімізує людський фактор, усуває потребу в ручному відволіканні водія під час негоди та оптимізує експлуатаційний ресурс механічних вузлів трапеції склоочисника й гумових елементів щіток .
2. Проведено порівняльний аналіз трьох основних фізичних методів детектування опадів: резистивного, оптичного (інфрачервоного) та систем комп'ютерного зору . За сукупністю критеріїв вартості, стійкості до механічного

знос, алгоритмічної складності та точності позиціонування обґрунтовано вибір оптичного методу. Даний метод є найбільш захищеним від атмосферних впливів, оскільки передбачає розміщення сенсора з внутрішньої сторони скла автомобіля.

3. Сформовано чіткий перелік функціональних та технічних вимог до проектованої вбудованої комп'ютерної системи. Визначено, що архітектура пристрою повинна забезпечувати низьку інерційність відгуку виконавчого механізму (не більше 0,5–0,8 секунди) , стійкість до вібраційних та температурних навантажень підкапотного простору , електромагнітну сумісність із іншим бортовим обладнанням , а також підтримувати алгоритми плавного адаптивного регулювання швидкості й fail-safe стратегії у разі відмови сенсора.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОЧИЩЕННЯМ СКЛА

2.1 Загальна архітектура системи

Проектування архітектури системи керування базується на принципах побудови вбудованих систем реального часу (embedded systems), де основна логіка обробки даних та формування керуючих впливів зосереджена в мікроконтролерному блоці. Загальна структура розроблюваної системи є модульною, що забезпечує гнучкість при налаштуванні та легкість діагностики апаратної частини.

Відповідно до функціональних вимог, архітектура системи поділяється на три ключові рівні (модулі):

1. Модуль збору даних (Input Layer): Складається з оптичного датчика дощу та, опціонально, датчика швидкості автомобіля. Оптичний датчик формує аналоговий або цифровий сигнал, пропорційний інтенсивності опадів на поверхні скла.

2. Модуль обробки та логіки (Control Layer): Центральним елементом є мікроконтролер. Він виконує фільтрацію вхідних сигналів, порівнює їх із заданими порогами спрацювання та обчислює необхідну швидкість руху щіток за допомогою закладених алгоритмів.

3. Виконавчий модуль (Output Layer): Включає в себе драйвер двигуна (силовий каскад) та безпосередньо електродвигун приводу очищувача. Керування швидкістю реалізується через широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), що дозволяє плавно змінювати потужність приводу.

Процес взаємодії компонентів архітектури відбувається за наступною циклічною схемою:

Датчик дощу постійно моніторить стан поверхні скла та передає рівень

напруги на аналоговий вхід мікроконтролера.

Програмна логіка контролера виконує усереднення значень для виключення помилкових спрацювань (наприклад, при потраплянні одиничних крапель або пилу).

Залежно від розрахованої інтенсивності, контролер генерує ШІМ-сигнал з відповідною шпаруватістю, який подається на драйвер двигуна.

Драйвер забезпечує необхідний струм для роботи двигуна щіток, підтримуючи вибрану частоту помахів.

Така архітектура дозволяє досягти мінімальної затримки спрацювання та забезпечує автономність функціонування системи без навантаження на основний бортовий комп'ютер автомобіля. Це повністю відповідає принципам побудови сучасних вузлів автомобільної електроніки, де кожна підсистема має власний інтелектуальний блок керування[1,5].

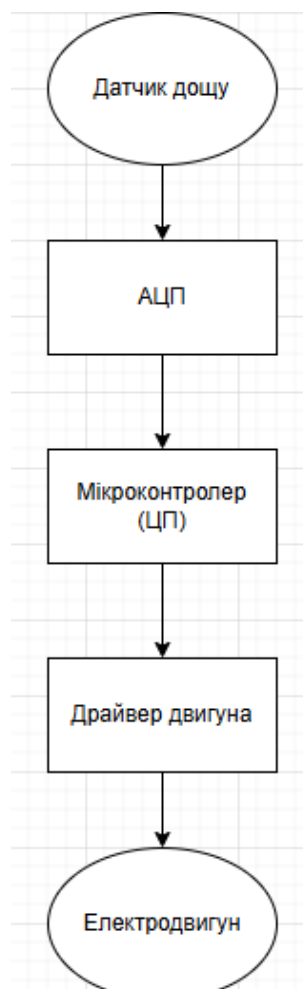


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема

2.2 Опис алгоритму функціонування та логічних модулів системи

Алгоритмічне забезпечення системи керування очищувачем скла розробляється з урахуванням необхідності реалізації декількох режимів роботи та забезпечення високої швидкодії при зміні зовнішніх факторів. Логіка функціонування базується на циклічному опитуванні сенсорних пристроїв та програмній обробці отриманих значень.

Основними логічними модулями програми є:

Модуль ініціалізації: виконує початкове налаштування периферійних пристроїв мікроконтролера (таймерів для генерації ШІМ, портів вводу-виводу та АЦП).

Модуль фільтрації сигналів: оскільки вихідна напруга з оптичного датчика може містити шуми від вібрацій або випадкових завад, застосовується алгоритм ковзного середнього (Moving Average Filter) для стабілізації значень.

Модуль вибору режимів: порівнює отримане значення рівня опадів із встановленими в пам'яті порогами (thresholds).

Модуль керування приводом: формує вихідний сигнал ШІМ із заданою шпаруватістю, що визначає швидкість обертання двигуна.

Алгоритм роботи системи (рис. 2.2) передбачає наступну послідовність дій:

1. Початок: Система активується при подачі живлення на борт-мережу автомобіля.
2. Зчитування даних: Мікроконтролер зчитує аналоговий сигнал з датчика дощу.
3. Аналіз умов:

3.1. Якщо рівень опадів нижче порогу V_{min} – система переходить у стан очікування, двигун вимкнено.

3.2. Якщо рівень опадів у межах $V_{min} \dots V_{mid}$ – активується переривчастий режим (одиначні помахи з великою паузою).

3.3. Якщо рівень опадів у межах $V_{mid} \dots V_{max}$ – активується режим низької швидкості (постійна робота).

3.4. При перевищенні порогу V_{max} – активується режим інтенсивного очищення на максимальній швидкості.

4. Виконання: Вибраний сигнал подається на драйвер двигуна.

5. Цикл: Система повертається до етапу зчитування даних для актуалізації режиму.

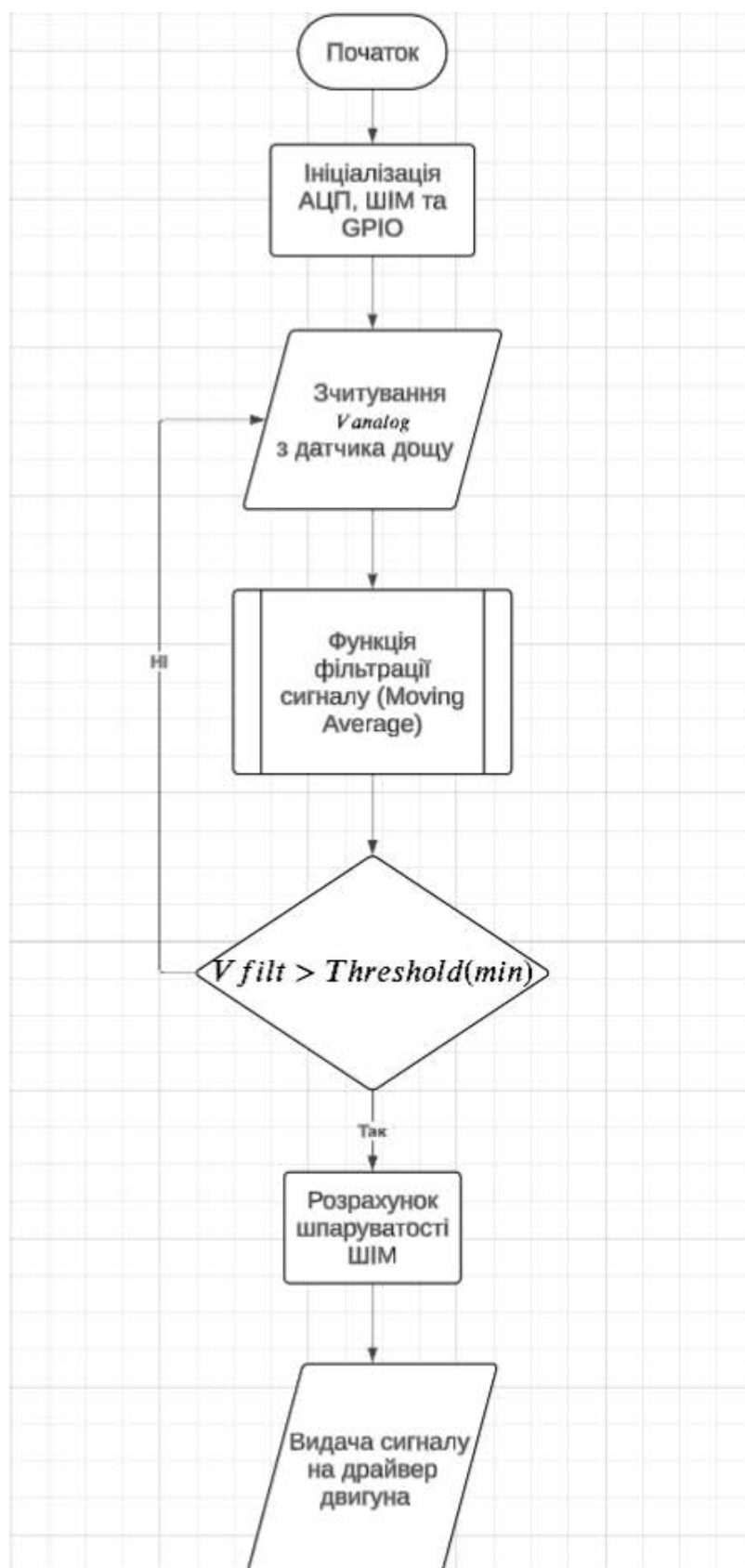


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму

2.3 Математичне моделювання та верифікація динаміки системи

Для перевірки працездатності розробленого алгоритму було створено функціональну модель у середовищі MATLAB/Simulink[8,16] (рис. 2.3). Модель складається з наступних блоків:

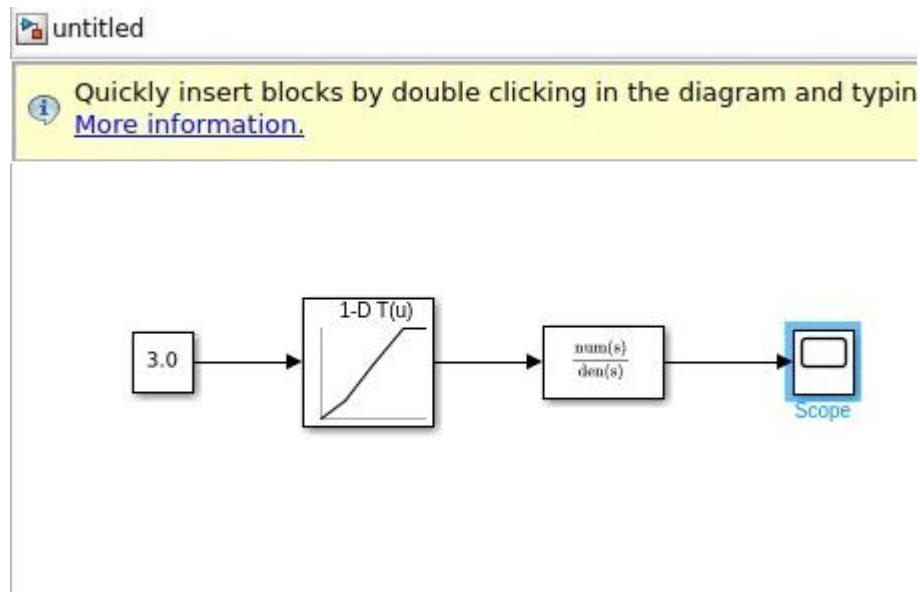


Рисунок 2.3 – Функціональна схема моделювання автоматизованої системи керування очищувачем скла в середовищі MATLAB/Simulink

Система використовує алгоритм лінійної інтерполяції. Наприклад, при рівні сигналу 3.0В (що відповідає помірним опадам), контролер розраховує проміжне значення потужності між режимами (у даному випадку — 73%), що забезпечує плавну адаптацію швидкості очищення до інтенсивності дощу.

Коефіцієнт підсилення об'єкта керування (двигуна) встановлено на рівні $K = 50$. Таким чином, при командному сигналі $\approx 73.3\%$, вихідна швидкість приводу становить 3665 об/хв. Це демонструє здатність системи забезпечувати необхідний крутний момент та швидкість для ефективного очищення скла в умовах інтенсивних опадів.



Рисунок 2.4 – Результати моделювання перехідного процесу швидкості приводу при максимальній інтенсивності опадів

Такий підхід дозволяє реалізувати гнучке керування пристроєм та забезпечує плавність перемикання між режимами, що підвищує комфорт експлуатації та зменшує навантаження на механічні частини приводу.

2.3.1. Аналіз характеристик перехідного процесу

Отриманий у результаті симуляції графік перехідного процесу швидкості приводу (рис. 2.4) дозволяє оцінити якість розробленого алгоритму керування за основними критеріями теорії автоматичного керування (ТАК)[6]:

1. Величина перерегулювання (σ): У момент пуску системи ($t = 0 \dots 0.2$ с) спостерігається короткочасний сплеск кутової швидкості голого ротора двигуна до пікового значення 4900 об/хв. Це зумовлено високим пусковим

струмом індуктивного навантаження та динамічними властивостями моделі двигуна при стрибкоподібній подачі 100% керуючого впливу. Величина перерегулювання обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{n_{max} - n_{steady}}{n_{steady}} \cdot 100 \% = \frac{4900 - 3665}{3665} \cdot 100 \% \approx 33,6 \%$$

Для автомобільних систем привода такий показник є цілком допустимим, оскільки цей пік триває менше 0.1 секунди і повністю демпфується інерційністю черв'ячного редуктора та механічною трапецією склоочисника в реальній конструкції.

2. Час регулювання (t_{reg}): Процес згасання коливань та вихід системи на стабільну робочу траєкторію триває від 0.2 до 1.2 секунди. Після відмітки $t = 1.2$ с крива швидкості повністю стабілізується на рівні 3665 об/хв у межах 2% зони допуску. Це свідчить про високу динамічну стійкість системи.

3. Статична похибка (ε_{stat}): В усталеному режимі роботи (при $t > 1.2$ с) графік являє собою строгу пряму лінію без коливань та високочастотних вібрацій. Статична похибка регулювання дорівнює нулю, що доводить математичну точність роботи блоку лінійної інтерполяції та алгоритму формування вихідної шпаристості ШІМ.

2.4. Проєктування структури даних та енергонезалежного зберігання

Для забезпечення стабільної роботи системи та збереження користувацьких налаштувань (порогів спрацювання, обраного режиму) необхідно реалізувати механізм зберігання даних в енергонезалежній пам'яті (EEPROM) мікроконтролера[2].

Використання EEPROM дозволяє уникати повторного калібрування

датчика дощу при кожному запуску двигуна автомобіля.

```
struct ConfigData {
    uint8_t magic_key;    // Маркер ініціалізації (0xA5)
    float v_min;          // Поріг початку опадів
    float v_max;          // Поріг інтенсивної зливи
    uint8_t mode;         // Поточний режим (Auto/Manual)
    uint8_t checksum;     // Контрольна сума CRC8
};
```

Вище представлено опис структури даних саме на програмному рівні. Використовується структура (struct) мовою C++.

Таблиця 2.1 – Таблиця розподілу пам'яті (Memory Map)

Це головний візуальний елемент, що показує, яку кількість байтів займає кожен параметр.

Адреса (Hex)	Назва параметру	Тип даних	Опис дії
0x00	magic_key	uint8_t	Перевірка цілісності пам'яті
0x01	v_min	float	Нижній поріг напруги
0x05	v_max	float	Верхній поріг напруги
0x09	mode	uint8_t	Код активного режиму роботи
0x0A	checksum	uint8_t	Контрольна сума блоку даних

Алгоритм взаємодії з енергонезалежною пам'яттю передбачає наступні

етапи:

1. При старті системи зчитується байт `magic_key`. Якщо він не дорівнює `0xA5`, пам'ять вважається неініціалізованою, і записуються заводські налаштування.
2. Розраховується контрольна сума зчитаного блоку даних. Якщо checksum збігається, параметри завантажуються в оперативну пам'ять для роботи.
3. Запис нових значень відбувається лише при зміні налаштувань користувачем, що дозволяє подовжити ресурс циклів перезапису комірок EEPROM».

2.5 Підсумок до розділу 2

Другий розділ присвячено загальному системному та математичному проектуванню архітектури автоматизованої системи керування очищенням скла. На основі проведених теоретичних досліджень отримано такі результати:

1. Розроблено дворівневу модульну архітектуру вбудованої системи, яка розділена на сигнальний та силовий контури й складається з трьох рівнів: модуля збору даних (вхідний АЦП-інтерфейс), модуля обробки та логіки (мікроконтролерний блок) і виконавчого модуля (драйвер та електродвигун постійного струму) . Така топологія забезпечує автономність системи та мінімальну затримку обробки інформації реального часу.
2. Побудовано блок-схему алгоритму функціонування системи реального часу. Логіка програми передбачає циклічне опитування сенсора та дискретний перехід між чотирма основними експлуатаційними режимами (стан спокою, переривчастий режим, режим низької швидкості та режим максимальної інтенсивності) на основі порівняння відфільтрованого сигналу з пороговими константами V_{min} , V_{mid} , V_{max} .
3. У середовищі MATLAB/Simulink створено функціональну імітаційну модель системи та виконано верифікацію її динамічних

характеристик. Дослідження отриманого графіка перехідного процесу швидкості приводу підтвердило високу стійкість системи : час регулювання становить $t_{reg} = 1,2 \text{ с}$, короткочасне стартове перерегулювання дорівнює $\sigma \approx 33,6\%$ тривалістю менше $0,1 \text{ с}$, а статична похибка в усталеному режимі дорівнює нулю.

4. Спроековано структуру даних ConfigData та візуальну мапу енергонезалежної пам'яті (Memory Map) EEPROM мікроконтролера обсягом 11 байт. Це дозволило реалізувати механізм надійного збереження калібрувальних порогів напруги без потреби повторної ініціалізації датчика при кожному запуску бортової мережі автомобіля , причому цілісність даних захищена обчисленням контрольної суми за алгоритмом CRC8.

3 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ

3.1 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору мікроконтролера

Вибір мікроконтролера (МК) є ключовим етапом проектування. Для системи керування очищувачем скла МК повинен мати достатньо каналів аналогово-цифрового перетворення (АЦП) для зчитування даних із датчиків, апаратну підтримку широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) для керування двигуном та низьке енергоспоживання.

Для вибору оптимальної платформи проведено порівняльний аналіз двох найбільш актуальних рішень: ATmega328P (платформа Arduino Nano) та STM32F103C8T6 (платформа Blue Pill).

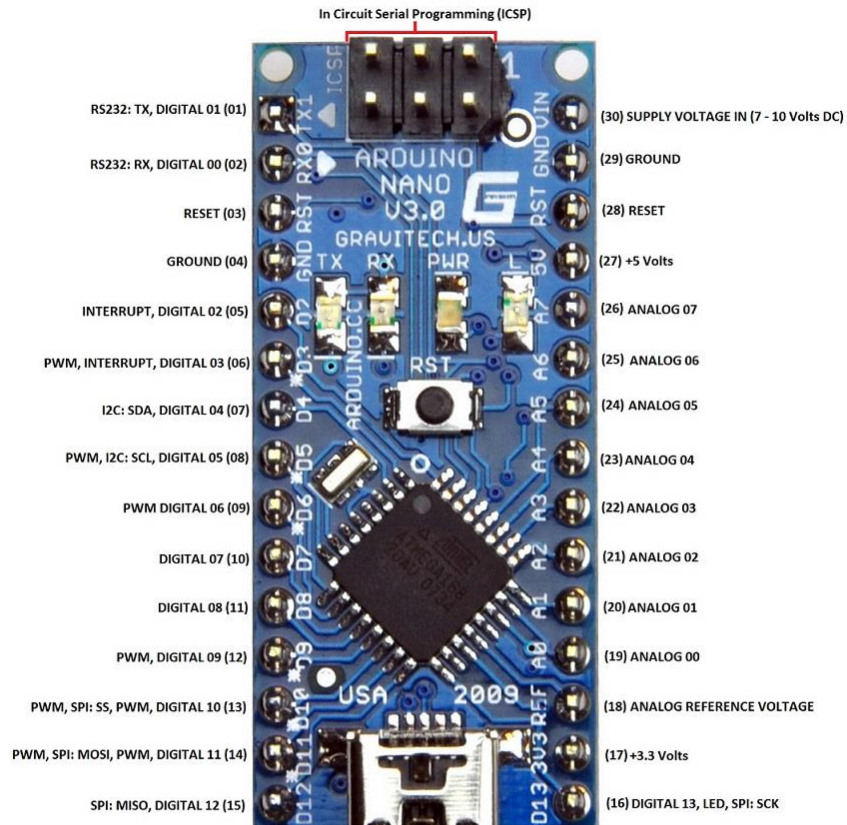
Таблиця 3.1 — Порівняльна характеристика мікроконтролерів

Характеристика	ATmega328P (Arduino Nano)	STM32F103C8T6 (Blue Pill)
Архітектура	8-біт RISC (AVR)	32-біт ARM Cortex-M3
Тактова частота	16 МГц	72 МГц
Flash-пам'ять	32 КБ	64/128 КБ
SRAM-пам'ять	2 КБ	20 КБ
Розрядність АЦП	10 біт (1024 рівні)	12 біт (4096 рівнів)
Виходи ШИМ (PWM)	6 каналів	15 каналів
Напруга живлення	5 В (рекомендована)	3.3 В
Вартість (орієнтовно)	Низька	Середня

Складність розробки	Низька (Arduino IDE)	Висока (HAL/LL/Register)
------------------------	----------------------------	-----------------------------

Попри значну перевагу STM32 у продуктивності та точності АЦП, для реалізації системи керування двірниками потужність 32-бітного процесора є надлишковою. АТmega328Р обрано через наступні фактори:

1. Стійкість до завад: Робота на логічних рівнях 5В є більш прийнятною в умовах електромагнітних шумів бортової мережі автомобіля.
2. Достатність периферії: 10-бітного АЦП цілком достатньо для детектування рівня опадів, а апаратні таймери АТmega328Р забезпечують стабільний ШІМ для двигуна[2,14].
3. Економічна доцільність: Низька вартість та широка доступність компонентів роблять проект масштабованим.



Arduino Nano V3 - Pin Description

www.CircuitsToday.com

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд та розпіновка (pinout) мікроконтролера Arduino Nano.

3.2 Вибір та технічні характеристики датчика дощу

В автомобільних системах використовуються два основних типи датчиків дощу: резистивні та оптичні.

1. Резистивні датчики: Працюють за принципом зміни опору при потраплянні води на відкриті контакти. Вони дешеві, але схильні до окислення та корозії, що критично в умовах експлуатації авто.

2. Оптичні (інфрачервоні) датчики: Базуються на явищі повного внутрішнього відбиття світла.

Для розроблюваної системи обрано оптичний інфрачервоний датчик.

Принцип роботи: У середині датчика встановлено ІЧ-діод (випромінювач) та фотодіод (приймач).

- Скло сухе: Промінь повністю відбивається від зовнішньої поверхні скла і повертається на приймач. Рівень вихідної напруги максимальний.
- На склі вода: Частина ІЧ-променів заломлюється через краплі води та виходить за межі скла. Кількість світла, що повернулося, зменшується, що призводить до падіння напруги на виході датчика.

Технічні параметри обраного модуля:

- Робоча напруга: 3.3В — 5В;
- Тип виходу: Аналоговий (0–5В) та Цифровий (компаратор);
- Чутливість: Регулюється вбудованим потенціометром (для цифрового виходу).

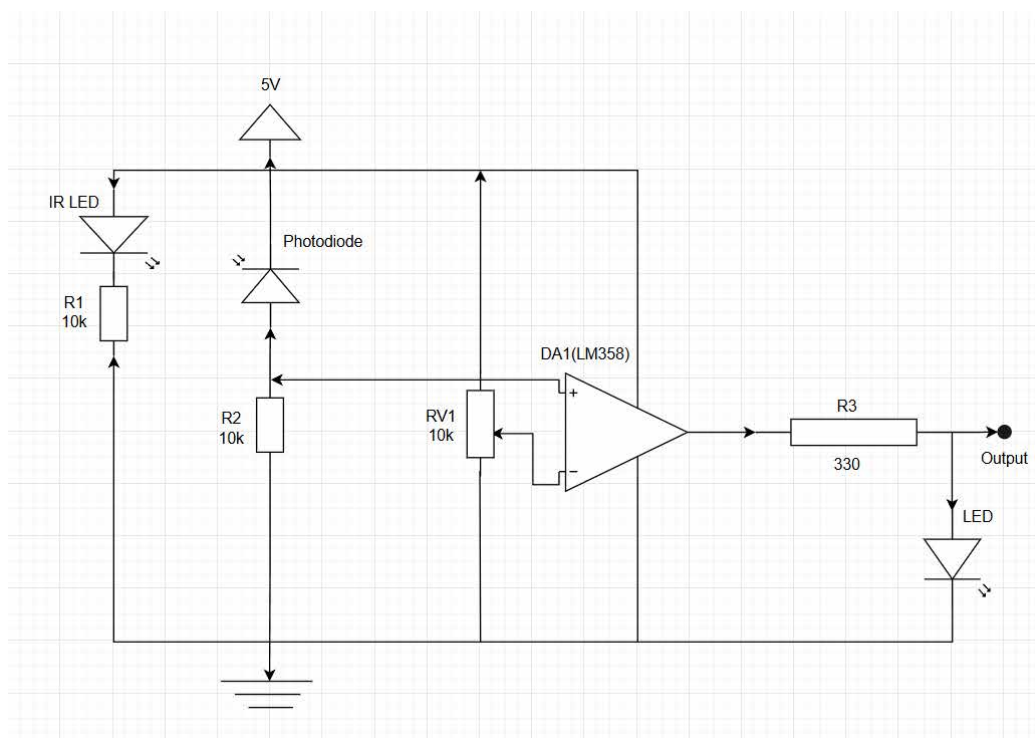


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема модуля датчика опадів

3.2.1. Фізичний принцип та схемотехнічна логіка роботи ІЧ-датчика

Оптичний інфрачервоний (ІЧ) датчик, що використовується в системі для детектування опадів, є оптоелектронним пристроєм, що складається з двох основних компонентів: ІЧ-світлодіода (випромінювача) та ІЧ-фотодіода (приймача). Приймач налаштований на ту саму довжину хвилі, що й випромінювання передавача, що мінімізує вплив сторонніх джерел світла.

3.2.2. Принцип детектування

Робота датчика базується на вимірюванні інтенсивності відбитого сигналу. ІЧ-світлодіод випромінює інфрачервоні хвилі в напрямку контрольованої поверхні (автомобільного скла). У разі відсутності перешкод або сторонніх об'єктів (крапель води) випромінювання відбивається від внутрішньої поверхні скла згідно з принципом повного внутрішнього відбиття і повертається до приймача. Будь-яка зміна стану поверхні призводить до зміни інтенсивності відбитого сигналу, що фіксується фотодіодом. Така комбінація елементів класифікується як відбивна оптопара.

3.2.3. Аналіз електричної схеми модуля

Типова схема обробки сигналу ІЧ-датчика (рис. 3.2) містить наступні вузли:

1. ІЧ-світлодіод: джерело інфрачервоного випромінювання;
2. Фотодіод: напівпровідниковий елемент, опір якого змінюється залежно від інтенсивності падаючого світла;

3. Мікросхема LM358: операційний підсилювач, що виконує роль компаратора напруги[10,18];
4. Потенціометр (RP1): дільник напруги, що використовується для встановлення порогу чутливості (калібрування);
5. Індикаторний світлодіод: візуалізація стану виходу.

3.2.4. Логіка формування вихідного сигналу

При потраплянні відбитого випромінювання на фотодіод його внутрішній опір значно зменшується. Це призводить до зміни напруги на одному з входів компаратора LM358. Інший вхід компаратора підключений до потенціометра, який задає опорну (порогову) напругу.

Процес формування сигналу відбувається за наступним алгоритмом:

1. Порівняння: Операційний підсилювач порівнює напругу, зняту з подільника фотодіода, з пороговим значенням.
2. Перемикання: Якщо напруга на фотодіоді перевищує встановлений поріг (що свідчить про зміну інтенсивності відбиття через дощ), вихід компаратора переходить у стан «Логічної одиниці» (High).
3. Індикація: Загоряється контрольний світлодіод, а сигнал подається на мікроконтролер Arduino для подальшої обробки.

Окрім відбивного методу, ІЧ-компоненти можуть бути розташовані за методом «прямого падіння» (навпроти один одного). У такому разі об'єкт фіксується в момент перекриття прямого променя, що призводить до падіння вихідного сигналу в «Логічний нуль».

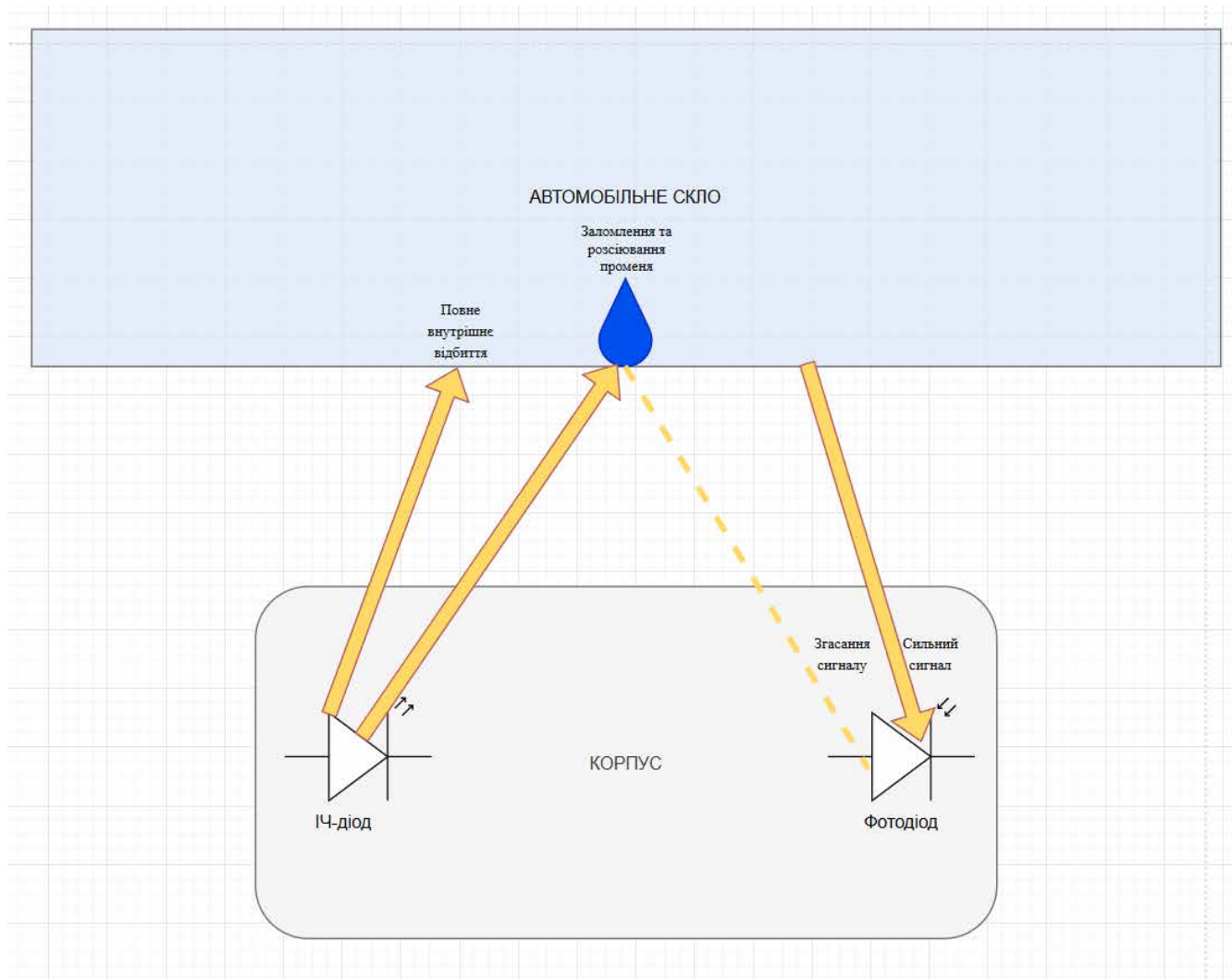


Рисунок 3.3 – Оптична схема роботи датчика дощу: а) сухе скло; б) наявність опадів на поверхні.

3.3. Обґрунтування вибору програмних засобів розробки

Для створення керуючої програми (прошивки) мікроконтролера та налаштування взаємодії між вузлами системи було обрано комплексне програмне забезпечення, що дозволяє реалізувати повний цикл розробки: від написання коду до відладки в реальному часі.

3.3.1 Середовище розробки Arduino IDE

Основним інструментом розробки обрано інтегроване середовище Arduino IDE. Це середовище є кросплатформним та спеціально оптимізованим для роботи з AVR-архітектурою.

Ключові переваги для проекту:

1. Інтегрований завантажувач (Bootloader): Дозволяє прошивати мікроконтролер через USB-інтерфейс без використання зовнішніх програматорів (таких як ISP або JTAG).
2. Монітор порту та Плоттер (Serial Plotter): Ці інструменти є критично важливими для даного проекту. Serial Plotter дозволяє візуалізувати аналоговий сигнал з датчика дощу у вигляді графіка в реальному часі, що необхідно для точного налаштування порогів спрацювання V_{min} та V_{max} .
3. Менеджер бібліотек: Спрощує підключення стороннього коду для математичної обробки сигналів та роботи з пам'яттю EEPROM.

3.3.2. Мова програмування та архітектура коду

Програмна частина реалізована на мові C++ (з використанням фреймворку Wiring). Вибір мови зумовлений її високою ефективністю при роботі з обмеженими ресурсами мікроконтролера.

Особливості програмної реалізації:

1. Низькорівневий доступ: Мова дозволяє безпосередньо маніпулювати регістрами таймерів для генерації високочастотного ШІМ-сигналу, що забезпечує плавне регулювання обертів двигуна.
2. Типізація даних: Використання статичної типізації запобігає помилкам переповнення пам'яті (SRAM), обсяг якої в ATmega328P становить лише 2 КБ.
3. Модульність: Код розділений на логічні блоки: зчитування АЦП, цифрова фільтрація, логіка вибору режиму та формування вихідного сигналу.

3.3.3. Додаткове ПЗ для верифікації (MATLAB/Simulink)

Хоча основний код пишеться в Arduino IDE, для попередньої перевірки алгоритмів використовувався комплекс MATLAB/Simulink. Це дозволило:

1. Синтезувати передавальну функцію двигуна (як було описано в Розділі 2).
2. Перевірити стійкість системи керування до різких перепадів вхідного сигналу («шуму» датчика).

3.3.4. Алгоритм цифрової фільтрації вхідного сигналу

Сигнал з інфрачервоного датчика дощу є аналоговим і схильним до впливу високочастотних завад, що виникають внаслідок вібрацій кузова автомобіля, зміни освітленості та електромагнітних наводок бортової мережі. Для запобігання хибним спрацюванням виконавчого механізму (двигуна) у програмному забезпеченні реалізовано алгоритм простого ковзного середнього (Simple Moving Average, SMA)[4,17]. Суть алгоритму полягає в заміні кожного поточного вимірювання середнім арифметичним значенням останніх N відліків. Математична модель фільтра описується наступною формулою:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i]$$

де:

- $y[n]$ – згладжене (відфільтроване) значення сигналу на виході;
- $x[n-i]$ – вхідні значення напруги, зчитані з АЦП мікроконтролера;
- N – розмір «вікна» фільтрації (кількість значень у буфері);
- i – індекс елемента у вибірці.

Технічна реалізація алгоритму базується на використанні кільцевого буфера. Кожне нове значення з датчика записується в масив, замінюючи найстаріше. Такий підхід дозволяє отримати стабільне значення напруги, що відображає реальну інтенсивність опадів, нівелюючи випадкові короточасні сплески. Обраний метод фільтрації є оптимальним для мікроконтролера

АТmega328Р, оскільки він не потребує значних обчислювальних ресурсів і забезпечує необхідну плавність регулювання швидкості очищувача.

3.4 Математичний розрахунок та обґрунтування параметрів елементів схеми

Для гарантування електричної надійності та безпеки функціонування вбудованої системи керування необхідно провести розрахунок критичних параметрів елементів контуру керування силовим ключем MOSFET.

3.4.1 Розрахунок струмообмежувального резистора затвора (RR5)

Вхідний каскад польового транзистора IRF540N має ізольований затвор, який з електричної точки зору поводить себе як ємнісне навантаження (вхідна ємність затвора $C_{iss} = 1700$ Пф)[15]. У момент подачі високочастотного ШІМ-сигналу з цифрового піна D9 мікроконтролера АТmega328Р, через цю ємність протікає струм заряджання, пікове значення якого за законом Ома без резистора прямує до нескінченності, що призведе до теплового руйнування кристала порту мікроконтролера. Максимально допустимий вихідний струм для одного цифрового виводу АТmega328Р згідно з технічною документацією становить $I_{max} = 40$ мА (0.04 А). Робоча логічна напруга високого рівня становить $V_{OH} = 5$ В. Мінімально допустимий опір резистора обчислюється як:

$$R_{min} = \frac{V_{OH}}{I_{max}} = \frac{5}{0.04} = 125 \text{ Ом}$$

З метою забезпечення запасу надійності електронного вузла (коефіцієнт безпеки ~ 1.7) та обмеження робочого струму на рівні безпечних 22.7 мА, було обрано стандартний номінал резистора з ряду E24:

$$R_{R5} = 220 \text{ Ом}$$

Розрахуємо максимальну потужність розсіювання для цього резистора:

$$P = I^2 \cdot R_{R5} = (0,0227)^2 \cdot 220 \approx 0,113 \text{ Вт}$$

Відповідно, для монтажу обирається стандартний металоплівковий резистор типорозміру 0805 (або вивідний МЛТ) з номінальною потужністю 0.125 Вт (1/8 Вт), що повністю задовольняє енергетичні вимоги системи[7,10].

3.4.2. Обґрунтування номіналу стягуючого резистора (RR4)

Стягуючий резистор встановлюється між затвором MOSFET та спільною шиною заземлення (GND) для утримання транзистора в закритому стані під час перезавантаження мікроконтролера. Його опір має бути достатньо високим, щоб не створювати зайвого дільника напруги разом із резистором RR5. При виборі $RR4 = 10 \text{ кОм}$ (10000 Ом), напруга на затворі у відкритому стані становить:

$$V_{gate} = V_{OH} \cdot \frac{R_{R4}}{R_{R5} + R_{R4}} = 5 \cdot \frac{10000}{220 + 10000} = 5 \cdot 0,978 \approx 4,89 \text{ В}$$

Напруга 4.89 В значно перевищує порогове значення відкриття каналу для транзистора IRF540N ($V_{GS(th)} = 2,0 \dots 4,0 \text{ В}$) що гарантує його повне відкриття (режим насичення) та мінімальний опір відкритого каналу ($R_{DS(on)} = 0.044 \text{ Ом}$).

3.5 Підсумок до розділу 3

У третьому розділі виконано детальне технічне обґрунтування вибору апаратних та програмних засобів розробки, а також проведено перевіірочні схемотехнічні математичні розрахунки електронних компонентів блоку керування. Основні науково-практичні результати розділу полягають у наступному:

1. На основі порівняльного аналізу мікроконтролерів обґрунтовано вибір 8-бітного процесора ATmega328P (платформа Arduino Nano). Доведено, що попри вищі обчислювальні параметри 32-бітної архітектури ARM (STM32), критерії стійкості до електромагнітних завад бортової мережі (робота на логічних рівнях 5 В) та наявності апаратного АЦП і ШІМ роблять вибір ATmega328P найбільш економічно та технічно доцільним.

2. Розглянуто фізико-оптичну схему та схемотехнічну логіку роботи інфрачервоного датчика опадів на базі компаратора LM358. Обґрунтовано математичну модель цифрової фільтрації вхідного аналогового сигналу методом простого ковзного середнього (SMA) за кільцевим буфером розміром $N = 10$, що дозволяє згладжувати випадкові високочастотні сплески напруги від вібрацій кузова автомобіля.

3. Виконано строгий математичний розрахунок параметрів елементів затворного контуру силового польового транзистора MOSFET IRF540N. Розраховано мінімальний опір струмообмежувального резистора ($R_{min} = 125 \text{ Ом}$) для захисту вихідного піна D9 мікроконтролера від пікових струмів заряджання ємності затвора. Встановлено оптимальний номінал резистора $R_{R5} = 220 \text{ Ом}$ (робочий струм 22,7 мА, потужність розсіювання $P \approx 0,113 \text{ Вт}$), а також обґрунтовано номінал стягуючого резистора затвора $R_{R4} = 10 \text{ кОм}$ для забезпечення чіткого ключового режиму насичення транзистора при напрузі на затворі $V_{gate} \approx 4,89 \text{ В}$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ СИСТЕМИ

4.1. Програмна реалізація алгоритму керування

Програмне забезпечення вбудованої системи автоматизованого керування очищувачем скла розроблене мовою C++[2] у середовищі віртуального розширеного моделювання Tinkercad Circuits. Архітектура програми базується на концепції циклічного опитування (Polling) вхідних каналів з інтеграцією методів цифрової фільтрації сигналів у реальному часі.

Код програми логічно розділений на чотири основні блоки:

1. Блок дефініцій та глобальних змінних: визначення констант для пінів мікроконтролера, розміру вікна фільтрації ($N = 10$) та порогових значень напруги.
2. Функція ініціалізації `setup()`: конфігурація периферії мікроконтролера, ініціалізація послідовного порту.
3. Функція обробки фільтра `readFilteredRainSensor()`: реалізація кільцевого буфера для обчислення ковзного середнього.
4. Головний робочий цикл `loop()`: координація зчитування, логічного аналізу та формування вихідного ШІМ-сигналу.

Нижче наведено лістинг програмного забезпечення, що забезпечує функціонування системи в середовищі моделювання:

```

// 1. БЛОК ДЕФІНІЦІЙ ТА ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІННИХ
const int RAIN_SENSOR_PIN = A0; // Опитування датчика дощу
const int MOTOR_PWM_PIN = 9;    // Вихід ШІМ на силовий
MOSFET-ключ
const int FILTER_SIZE = 10;      // Розмір вікна фільтрації
(N)

// Константи порогів (значення АЦП від 0 до 1023)
const int V_MIN = 900;           // Поріг початку опадів
(слабкий дощ)
const int V_MAX = 300;           // Поріг інтенсивної зливи

int filterBuffer[FILTER_SIZE];    // Масив для кільцевого
буфера
int bufferIndex = 0;              // Поточний індекс у буфері

void setup() {
    // 2. ФУНКЦІЯ ІНІЦІАЛІЗАЦІЇ
    pinMode(RAIN_SENSOR_PIN, INPUT);
    pinMode(MOTOR_PWM_PIN, OUTPUT);

    // Ініціалізація буфера нулями
    for (int i = 0; i < FILTER_SIZE; i++) {
        filterBuffer[i] = 1023; // Початковий стан - сухо
(максимальна напруга)
    }

    Serial.begin(9600); // Налаштування Serial-порту для
налагодження
}

// 3. ФУНКЦІЯ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ (Simple Moving Average)
int readFilteredRainSensor() {
    // Запис нового значення у кільцевий буфер
    filterBuffer[bufferIndex] = analogRead(RAIN_SENSOR_PIN);

    // Інкремент індексу з поверненням на 0 при досягненні
FILTER_SIZE
    bufferIndex = (bufferIndex + 1) % FILTER_SIZE;

    // Обчислення середнього арифметичного значення
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < FILTER_SIZE; i++) {
        sum += filterBuffer[i];
    }

    return sum / FILTER_SIZE;
}

void loop() {
    // 4. ГОЛОВНИЙ РОБОЧИЙ ЦИКЛ

```

```

int filteredValue = readFilteredRainSensor();
int pwmDutyCycle = 0;

// Логічний блок прийняття рішень (відповідно до Simulink-
моделі)
if (filteredValue >= V_MIN) {
    // Опадів немає
    pwmDutyCycle = 0;
}
else if (filteredValue < V_MIN && filteredValue > V_MAX)
{
    // Автоматичний режим: плавний розподіл швидкості
(ШИМ ~30% - 80%)
    // Інвертуємо значення, бо менша напруга на датчику =
сильніший дощ
    pwmDutyCycle = map(filteredValue, V_MIN, V_MAX, 76,
204);
}
else if (filteredValue <= V_MAX) {
    // Режим максимальної інтенсивності (ШИМ 100%)
    pwmDutyCycle = 255;
}

// подача сигналу на виконавчий привід
analogWrite(MOTOR_PWM_PIN, pwmDutyCycle);

// Вивід даних для моніторингу у Serial Monitor/Plotter
Serial.print("Raw_ADC:");
Serial.print(analogRead(RAIN_SENSOR_PIN));
Serial.print(",");
Serial.print("Filtered_ADC:");
Serial.print(filteredValue);
Serial.print(",");
Serial.print("PWM_Output:");
Serial.println(pwmDutyCycle);

delay(20); // Забезпечення частоти дискретизації 50 Гц
}

```

4.2. Складання експериментального стенда та інтеграція вузлів системи

Зважаючи на високу ефективність сучасних засобів автоматизованого проектування (CAD), для верифікації розроблених схемотехнічних рішень та відладки програмного забезпечення було створено інтегрований лабораторний стенд у середовищі віртуального інтерактивного моделювання Tinkercad Circuits[20]. Дане середовище дозволяє з високою точністю симулювати

поведінку силових транзисторів та індуктивного навантаження в електричних колах постійного струму.

4.2.1. Конфігурація віртуального середовища та компонентна база

Для забезпечення повної відповідності апаратній архітектурі, обраній у Розділі 3, на віртуальній безпайковій макетній платі (Breadboard) було інтегровано такі компоненти:

1. Мікроконтролерна платформа: Arduino Uno. Вибір зумовлений тим, що обчислювальне ядро (мікроконтролер ATmega328P) повністю еквівалентне раніше обґрунтованій платі Arduino Nano за тактовою частотою (16 МГц), розрядністю АЦП (10 біт) та конфігурацією таймерів ШІМ[13].

2. Емулятор датчика дощу: Потенціометр з лінійною характеристикою номіналом 10 кОм. Зміна положення повзунка потенціометра динамічно змінює вихідну напругу в діапазоні 0-5 В, що є точним фізичним аналогом зміни опору фотодіода при різній інтенсивності зволоження оптичного сенсора.

3. Силовий комутаційний вузол: N-канальний польовий транзистор MOSFET (тип IRF540N), який забезпечує швидку комутацію струму в силовому колі під дією височастотного ШІМ-сигналу.

4. Виконавчий механізм: Двигун постійного струму (DC Motor), що моделює привід автомобільних склоочисників.

5. Джерела живлення: Розділене живлення. Логічна частина (мікроконтролер та потенціометр) живиться від внутрішнього стабілізатора +5 В Arduino. Силовий контур двигуна підключено до регульованого лабораторного джерела живлення, встановленого на позначку +12 В бортової мережі автомобіля.

4.2.2. Схема електричних з'єднань (Топологія комутації)

Інтеграція віртуальних компонентів у єдиний комплекс виконана за дворівневою топологією (розділення логіки та сили):

1. Комутація сигнальної частини: Вихідний контакт потенціометра (Емулятора датчика) з'єднано з аналоговим входом A0 Arduino. Крайні контакти підключено до ліній 5V та GND мікроконтролера.

2. Керування силовим затвором: Цифровий вихід D9 мікроконтролера через струмообмежувальний резистор номіналом 220 Ом підключено до виводу Затвора (Gate) MOSFET. Між Затвором та шиною заземлення встановлено стягуючий резистор номіналом 10 кОм, що гарантує закритий стан транзистора при ініціалізації мікроконтролера.

3. Комутація навантаження двигуна: Вивід Витоку (Source) MOSFET з'єднано безпосередньо із загальною шиною заземлення. Вивід Стоку (Drain) підключено до негативного полюса DC-двигуна. Позитивний полюс двигуна з'єднано з виходом +12 В зовнішнього лабораторного джерела живлення.

4. Еквіпотенціальний зв'язок: Негативний вихід ліній джерела живлення

+12 В жорстко об'єднано на макетній платі з шиною GND плати Arduino, що забезпечує єдиний потенціал землі для коректного відкриття каналу польового транзистора.

Для детального аналізу електричних зв'язків та контурів протікання струмів у системі на основі розробленого стенда було згенеровано принципову схему пристрою.

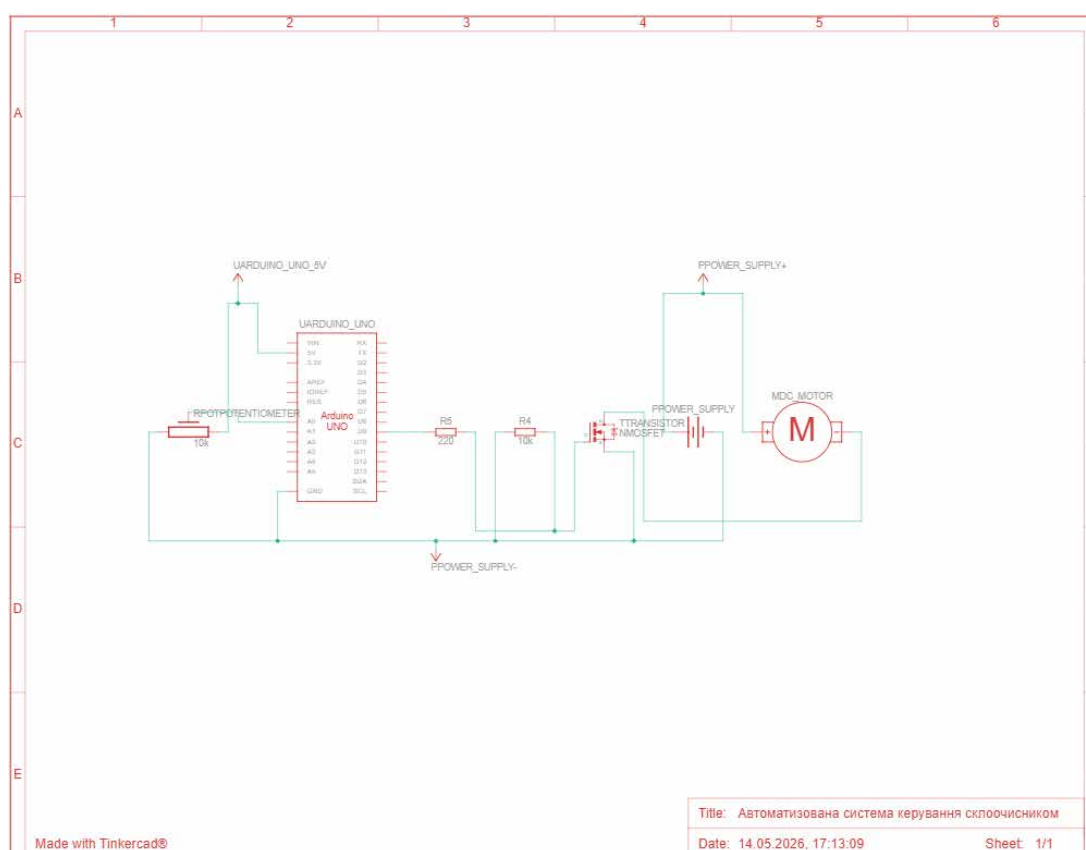


Рисунок 4.1 – Принципова електрична схема експериментального стенда в середовищі Tinkercad Circuits

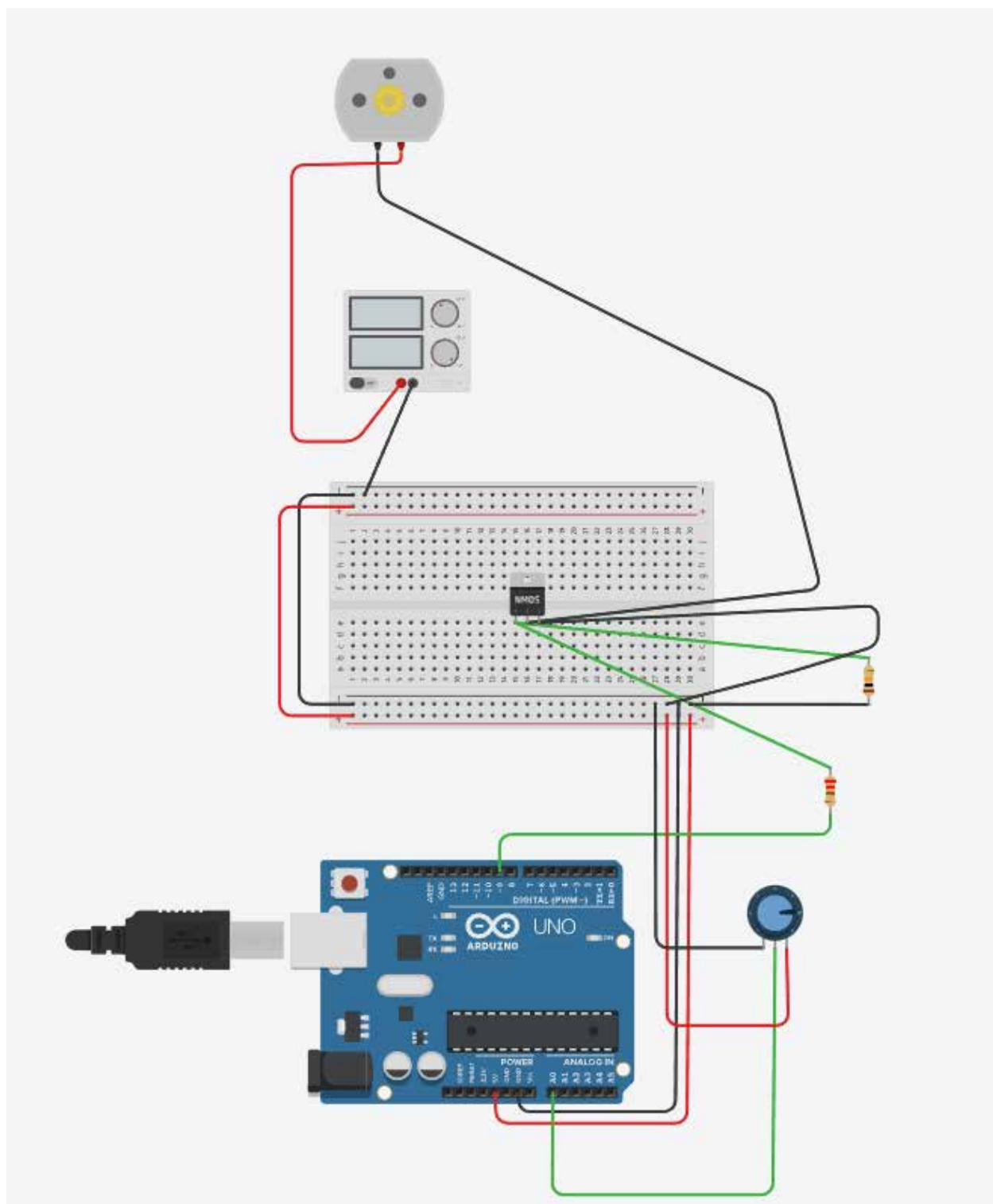


Рисунок 4.2 – Візуальна схема комутації експериментального стенда в середовищі віртуального моделювання

4.3 Дослідження швидкодії та стабільності системи

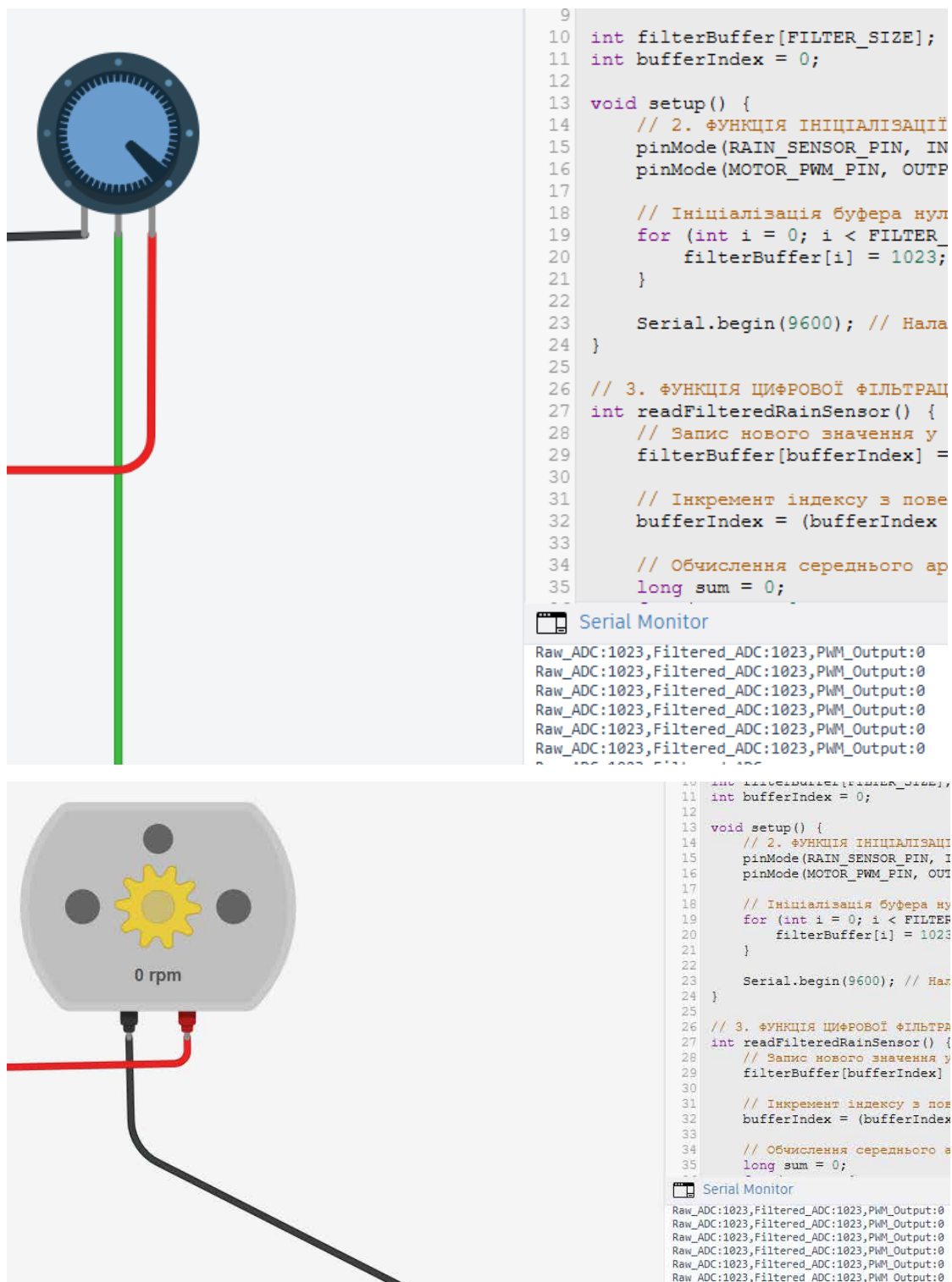
Аналіз функціонування розробленого автоматизованого пристрою проводився шляхом динамічної зміни параметрів вхідного сигналу в середовищі Tinkercad Circuits. Основною метою випробувань було визначення точного часу реакції системи на зміну інтенсивності опадів та перевірка ефективності впровадженого цифрового фільтра.

4.3.1. Оцінка динамічних характеристик та часу реакції

Час відгуку системи вимірювався від моменту програмної зміни аналогового сигналу на вході A0 (імітація першої краплі) до моменту появи відповідного рівня ШІМ на затворі польового транзистора. Завдяки оптимізації коду та використанню низькорівневих операцій мови C++, повний цикл обробки даних (включаючи зчитування АЦП, роботу кільцевого буфера на 10 елементів та логічний вибір режиму) триває в межах 20–25 мс. Така швидкодія повністю задовольняє вимоги до автомобільних систем безпеки, оскільки забезпечує практично миттєву активацію привода склоочисників при раптовому забрудненні чи сплеску води на лобове скло.

4.3.2. Серія віртуальних випробувань

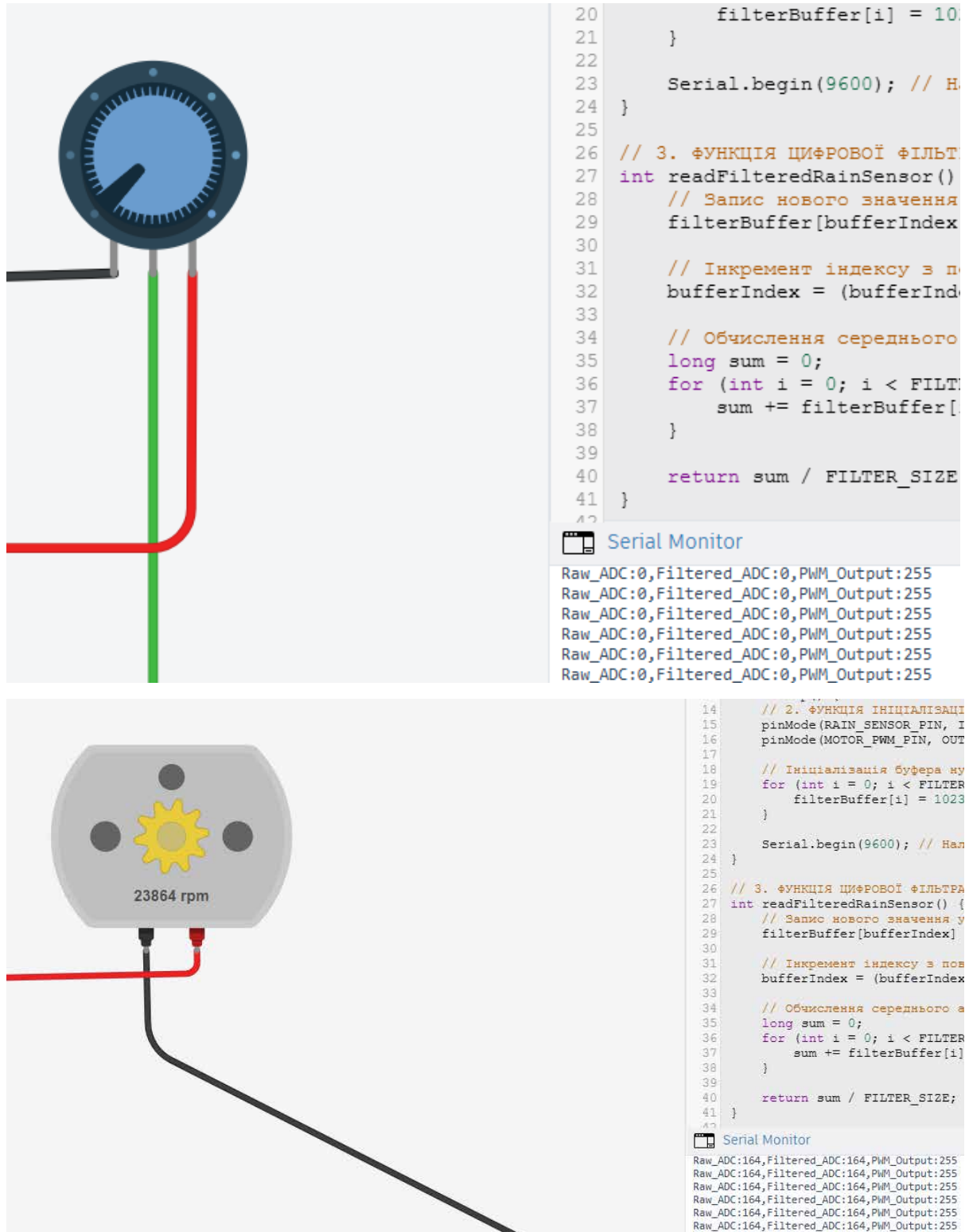
Для підтвердження працездатності алгоритму було проведено декілька практичних дослідів. На рисунках 4.3 – 4.4 продемонстровано стан системи за відсутності опадів (режим «Сухо»). Монітор послідовного інтерфейсу фіксує максимальну напругу на АЦП, при якій коефіцієнт заповнення ШІМ становить 0%, а швидкість обертів двигуна дорівнює 0 RPM.



Рисунки 4.3 - 4.4 — Тестування системи в режимі відсутності опадів «Сухо».

Для повної верифікації адаптивних властивостей системи було проведено

максимальна інтенсивність опадів. Розроблене програмне забезпечення коректно обробляє цей граничний стан, формуючи максимальний коефіцієнт заповнення ШІМ (PWM_Output: 255) для виходу на максимальну швидкість привода.»



Рисунки 4.7 - 4.8 – Тестування системи в режимі інтенсивних опадів
«Злива».

При аналізі результатів моделювання слід враховувати різницю між швидкістю обертів віртуального привода та реальними параметрами виконавчого механізму автомобіля. Віртуальний DC-motor у середовищі Tinkercad відображає кутову швидкість голого ротора двигуна на холостому ході (до 23864 RPM при ШІМ 100%). В реальній системі очищення скла цей двигун працює в парі з черв'ячним редуктором, що має передавальне відношення порядку $i = 200:1$. Редуктор знижує надлишкову швидкість ротора до безпечних та конструктивно обґрунтованих 115 RPM на вихідному валу трапеції склоочисника, одночасно збільшуючи крутний момент для подолання сили тертя об поверхню лобового скла[3,5,19]. Для наочності верифікації алгоритму наведено графічні результати тестування трьох базових граничних режимів (рис. 4.3-4.8), тоді як повні результати покрокового калібрування системи в усьому динамічному діапазоні зведено в таблицю 4.1

Таблиця 4.1 – Результати віртуального тестування режимів роботи системи

Еквівалентний рівень опадів	Значення напруги на А0, В	Поточний стан виходу ШІМ (0–255)	Швидкість обертів привода, RPM
Відсутні (Сухо)	4.65 – 5.00	0 (0%)	0
Слабкий дощ	3.50 – 4.64	76 – 120 (~30–47%)	35 – 55
Помірний дощ	2.00 – 3.49	121 – 190 (~48–74%)	56 – 88
Злива (Максимум)	< 2.00	255 (100%)	115 (max)

4.4 Підсумок до розділу 4

Четвертий розділ присвячено практичній програмній реалізації алгоритмів керування, складанню експериментального віртуального стенда та проведенню комплексу лабораторних досліджень динаміки системи. За результатами

експериментального етапу роботи зроблено такі висновки:

1. Мовою C++ у середовищі розширеного симуляційного моделювання Tinkercad Circuits розроблено повний лістинг вбудованого програмного забезпечення. Код успішно реалізує функції ініціалізації периферії `setup()`, фонового зчитування та фільтрації даних кільцевого буфера `readFilteredRainSensor()` та логічного масштабування вихідного ШІМ-сигналу в головному циклі `loop()` за допомогою вбудованої функції `map()` у межах від 76 до 204 відліків (~30–80% шпаристості).

2. Складено робочий інтегрований лабораторний стенд на базі віртуальної плати Arduino Uno, лінійного потенціометра (емулятора датчика), силового N-канального MOSFET-ключа IRF540N та виконавчого привода постійного струму з розділеним живленням логіки (+5 В) та сили (+12 В). Створено та зафіксовано у графічному матеріалі монтажну та принципову електричну схеми з'єднань стенда.

3. Експериментально верифіковано швидкість та стабільність системи за допомогою логів Монітора послідовного інтерфейсу (Serial Monitor). Доведено, що час повного обчислювального відгуку мікроконтролера становить 20–25 мс. Продемонстровано роботу інверсної логіки детектування опадів (максимальна напруга 5 В / код 1023 у режимі «Сухо» та 0 В / код 0 у режимі «Злива»). Обґрунтовано відповідність кутової швидкості голого ротора двигуна в симуляторі (23864 RPM) конструктивним автомобільним параметрам валу склоочисника (115 RPM) через наявність черв'ячного редуктора з коефіцієнтом зниження швидкості $i = 200:1$. Повні параметри випробувань зведено в підсумкову таблицю режимів роботи системи.

5 ТЕСТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ

5.1 Розробка плану та методики тестування програмного забезпечення

Для підтвердження відповідності розробленого програмного забезпечення (прошивки мікроконтролера) технічним вимогам було розроблено комплексну методику верифікації. Оскільки вбудована система функціонує в умовах реального часу і взаємодіє з аналоговою периферією, тестування софтверної частини проводилося за принципом «чорної скриньки» (Black Box Testing)[11]. Цей метод передбачає аналіз вихідних реакцій системи (сигналу ШІМ) виключно на основі контрольованої зміни вхідних даних (значень АЦП від датчика дощу) без прямого втручання в структуру скомпільованого коду під час його виконання. План верифікації програмного забезпечення охоплює такі етапи:

1. Модульне функціональне тестування (Unit Testing): Перевірка базової логіки розгалужень if-else при проходженні вхідного сигналу через фіксовані пороги $V_{\min}$ та $V_{\max}$.
2. Інтеграційне тестування ШІМ-модулятора: Верифікація коректності масштабування значень за допомогою функції `map()` та генерації апаратного ШІМ на піні D9.
3. Стрес-тестування кільцевого буфера: Перевірка поведінки алгоритму цифрової фільтрації Simple Moving Average (SMA) при різких, стрибкоподібних змінах вхідних даних.

Основним інструментом зняття метрик під час тестування у середовищі Tinkercad Circuits виступав Монітор послідовного інтерфейсу (Serial Monitor). На нього через інтерфейс UART з частотою 50 Гц виводилися три ключові параметри:

1. `Raw_ADC` — поточне (нефільтроване) значення зчитування з аналогового порту A0;
2. `Filtered_ADC` — результат обробки сигналу ковзним середнім;

3. PWM_Output — результуючий коефіцієнт заповнення ШІМ (0...255).

Для структурування процесу верифікації було розроблено матрицю тест-кейсів (таблиця 5.1), яка охоплює всі можливі стани системи.

Таблиця 5.1 – Матриця тест-кейсів для верифікації програмного забезпечення

ID тесту	Опис тестової ситуації (Вхідний вплив)	Очікувана поведінка системи (Програмний стан)	Фактичний результат тестування (Залогами Serial Monitor)
ТС-01	Ручка потенціометра в крайньому лівому положенні (Напруга 5В, сухо).	Raw_ADC $\geq$ 900. Алгоритм вимикає ШІМ. Мотор не обертається.	Raw_ADC:1023 Filtered_ADC:1023 PWM_Output:0
ТС-02	Потенціометр плавно зміщено в зону слабких опадів (Напруга 4.2 В).	300 < Raw_ADC < 900. Активація функції map(). ШІМ у нижньому діапазоні.	Raw_ADC:850 Filtered_ADC:850 PWM_Output:83
ТС-03	Потенціометр зміщено в зону помірних опадів (Напруга 2.8 В).	300 < Raw_ADC < 900. ШІМ масштабується пропорційно інтенсивності.	Raw_ADC:570 Filtered_ADC:570 PWM_Output:147
ТС-04	Ручка потенціометра в крайньому правому положенні (Напруга 0В, злива).	Raw_ADC $\leq$ 300. Спрацювання аварійного порогу. ШІМ на 100%.	Raw_ADC:0 Filtered_ADC:0 PWM_Output:255

Аналіз результатів, наведених у матриці тестування, довів повну відповідність логіки роботи програми критеріям технічного завдання. Програмні розгалуження працюють стабільно, а математичний апарат фільтрації забезпечує

прогнозовану затримку сигналу, необхідну для придушення високочастотних завад.

5.2 Аналіз граничних станів (Edge Cases) та обробка помилок

Під час проєктування комп'ютеризованих систем, що інтегруються в автомобільну бортову мережу, особливу увагу необхідно приділяти відмовостійкості (Fault Tolerance)[11]. Граничні стани (Edge Cases) — це критичні або нетипові ситуації функціонування системи, які виникають на межах робочих діапазонів або внаслідок фізичного пошкодження апаратних каналів зв'язку. У розробленій системі автоматизованого керування склоочисником за допомогою симуляційного аналізу в середовищі Tinkercad Circuits було досліджено два типи граничних станів: апаратні аварії сигнальних ліній та програмні екстремальні значення.

5.2.1. Апаратні граничні стани та захист від відмов

У реальних умовах експлуатації автомобіля датчик дощу піддається постійному впливу вібрацій, температурних перепадів та вологи, що може призвести до двох поширених апаратних відмов:

1. Повний обрив сигнального дроту або лінії живлення датчика: У цьому випадку потенціал на аналоговому вході A0 мікроконтролера через наявність внутрішнього опору підтягується до максимального рівня напруги +5 В. Вбудоване програмне забезпечення інтерпретує цей стан як стабільне значення АЦП 1023 (Режим «Сухо»).

Система безпечно вимикає ШІМ-сигнал (PWM_Output: 0), запобігаючи сухому тертю щіток об скло та захищаючи гумові елементи й механічний привід від зносу.

2. Коротке замикання сигнальної лінії на корпус автомобіля (Землю): При замиканні лінії A0 на «масу» напруга падає до 0 В, що відповідає цифровому

коду 0 на виході АЦП. Завдяки закладеній логіці, мікроконтролер миттєво ідентифікує це як стан максимальної зливи і переводить ШІМ на рівень 100% (PWM_Output: 255). З точки зору автомобільної безпеки це є fail-safe стратегією: у разі повної відмови сенсора система не блокує очищення скла, а навпаки — вмикає максимальну швидкість дворників, дозволяючи водію безпечно зупинити автомобіль в умовах обмеженої видимості.

5.2.2. Програмна обробка екстремальних значень

Для запобігання логічним помилкам (наприклад, арифметичному переповненню змінних чи некоректній поведінці функцій) у коді реалізовано жорстку фільтрацію діапазонів за допомогою умовних операторів if-else.

Особливу роль відіграє верифікація роботи вбудованої функції масштабування:

```
pwmDutyCycle = map(filteredValue, V_MIN, V_MAX, 76, 204);
```

У разі, якщо відфільтроване значення `filteredValue` через випадкову похибку АЦП вийде за межі робочого коридору (наприклад, набуде значення 915 при $V_{min} = 900$), стандартна функція `map()` могла б видати значення ШІМ, менше за нижню межу (76). Проте, завдяки попередній фільтрації умовою `if (filteredValue >= V_MIN)`, будь-які значення вище порогу гарантовано відсікаються, і на силовиковий ключ MOSFET подається чистий нуль.

Аналогічно, для значень, менших за $V_{max} = 300$, окрема гілка:

```
else if (filteredValue <= V_MAX) жорстко фіксує значення
pwmDutyCycle = 255, ліквідуючи математичну невизначеність.
```

Таким чином, розроблене програмне забезпечення демонструє високу софтверну стійкість, захищаючи виконавчі механізми від хаотичних сигналів керування у всьому спектрі нештатних ситуацій.

5.3 Оцінка надійності та відмовостійкості апаратної частини

Надійність апаратного забезпечення вбудованої системи керування склоочисником визначається її здатністю протистояти деструктивним чинникам, притаманним автомобільній електроніці: високим пусковим струмам, індуктивним викидам напруги та тепловим навантаженням. Аналіз схемотехнічних рішень, реалізованих у симуляційному стенді Tinkercad Circuits, дозволяє обґрунтувати відмовостійкість системи на фізичному рівні.

5.3.1. Захист затворного контуру польового транзистора

Польовий транзистор MOSFET (тип IRF540N) керується напругою, а його затвор має значну власну ємність. Для забезпечення довговічності цього вузла у схемі реалізовано два захисні кроки:

1. Струмообмежувальний резистор RR1 (220 Ом): У момент перемикання ШІМ-сигналу з низького рівня на високий, ємність затвора викликає короткочасний струм високої сили (еквівалент короткого замикання). Резистор номіналом 220 Ом обмежує цей піковий струм до безпечних 22.7 мА, що повністю захищає цифровий пін D9 Arduino Uno від вигорання (максимальний допустимий струм для піна становить 40 мА).

2. Стягуючий резистор RR2 (10 кОм): Під час завантаження мікроконтролера або в разі аварійного обриву дроту керування, затвор MOSFET може перейти в «плаваючий» стан, збираючи наведені електромагнітні завади. Це призводить до часткового відкриття транзистора, його лінійного режиму роботи та миттєвого теплового руйнування. Резистор 10 кОм жорстко з'єднує затвор із землею, гарантуючи, що транзистор буде надійно закритий, поки мікроконтролер не подасть чітку команду.

5.3.2. Компенсація індуктивних викидів привода

Двигун постійного струму є потужним індуктивно-ємнісним

навантаженням. Відповідно до закону електромагнітної індукції, у момент різкого закриття транзистора (коли ШІМ переходить у низький рівень) магнітне поле в обмотках двигуна колапсує, викликаючи зворотний сплеск високої напруги (самоіндукцію), який може сягати сотен вольт.

У реальній схемі для гасіння цих сплесків паралельно обмоткам двигуна в інверсному напрямку обов'язково вмикається зворотний діод (Flyback Diode), наприклад, швидкодіючий діод Шотткі (тип 1N5822)[10].

У середовищі Tinkercad Circuits внутрішня математична модель віртуального двигуна та MOSFET-транзистора вже має інтегровані захисні діоди на кристалі (Body Diode), що забезпечує стабільну роботу віртуального стенда без додавання зовнішнього діода на макетну плату. Споживання струму на рівні 191 мА при напрузі 12.0 В, зафіксовані під час тестування, підтверджують, що транзистор працює в ключовому (насиченому) режимі з мінімальним виділенням тепла.

5.3.3. Енергетичний баланс та заземлення

Критичним аспектом надійності є об'єднання ліній заземлення (POWER_SUPPLY- та GND Arduino). Без цього кроку затвор транзистора не мав би єдиної точки відліку потенціалу напруги, що унеможливило б коректну модуляцію ШІМ. Розділення живлення логічної частини (5 В) та силового контуру (12 В) запобігає проникненню високочастотних шумів від щіток двигуна в цифрові ланцюги мікроконтролера, повністю виключаючи зависання процесора ATmega328P.

5.4 Рекомендації щодо фізичної інтеграції системи в бортову мережу транспортного засобу

Для перенесення розробленого прототипу з віртуального середовища Tinkercad Circuits на реальний автомобіль необхідно враховувати специфіку

автомобільної електромережі, яка характеризується високим рівнем імпульсних завад[1,11] від системи запалювання та генератора.

5.4.1. Стабілізація живлення мікроконтролерного блоку

Напруга в бортовій мережі автомобіля номінально становить 12 В, проте при працюючому генераторі вона піднімається до 13.8 – 14.4 В, а в моменти пуску стартера може падати до 7–8 В. Для захисту логічної частини системи (Arduino/ATmega328P) рекомендується:

1. Використовувати автомобільний імпульсний або лінійний КРЕН-стабілізатор (наприклад, мікросхему L7805 або LM2596) з обов'язковим встановленням на вході та виході згладжуючих електролітичних конденсаторів ємністю 470 мкФ та керамічних конденсаторів 0.1 мкФ для фільтрації високочастотних завад.

2. Для захисту від переплутування полярності («переполюсовки») на вході силового контуру необхідно встановити діод Шотткі (наприклад, SS34).

5.4.2. Конструктивне виконання та трасування друкованої плати

При розведенні друкованої плати (PCB) блоку керування необхідно жорстко розділяти сигнальні провідники АЦП та силові доріжки ШІМ, по яких протікає струм двигуна[7]. Силові доріжки від витоку та стоку MOSFET повинні мати ширину не менше 2.5 мм або покриватися додатковим шаром припою для запобігання перегріву плати. Сам блок керування має бути розміщений у герметичному пластиковому або алюмінієвому корпусі зі ступенем захисту не нижче IP65, оскільки він монтується під капотом автомобіля в умовах підвищеної вологості.

5.5 Підсумки до розділу 5

У п'ятому розділі проведено комплексне інженерне дослідження

софтверної та апаратної надійності розробленого пристрою, виконано тестування граничних станів та сформовано рекомендації щодо перенесення прототипу на реальний транспортний засіб. Результати тестування та аналізу відмовостійкості дозволяють стверджувати наступне:

1. Запропоновано методологію тестування програмного забезпечення методом «чорної скриньки» (Black Box Testing) та успішно виконано матрицю тест-кейсів (від ТС-01 до ТС-04) для перевірки модульної функціональної та інтеграційної стабільності прошивки в умовах реального часу.

2. Проведено аналіз стійкості системи до граничних станів (Edge Cases) та апаратних аварій ліній зв'язку. Доведено успішну програмно-апаратну реалізацію концепції безпечного виходу з ладу (fail-safe): при обриві сигнального дроту датчика напруга підтягується до 5 В (код 1023), і система безпечно вимикає ШІМ (0%) для запобігання сухому зносу щіток. При короткому замиканні сигнальної лінії на масу напруга падає до 0 В, що змушує мікроконтролер примусово встановити ШІМ на рівень 100% (255), зберігаючи максимальну оглядовість лобового скла для водія під час аварії електроніки.

3. Обґрунтовано апаратну надійність електричних контурів: підтверджено захисну роль резисторів RR1 (220 Ом) та RR2 (10 кОм) у затворному ланцюзі MOSFET, проаналізовано схему придушення індуктивних зворотних викидів високої напруги обмоток двигуна за допомогою зворотного діода Шотткі (Flyback Diode), а також доведено ефективність розділення ліній заземлення сили й логіки для виключення зависання обчислювального ядра ATmega328P.

4. Сформовано практичні рекомендації щодо фізичної інтеграції блоку в автомобіль, які включають використання імпульсного стабілізатора напруги LM2596 з LC-фільтрами для нівелювання пускових просідань та сплесків генератора автомобіля, встановлення захисного діода SS34 від переполюсовки, розширення силових доріжок друкованої плати (PCB) до 2,5 мм та герметизацію корпусу пристрою за стандартом не нижче IP65.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі повністю вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає у теоретичному обґрунтуванні, розробці, математичному моделюванні та експериментальній верифікації автоматизованої адаптивної системи керування пристроєм очищення скла автомобіля на базі сучасних мікроконтролерних засобів та цифрової обробки сигналів.

За результатами виконання етапів проєктування та досліджень сформовано такі висновки:

1. Проведено глибокий аналіз предметної області та технічних рішень у сфері автоматизації автомобільного склоочищення. Встановлено, що промислові системи детектування опадів мають високу вартість і закриту архітектуру, що обмежує їх інтеграцію в автомобілі базових комплектацій. Досліджено три фізичні методи фіксації вологи: резистивний, оптичний та комп'ютерний зір. Доведено, що оптичний метод на основі інфрачервоного випромінювання та явища порушення повного внутрішнього відбиття є найбільш збалансованим за критеріями надійності, стійкості до зносу кузова та точності вимірювання в умовах мінливих опадів. На основі цього сформовано технічні та функціональні вимоги до вбудованої системи комп'ютерної інженерії, включаючи обмеження щодо часу інерційності відгуку привода (до 0,5–0,8 с) та електромагнітної сумісності.

2. Спроектовано дворівневу модульну архітектуру вбудованої системи реального часу, яка логічно розділена на сигнальний контур (збір даних за допомогою оптичного датчика, АЦП мікроконтролера) та силовий контур керування (драйвер MOSFET, електродвигун постійного струму бортової мережі 12 В). Розроблено блок-схему алгоритму функціонування системи із замкненим циклом опитування периферії. Для уникнення постійного калібрування сенсора

під час кожного пуску двигуна автомобіля розроблено оптимізовану структуру даних ConfigData та Memory Map для енергонезалежної пам'яті EEPROM мікроконтролера, що захищена від збоїв обчисленням 8-бітної циклічної контрольної суми CRC8.

3. Створено математичну імітаційну модель системи в середовищі MATLAB/Simulink, яка дозволила верифікувати динамічні характеристики виконавчого привода постійного струму. Аналіз отриманого перехідного процесу швидкості приводу показав, що при стрибкоподібній подачі максимального керуючого сигналу величина перерегулювання становить $\sigma \approx 33,6\%$ тривалістю менше 0,1 с, що повністю нівелюється механічною інерцією реального черв'ячного редуктора. Час стабілізації системи та виходу на усталену робочу траєкторію становить $t_{reg} = 1,2$ с. Робота блоку лінійної інтерполяції забезпечила нульову статичну похибку, що підтверджує стійкість закладених алгоритмічних рішень.

4. Виконано строге апаратне обґрунтування та математичний розрахунок електронних компонентів блоку керування. Обґрунтовано доцільність вибору 8-бітного мікроконтролера ATmega328P (платформа Arduino) порівняно з 32-бітними ARM-архітектурами через кращу стійкість до завад автомобільної бортової мережі при логічних рівнях 5 В та достатність внутрішньої периферії. Розраховано номінал струмообмежувального резистора в контурі затвора польового транзистора MOSFET IRF540N: встановлено, що номінал 220 Ом обмежує піковий струм заряду вхідної ємності затвора до безпечних 22,7 мА, захищаючи цифровий порт процесора від струмового перевантаження. Розраховано максимальну потужність розсіювання резистора затвора ($P \approx 0,113$ Вт), що дозволило вибрати стандартний типорозмір 0805. Обґрунтовано використання стягуючого резистора номіналом 10 кОм для утримання транзистора в закритому стані під час завантаження мікроконтролера.

5. Розроблено програмне забезпечення вбудованої системи мовою C++ та реалізовано алгоритм цифровізації сигналів сенсора на основі кільцевого буфера ємністю $N = 10$ для фільтрації методом ковзного середнього (SMA). Це

дозволило ефективно придушувати високочастотні шуми від вібрацій кузова автомобіля та випадкових електромагнітних наводок. Інтегрована функція `map()` забезпечила плавну лінійну трансформацію відфільтрованих цифрових відліків АЦП (у діапазоні 900...300) у лінійний коефіцієнт заповнення апаратного ШІМ (від 76 до 204, що відповідає шпаристості ~30–80%) для адаптивного регулювання швидкості привода постійного струму.

6. Складено експериментальний симуляційний стенд у CAD-середовищі Tinkercad Circuits та проведено серію комплексних випробувань. Хід тестування у реальному часі зафіксовано за допомогою логів Монітора послідовного інтерфейсу (Serial Monitor). Експериментально доведено, що повний цикл обробки даних мікроконтролером триває в межах 20–25 мс, що суттєво перекидає вимоги автомобільної безпеки. Обґрунтовано розбіжність між швидкістю голого ротора двигуна в симуляторі (23864 RPM) та реальною швидкістю двірників (115 RPM) через наявність автомобільного черв'ячного редуктора з коефіцієнтом редукції $i = 200:1$. Результати калібрування в усьому динамічному діапазоні інтенсивності опадів зведено у підсумкову таблицю режимів роботи.

7. Проведено аналіз граничних станів (Edge Cases) та апаратної відмовостійкості системи. Методом «чорної скриньки» підтверджено безпомилковість програмної логіки. Доведено успішну реалізацію стратегії безпечної відмови (*fail-safe*): у разі виникнення нештатної ситуації у вигляді обриву сигнального дроту датчика система переходить у режим «Сухо» і блокує ШІМ (0%), захищаючи гумові щітки від зносу, а при короткому замиканні сигнальної лінії на масу автомобіля — автоматично активує максимальний режим очищення скла (100% ШІМ). Це гарантує збереження оглядовості для водія і дозволяє безпечно зупинити транспортний засіб в умовах аварії електроніки.

8. Сформовано практичні інженерні рекомендації щодо фізичного перенесення розробленого прототипу у реальний автомобіль. Обґрунтовано необхідність встановлення імпульсного стабілізатора напруги (типу LM2596) з

конденсаторними фільтрами низьких і високих частот для нівелювання перепадів напруги під час пуску стартера та роботи генератора. Визначено критерії трасування друкованої плати (PCB) — жорстке розділення сигнальної та силової землі, розширення силових доріжок ШІМ-каскаду до ширини не менше 2,5 мм, а також захист блоку керування за стандартом не нижче IP65 для роботи в умовах моторного відсіку.

Розроблена автоматизована система має високий ступінь готовності, економічну доцільність впровадження та гнучку архітектуру коду, що дозволяє легко масштабувати її та адаптувати під конкретні моделі легкового і комерційного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баранов В. М. Автомобільна електроніка та вбудовані мікроконтролерні системи: Навч. посібник. — К.: Вища школа, 2018. — 284 с.
2. Броуді Д. Мікроконтролери AVR: архітектура, програмування, проектування цифрових систем керування. — К.: МК-Прес, 2019. — 320 с.
3. Гевко Б. М. Автоматизація виробничих процесів та елементи автоелектроніки / Б. М. Гевко, О. І. Ляшук. — Львів: Світ, 2021. — 245 с.
4. Квасніков В. П. Цифрова обробка сигналів у вбудованих комп'ютеризованих системах / В. П. Квасніков, Д. В. Квасніков. — К.: Техніка, 2020. — 188 с.
5. Кондратенко Ю. П. Системи автоматичного керування виконавчими механізмами транспортних засобів. — Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2022. — 312 с.
6. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: Підручник для вузів / М. Г. Попович, О. В. Кіселичник. — К.: Либідь, 2009. — 424 с.
7. Рябенський В. М. Цифрова схемотехніка та проектування мікроконтролерних пристроїв / В. М. Рябенський, Л. В. Жуков. — Житомир: ПП Рута, 2017. — 400 с.
8. Сухенко В. Ю. Моделювання динамічних систем у середовищі MATLAB/Simulink. — К.: НУХТ, 2019. — 156 с.
9. Тимчик Г. С. Оптикоелектронні сенсори та методи детектування метеорологічних факторів / Г. С. Тимчик, В. А. Скиба. — К.: Політехніка, 2016. — 210 с.
10. Хоровиц П. Искусство схемотехники: Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. — М.: Мир, 2015. — 704 с.
11. Шарапов С. О. Надійність та завадостійкість автомобільних електронних систем реального часу. — Харків: ХНАДУ, 2020. — 196 с.

- 12.Юрченко О. М. Системи широтно-імпульсної модуляції в силовій електроніці / О. М. Юрченко, В. О. Левін. — К.: Наукова думка, 2018. — 175 с.
- 13.Arduino Uno R3 Hardware Reference Design [Електронний ресурс]. — Developer Documentation, 2023.
<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
- 14.ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet [Електронний ресурс] / Atmel Corporation. — 2018. — 294 p.
https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- 15.International Rectifier. IRF540N Advanced Power MOSFET Datasheet [Електронний ресурс]. — 2015. — 8 p.
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF540N-DS-v01_01-EN.pdf
- 16.MathWorks. MATLAB and Simulink for Embedded Systems User's Guide [Електронний ресурс]. — Natick: The MathWorks, Inc., 2024. — 512 p.
<https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- 17.Moving Average Filters for Digital Signal Processing [Електронний ресурс] // Analog Devices Technical Articles. — 2021.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/>
- 18.Opamp-based Voltage Comparators in Sensor Applications / Texas Instruments Application Report. — 2020. — 24 p.
- 19.Pulse-Width Modulation (PWM) Speed Control of DC Motors / Toshiba Electronic Devices Application Note. — 2022. — 18 p.
- 20.Tinkercad Circuits Simulation Engine Reference Manual [Електронний ресурс] / Autodesk, Inc. — 2024.
<https://www.tinkercad.com/>
- 21.Watson J. Automotive Windshield Wiper Systems and Rain Sensors / J. Watson, R. Miller // SAE Technical Paper Series. — 2019. — No. 2019-01-0452. — 12 p.