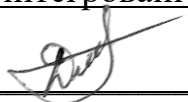


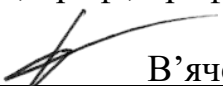
Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра комп'ютерних систем управління

Бакалаврська кваліфікаційна робота
на тему:
«АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕАКЦІЇ ОПЕРАТОРА
НА КРИЗОВУ СИТУАЦІЮ»

Виконав: студент 4 курсу, групи 2AKIT-216
спеціальності 151 – Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології


_____ Євгеній ДОЛЮК

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. КСУ


_____ В'ячеслав КОВТУН

« 13 » червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. АІТ


_____ Юрій ІВАНОВ

« 13 » червня 2025 р.

Допущено до захисту
Зав. кафедри КСУ


_____ В'ячеслав Ковтун
«16» червня 2025р.

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра комп'ютерних систем управління
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 15 – Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо - професійна програма – Інтелектуальні комп'ютерні системи управління

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри КСУ
Д.т.н., проф.

 В'ячеслав КОВТУН
“23” травня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
студенту Долюку Євгенію Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизована система моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію
керівник роботи Ковтун В'ячеслав Васильович
затверджені наказом ВНТУ № 97 від 20.03.2025 р.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025 року
3. Вихідні дані до роботи:
 1. Кожушко, І. П. (2020). Біоінженерні аспекти систем виявлення втоми оператора. Біомедична інженерія і технологія, 1(2), 52–59
 2. Чубенко, О. М. (2019). Використання Arduino в системах моніторингу: досвід розробки. Інформаційні технології і засоби навчання, 1(69), 21–28
4. Зміст текстової частини: Аналіз проблеми зниження пильності оператора в умовах ризику. Огляд сучасних систем виявлення сонливості. Формулювання технічних вимог. Розробка структури та алгоритмів системи. Вибір обладнання. Реалізація апаратно-програмної частини системи та моделювання
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Архітектурна схема системи (апаратна та програмна), блок-схема алгоритму виявлення критичних станів оператора, структурна схема апаратного модуля та принцип роботи системи, блок-схема розгортання та інтеграції з базою даних

1. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв

2. Дата видачі завдання 27.05.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	20.02.2025	24.02.2025	
2	Визначення технічних характеристик системи моніторингу	05.05.2025	10.05.2025	
3	Постановка задачі, розробка ТЗ	11.05.2025	16.05.2025	
4	Розробка структурної, функціональної та принципової схем системи	17.05.2025	19.05.2025	
5	Розробка алгоритму роботи та логіки реагування системи	20.05.2025	24.05.2025	
6	Розробка програмного забезпечення та моделювання	25.05.2025	02.06.2025	
7	Перевірка ПЗ на відповідність вимогам	03.06.2025	05.06.2025	
8	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування	06.06.2025	07.06.2025	
9	Захист БКР	17.06.2025	17.06.2025	

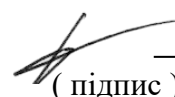
Студент


(підпис)

Євгеній ДОЛЮК

(ім'я і ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

В'ячеслав КОВТУН

(ім'я і ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 95 сторінок формату А4, містить 30 рисунків, 17 таблиць, 4 додатка, список використаних джерел налічує 24 найменування.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію. Така система дозволяє виявляти ознаки зниження уваги або сонливості, щоб своєчасно запобігти потенційно небезпечним подіям.

У теоретичній частині розглянуто сучасні методи аналізу фізіологічних та поведінкових параметрів оператора. Визначено технічні вимоги до системи та обґрунтовано вибір сенсорів і алгоритмів. У практичній частині створено апаратно-програмний прототип, проведено моделювання й тестування системи, що підтвердило її ефективність.

Ключові слова: автоматизація, оператор, моніторинг, сонливість, безпека, сенсори, кризова ситуація, система контролю, пильність, реакція.

ABSTRACT

The bachelor's thesis consists of 95 A4 pages, contains 30 figures, 17 tables, 4 appendices, and a list of references of 24 titles.

The aim of the work is to develop an automated system for monitoring the operator's response to a crisis situation. Such a system allows detecting signs of reduced attention or drowsiness in order to prevent potentially dangerous events in a timely manner.

In the theoretical part, the article discusses modern methods of analysing the physiological and behavioural parameters of an operator. The technical requirements for the system are defined and the choice of sensors and algorithms is justified. In the practical part, a hardware and software prototype was created, the system was modelled and tested, which confirmed its effectiveness.

Keywords: automation, operator, monitoring, drowsiness, safety, sensors, crisis situation, control system, vigilance, reaction.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП	4
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕНЬ	6
1.1 Проблематика зниження пильності оператора в критичних умовах	6
1.2 Статистичні аспекти проблеми та характеристика основних причин виникнення помилок у стані сонливості	6
1.3 Системи та технології виявлення ознак сонливості операторів для запобігання аварійним ситуаціям.....	12
1.4 Фізіологічні та психологічні чинники втрати пильності операторів	14
1.5 Огляд сучасних технологій виявлення ознак сонливості операторів	16
1.6 Визначальні технічні та функціональні вимоги до системи виявлення сонливості оператора.....	21
2 ВИМОГИ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ВТРАТИ ПИЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА	23
2.1 Структура та адаптивність архітектури системи виявлення втрати пильності оператора	23
2.2 Вибір інфрачервоного сенсора для реалізації системи виявлення втрати пильності.....	24
2.3 Вибір п'єзоелектричного випромінювача.....	30
2.4 Вибір вібраційного мотора.....	34
2.5 Вибір мікроконтролера з сімейства Arduino	37
3 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	45
3.1 Розгортання апаратної частини системи	45
3.2 Мова програмування в сімействі Arduino	50
3.3 Інструмент Arduino Integrated Development Environment	52
3.4 Програмування системи моніторингу втрати реакції оператора в критичних умовах	53

3.5 Підходи до підвищення ефективності автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію	57
3.6 Платформа Arduino Wemos D1 Mini.....	59
3.7 Специфікація платформи Arduino Wemos D1 Mini.....	60
3.8 Налаштування вебсервера на базі Arduino Wemos D1 Mini.....	61
3.9 Реалізація дистанційного керування.....	63
3.10 Перспективи розширення сфери застосування створеної системи	67
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки на наявність запозичень	76
Додаток Б (обов'язковий) Технічне завдання.....	77
Додаток В (довідковий) Лістинг.....	80
Додаток Г (обов'язковий) Ілюстративна частина	83

ВСТУП

Актуальність. У сучасних умовах швидкої цифровізації та зростаючої залежності критичних інфраструктур від людського фактору, особливої актуальності набуває проблема оперативної реакції людини на кризові ситуації. У сферах, де надзвичайно важливою є точність дій, збереження концентрації та швидкість прийняття рішень – наприклад, у транспорті, енергетиці, медицині, промисловому управлінні чи авіації – будь-яке порушення уваги або втрата пильності оператором може призвести до значних матеріальних збитків, порушення технологічних процесів або навіть загрози життю.

Фізіологічне виснаження, психоемоційна напруга, тривала монотонна діяльність і зовнішні стресові фактори здатні суттєво впливати на якість реагування оператора. Затримка з реакцією або її неадекватність у критичній ситуації – це одна з ключових загроз у системах, де діяльність людини є невід’ємною складовою складних технічних процесів.

Це формує об’єктивну необхідність створення автоматизованих систем, здатних у реальному часі відстежувати та оцінювати поведінкові або фізіологічні індикатори оператора з метою виявлення ознак потенційної дезорієнтації, зниження уваги або дестабілізації емоційного стану. Такі системи мають своєчасно формувати сигнали попередження або активувати механізми підтримки, що дозволяє мінімізувати ризики у разі розвитку критичної ситуації.

У межах цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи розглядається комплексне технічне рішення – автоматизована система моніторингу реакції оператора, що дозволяє фіксувати зміни у стані користувача на підставі низки ключових параметрів. Основною метою дослідження є створення прототипу, здатного здійснювати моніторинг та інтерпретацію поведінкових патернів для попередження ситуацій, які можуть набути кризового характеру.

Мета і завдання дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію з використанням доступних сенсорів та мікроконтролерів.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні **задачі**:

- 1) критичний огляд існуючих рішень у сфері виявлення дезадаптації оператора в реальному часі;
- 2) оцінка ефективності методів аналізу фізіологічних та поведінкових параметрів;
- 3) побудова апаратного модуля збору даних з відповідних сенсорів;
- 4) розробка програмної логіки аналізу;
- 5) формування сигналів попередження в умовах ймовірного загострення ситуації;

Об'єктом дослідження є поведінка людини в умовах потенційного інформаційного або фізичного перевантаження, зокрема реакції на зовнішні сигнали в ситуаціях підвищеного ризику.

Предметом дослідження є технічні та програмні засоби автоматизованого виявлення ознак втрати контролю чи уповільнення реакції оператора.

Методи дослідження. У роботі застосовуються методи системного та порівняльного аналізу, алгоритмічного моделювання, а також практична реалізація в середовищі Arduino.

Новизна дослідження полягає у створенні інтегрованого рішення, яке поєднує фізіологічний моніторинг із алгоритмами інтерпретації поведінкових патернів для раннього попередження про кризовий стан оператора.

Практичною цінністю є можливість застосування розробленої системи в транспорті, промисловості або критичних службах для підвищення безпеки та зниження впливу людського фактору.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕНЬ

1.1 Проблематика зниження пильності оператора в критичних умовах

Проблема засинання або втрати концентрації особою, що виконує відповідальну діяльність, є однією з найбільш загрозливих у системах з підвищеним рівнем ризику. У випадку дорожнього руху мова йде про водіїв транспортних засобів, однак у ширшому контексті термін "оператор" охоплює працівників, задіяних у технологічних, медичних, диспетчерських або аварійно-рятувальних процесах. Усі ці ролі потребують стабільного рівня уваги, вчасної реакції на зовнішні подразники та прийняття рішень у динамічно змінному середовищі. Умови тривалого фізичного чи когнітивного навантаження, нестача відпочинку, психологічний стрес і надмірна монотонність виконуваних завдань спричиняють порушення працездатності, що, у свою чергу, підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій [4].

Особливо критичним цей ризик є у транспортному середовищі. Недостатній контроль за рівнем втоми водія може мати катастрофічні наслідки. Аби уникнути втрати керованості, необхідне впровадження превентивних технологій, які б аналізували індикатори психофізіологічного стану оператора та забезпечували раннє виявлення стану сонливості або когнітивної дезадаптації [1].

1.2 Статистичні аспекти проблеми та характеристика основних причин виникнення помилок у стані сонливості

Інтенсивне зростання обсягів робочого навантаження у багатьох професіях призводить до систематичного порушення режиму сну, що, за даними [5], є одним із провідних чинників зниження ефективності людини в умовах динамічної діяльності. Зростання рівня стресу внаслідок соціальних

та професійних викликів додатково ускладнює здатність оператора зберігати концентрацію, що підтверджується статистичними джерелами [21].

На основі емпіричних даних виокремлюють низку типових порушень, характерних для діяльності в стані сонливості. По-перше, втомлений оператор втрачає здатність фокусуватися на поточному завданні: чим вищий рівень стомлення, тим більше зусиль потребує елементарна концентрація, а отже – знижується якість контролю за зовнішніми умовами. По-друге, у стані перевтоми помітно уповільнюється швидкість реакції, що аналогічно впливу наркотичних або алкогольних речовин, і суттєво обмежує здатність до уникнення небезпеки.

Крім того, когнітивна здатність оператора адекватно сприймати ситуацію значно послаблюється, що ускладнює прийняття раціональних рішень. Утомлений мозок обробляє сигнали повільніше, що особливо критично при необхідності оперативного реагування. Також типовою є помилка у визначенні просторових параметрів – зокрема оцінки відстані та швидкості об'єктів, що наближаються. Це може провокувати як надмірне зниження швидкості, так і небезпечне перевищення допустимих меж руху.

У граничному випадку відбувається повне відключення свідомості – мимовільне засинання, яке призводить до втрати керування системою або пристроєм. Для водія це означає неконтрольований виїзд за межі дорожнього полотна або зіткнення з перешкодами. В інших сферах – затримку аварійного реагування, критичну помилку в обчисленнях або несвоєчасне відключення обладнання, що може спричинити катастрофічні наслідки.

Таким чином, систематичний аналіз причин і наслідків зниження реакції оператора в умовах перевтоми підкреслює необхідність розробки спеціалізованих автоматизованих рішень, здатних виявляти ранні ознаки небезпечного стану та сприяти його нейтралізації до моменту настання критичної фази.

Поглиблене дослідження, проведене з метою верифікації впливу сонливості під час керування транспортними засобами, засвідчило значне

зростання ймовірності виникнення аварійних ситуацій, зокрема з летальними наслідками. Згідно з оновленими статистичними розрахунками, ризик, зумовлений когнітивною втомою або мимовільним засинанням оператора, є співставним із такими критичними чинниками, як керування на слизькому дорожньому покритті або грубе порушення напрямку руху в зонах з одностороннім рухом.

Первинні оцінки правоохоронних органів щодо частки ДТП, спричинених сонним водінням, були значно заниженими: фіксувалося лише 1,9 % таких випадків. Утім, після проведення повторного аналізу з урахуванням опосередкованих ознак та характеру дорожньої ситуації в момент інциденту, було встановлено, що реальний відсоток сягає близько 16,8 %, що підкреслює системну недооцінку даної проблеми (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Основні чинники смертельних ДТП та їхня частка

Причина	Кількість смертельних аварій, тис. од.	Частка ДТП зі смертельними наслідками, %
Перевищення рекомендованої швидкості	10,947	18,2
Вплив алкоголю, заспокійливих або стимуляторів	6,492	11,0
Відхилення від заданої траєкторії руху	3,971	6,5
Ігнорування пріоритету на перехрестях	4,188	6,9
Відволікання уваги на сторонні об'єкти	3,284	5,4
Нехтування правилами маневрування	2,543	4,2
Надмірна реакція на перешкоди	1,793	2,9
Недотримання ПДР	2,402	3,9

Таблиця 1.1 (Продовження)

Ризиковане водіння без дотримання техніки	2,601	4,2
Аварійні маневри у складних погодних умовах	1,245	2,0
Порушення зорової орієнтації	1,602	2,6
Рух у протилежному напрямку	1,126	1,9
Сонливість	1,265	1,8
Невдало обраний кут повороту	0,473	0,8

Ретроспективний аналіз, що охоплює десятирічний період, демонструє стабільну наявність інцидентів із летальними наслідками за участю водіїв, які перебували у стані сонливості. Незважаючи на загальне зниження кількості таких випадків після 2020 року, показники залишаються на рівні, який не дозволяє ігнорувати проблему. У 2015 році було зареєстровано 1170 осіб, що потрапили у смертельні ДТП внаслідок втоми; у 2024 році ця кількість становила 930 осіб. Водночас кількість загиблих у цих аваріях зменшилася з 900 до 670, що пояснюється покращенням пасивної безпеки транспортних засобів, однак не нівелює загрозу як таку.

Таблиця 1.2 – Статистичні дані щодо ДТП із сонливими водіями (2015–2024)

Рік	Кількість сонних водіїв, осіб	Частка в загальному обсязі смертельних ДТП, %	Кількість загиблих унаслідок сонливості, осіб
2015	1170	2,3	900
2016	1020	2,0	740
2017	1095	2,1	810
2018	960	1,9	690
2019	870	1,8	640
2020	835	1,7	600
2021	765	1,6	560
2022	905	1,8	670
2023	985	1,9	710
2024	930	1,7	670

Аналіз наведених статистичних показників (табл. 1.2) дозволяє стверджувати, що сонливість, попри її відносно невисоку частку серед загальної кількості дорожньо-транспортних пригод, посідає важливе місце серед чинників, які безпосередньо призводять до фатальних наслідків [24]. Такий дисбаланс між поширеністю і рівнем загрози вказує на глибшу проблему, яка потребує подальшого дослідження з метою створення дієвих механізмів попередження [12]. Відтак, у контексті забезпечення безпеки учасників дорожнього руху питання вивчення феномену сонливості набуває стратегічного значення [2], зокрема у сфері розробки інтелектуальних систем моніторингу стану водія й впровадження алгоритмів раннього попередження про ризик втрати пильності [3].

У межах одного з досліджень [4] було проведено оцінку впливу тривалості водіння на ймовірність появи ознак сонливості. Результати експерименту показали, що втома може проявлятися навіть при виконанні короткотривалих рейсів: орієнтовно 30 % респондентів повідомили про кивання головою під час поїздок тривалістю менше 60 хвилин. Такий результат свідчить, що ключовим фактором не завжди виступає тривалість маршруту, а радше накопичений дефіцит сну, стресове навантаження або біоритмічні особливості. Це підкреслює важливість підвищення поінформованості серед водіїв щодо непередбачуваності виникнення сонливості незалежно від відстані.

Крім того, у дослідженнях було проаналізовано гендерні та вікові відмінності в сприйнятливості до сонливості за кермом. Дані, отримані з різних джерел, не дозволяють сформулювати однозначну картину. З одного боку, низка робіт свідчить, що чоловіки частіше демонструють ознаки втоми під час керування, тоді як інші дослідження зафіксували більшу схильність жінок до участі в ДТП, де основним чинником була саме сонливість [24]. Відповідно, дані потребують подальшого узагальнення з урахуванням ширших вибірок і контекстуальних чинників.

Щодо віку, виявлено, що найбільш вразливою є молодь, зокрема особи віком від 21 до 29 років. Представники цієї вікової категорії вдвічі частіше за інші групи повідомляли про симптоми мікросну, зокрема кивання головою під час керування, що мало місце впродовж останніх семи днів [4]. Це може бути наслідком порушеного сну, нерегулярного графіка або ігнорування відновлювального відпочинку. Таким чином, для ефективної профілактики слід розробляти індивідуалізовані рекомендації щодо управління режимом сну залежно від вікових і статевих характеристик водія. Залучення до таких програм елементів інформування, біометричного моніторингу та адаптивних інтерфейсів може значно підвищити безпеку дорожнього руху.

У межах комплексного вивчення факторів, що впливають на появу сонливості під час виконання операторських завдань, особливу увагу було приділено часовим параметрам. Дані свідчать, що ймовірність розвитку втоми істотно підвищується у нічний період: згідно з результатами дослідження [4], приблизно 50 % усіх випадків засинання під час керування відбуваються у часовому інтервалі з 21:00 до 06:00. Це безпосередньо пов'язано з природними добовими ритмами людини – зниженням рівня гормонів активації, зміною фаз сну та неспання, а також зниженням температури тіла. Утім, виявлено, що навіть у денні години ризик сонливості залишається суттєвим: близько 26 % опитаних повідомили про симптоми втоми у проміжку між 12:00 та 17:00. Це свідчить про важливість обережного планування поїздок не лише вночі, а й у денний час, коли може мати місце зниження рівня пильності, зокрема після обіду.

Варто також враховувати, що втома за кермом часто не проявляється у відкритій формі, що ускладнює її самостійне розпізнавання. Були виявлені специфічні поведінкові та фізіологічні індикатори, які сигналізують про необхідність припинення керування та відпочинку [21]. Одним з поширених симптомів є порушення фокусування зору: водії відчують подразнення очей, посилене кліпання, розмитість зображення або труднощі з утриманням

погляду. До цього може додаватись відчуття важкості в ділянці голови, коли стає складно підтримувати голову у стабільному положенні під час поїздки.

Крім того, важливим сигналом є часте позіхання, яке вказує на зниження кисневого обміну та зростання загальної втоми. Якщо оператор не може згадати останні кілька хвилин подорожі, це може свідчити про епізод мікросну – короткотривалого порушення свідомості. Порушення емоційного стану – дратівливість, агресивність, зниження толерантності до дорожньої ситуації – також можуть бути ознаками нервової виснаженості.

Ще однією небезпечною ознакою є порушення координації руху: спонтанні виїзди за межі смуги, нездатність правильно оцінити відстань до об'єктів попереду, або пропуск знайомих поворотів та знаків, які раніше не викликали труднощів. Усі ці прояви сигналізують про зниження когнітивної функціональності водія, що робить продовження поїздки небезпечним як для нього самого, так і для інших учасників дорожнього руху. Таким чином, виявлення та фіксація подібних ознак у рамках автоматизованої системи моніторингу є надзвичайно важливою умовою забезпечення оперативної реакції у разі критичного зниження пильності.

1.3 Системи та технології виявлення ознак сонливості операторів для запобігання аварійним ситуаціям

У центрі цього дослідження перебувають інженерні рішення, спрямовані на розпізнавання ознак зниження пильності у людини, яка виконує відповідальну діяльність, зокрема у сфері транспортного керування. Сучасні системи виявлення сонливості ґрунтуються на застосуванні різноманітних технологій, що дозволяють реєструвати фізіологічні, поведінкові та кінематичні параметри діяльності оператора [1]. Йдеться про методи, що передбачають безпосередній моніторинг біосигналів – наприклад, електроокулографії або пульсометрії – а також про аналіз мікрореакцій: частоти кліпання, кивків голови, положення тіла, траєкторій руху рук тощо.

Однією з ключових цілей таких систем є своєчасне виявлення перших ознак втрати уваги, що можуть бути спровоковані не лише фізіологічною втомою, а й психоемоційною нестабільністю або дією сторонніх речовин. Це дозволяє оперативно зреагувати ще до настання критичної фази, коли оператор повністю втрачає контроль над системою або ситуацією.

Для об'єктивної оцінки ефективності розроблюваних рішень важливо враховувати широкий спектр наявних технологій, їхню структурну складність, ступінь інвазивності, вимоги до обчислювальних ресурсів, а також точність розпізнавання станів у реальних умовах. Зокрема, в рамках цього дослідження аналізуються три ключові підходи: технології на основі відеоспостереження за обличчям, системи аналізу параметрів руху транспортного засобу та мультимодальні рішення, що поєднують кілька каналів збору даних. Кожен із зазначених напрямів має свої переваги й обмеження – наприклад, відеоаналіз забезпечує високу точність, але залежить від освітлення, тоді як контроль за траєкторією руху менш чутливий, проте працює незалежно від зовнішніх умов.

Крім технічної реалізації, дослідження охоплює й аспект масштабного впровадження таких систем у мережах громадського або вантажного транспорту, зокрема з урахуванням питань стандартів, сертифікації та правового регулювання [22]. Також порушується проблема економічної доцільності: витрати на впровадження мають бути співвіднесені з очікуваним ефектом у зменшенні аварійності.

Таким чином, узагальнення поточного стану розвитку технологій виявлення сонливості й формування критеріїв їхньої ефективності є важливим кроком для подальшого вдосконалення профілактичних інструментів безпеки. Системи цього типу не лише знижують ризики для самого оператора, а й виступають елементом соціальної відповідальності у межах транспортної інфраструктури, забезпечуючи загальний рівень безпеки для всіх учасників руху.

1.4 Фізіологічні та психологічні чинники втрати пильності операторів

У межах поглибленого аналізу феномену засинання під час відповідальної діяльності, зокрема керування транспортом, доцільно виділити два ключові аспекти – фізіологічний і психологічний – що істотно впливають на зниження рівня уваги й ефективності оператора (рис. 1.1). Саме взаємодія цих чинників формує критичні стани, які можуть призвести до помилок з високим ризиком.

З боку фізіології одним із визначальних чинників є циркадні ритми – біологічні цикли сну та неспання, що обумовлюють добові коливання активності організму [21]. Їх порушення, викликане зміщенням режиму відпочинку, недостатньою тривалістю сну або його низькою якістю, безпосередньо впливає на швидкість реакцій, рівень когнітивної концентрації, спроможність до прийняття рішень. У стані порушеної біологічної рівноваги навіть за короткої тривалості поїздки або виконання завдань з високою когнітивною насиченістю оператор може відчувати симптоми сонливості, які часто розвиваються непомітно.

Окрім загального порушення сну, вплив має і неузгодженість між тілесним ресурсом і нервовою системою. Це відображається у повільнішому обробленні зовнішніх подразників, зниженій моторній координації та зменшенні здатності адаптувати поведінку до змінного середовища.

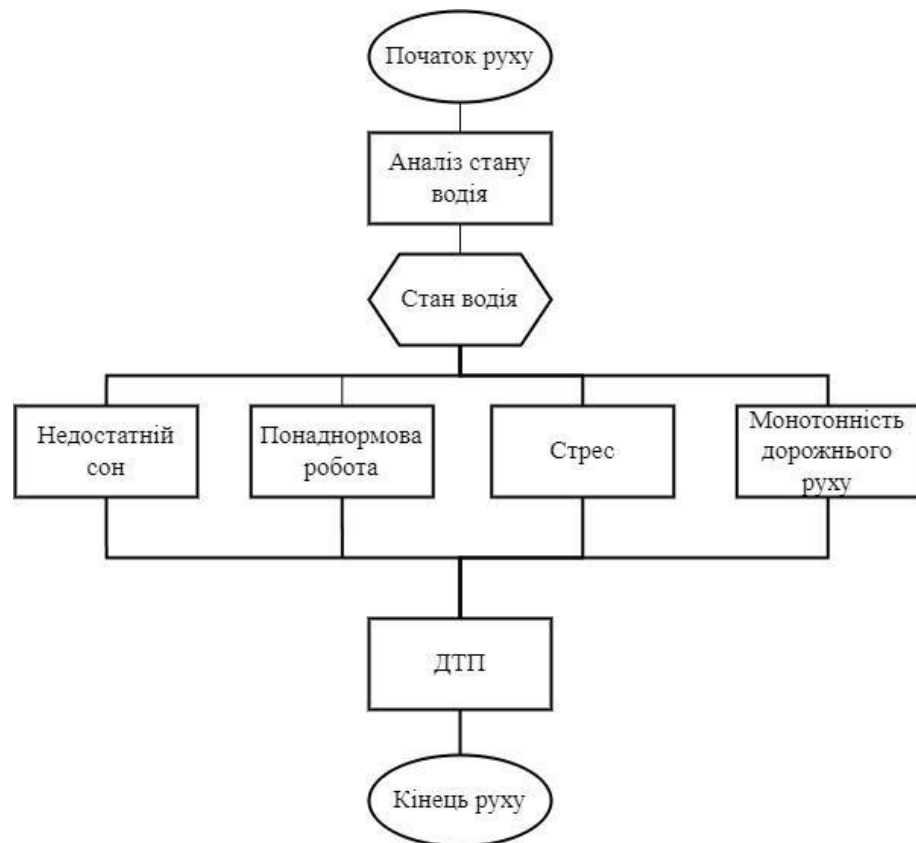


Рисунок 1.1 – Блок-схема провідних факторів, що спричиняють сонливість оператора

Психологічна складова формує не менш значний пласт проблеми. Хронічний або епізодичний стрес, викликаний як професійною, так і особистою сферою, негативно впливає на увагу, пам'ять і здатність прогнозувати дорожню чи ситуаційну обстановку. Монотонність діяльності, як-от керування на довгих прямих ділянках траси або виконання рутинних завдань без варіативності, сприяє індукції стану апатії, що також знижує рівень когнітивного зосередження.

Емоційна дестабілізація, зумовлена внутрішнім напруженням, психоемоційною перевтомою або неспокійною атмосферою, може викликати імпульсивну поведінку, зниження рівня контролю або надмірно ризиковані дії в умовах нестандартних ситуацій [21]. У таких випадках оператор, попри зовнішню активність, може бути не в змозі швидко адаптуватися до критичних змін або своєчасно зреагувати на раптову загрозу.

Блок-схема, розроблена для ілюстрації цих взаємозв'язків, дає змогу виокремити конкретні механізми переходу від хронічного або ситуативного виснаження до небезпечного стану втрати контролю. Наприклад, комбінація недостатнього сну, високого емоційного навантаження та відсутності зовнішніх подразників призводить до мимовільного засинання, що критично підвищує ризик дорожньо-транспортної події [7]. Урахування таких залежностей є фундаментом для побудови ефективних автоматизованих систем, що спираються на комплексну оцінку фізіо-поведінкових параметрів у реальному часі.

Таким чином, розгляд фізіологічних і психологічних передумов втрати пильності дозволяє сформулювати цілісне уявлення про динаміку розвитку сонливості у відповідальних видах діяльності. Ґрунтуючись на цьому розумінні, можна не лише виявляти ознаки наближення до критичного стану, а й проектувати алгоритми попередження, що забезпечать стабільне функціонування оператора в умовах підвищеного ризику.

1.5 Огляд сучасних технологій виявлення ознак сонливості операторів

У практиці досвідчених водіїв поширені індивідуальні стратегії подолання стану втоми під час керування, серед яких – прослуховування гучної музики або вживання напоїв зі стимулювальними властивостями, зокрема кави, зеленого чаю чи енергетиків [23]. Проте ці методи не гарантують стабільного ефекту, особливо якщо стан сонливості зумовлений глибоким фізіологічним виснаженням, хворобливими станами або впливом тривалого стресу [21]. У таких випадках реакція організму на зовнішні подразники може бути настільки уповільненою, що використання зовнішніх стимуляторів стає неефективним. У зв'язку з цим дедалі актуальнішим стає створення автоматизованих інтелектуальних систем, які здатні відслідковувати ознаки втоми оператора в реальному часі та своєчасно формувати попереджувальні сигнали [1].

Упродовж останнього десятиліття світові виробники автомобілів – зокрема Toyota, General Motors і Volvo – розпочали масове впровадження систем виявлення втрати пильності водія. Ці системи ґрунтуються на аналізі мікродинаміки обличчя, положення голови, частоти закриття очей або біометричних змін, зафіксованих вбудованими сенсорами (табл. 1.3). Проте широкомасштабне застосування таких рішень обмежується як їхньою вартістю, так і інфраструктурними особливостями автомобіля.

Таблиця 1.3 – Приклади комерційних систем виявлення сонливості від провідних автовиробників

Компанія-виробник	Принцип роботи системи	Орієнтовна вартість, грн
Toyota	Відстеження частоти закриття очей та змін позиції повік за допомогою вбудованої камери, інтегрованої з дисплеєм	29 500
General Motors	Моніторинг кутів нахилу голови, аналіз мікронахилів через внутрішню камеру, передача даних у мультимедійну систему	6 900
Volvo	Вбудовані інфрачервоні сенсори для безконтактного аналізу стану очей у темряві	22 700

Окрім рішень від автовиробників, на ринку наявна значна кількість незалежних електронних пристроїв, розроблених спеціально для фіксації ознак сонливості. Вони можуть працювати автономно або в парі з мобільними додатками. Проте жоден із цих пристроїв не є універсальним – кожен має свої функціональні обмеження або технічні недоліки, які можуть знизити ефективність їх використання в різних умовах експлуатації (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Поширені пристрої виявлення сонливості: характеристики та обмеження

Пристрій	Принцип дії	Обмеження функціональності
Vigo	Вимірювання параметрів руху голови та тіла на основі даних із ІЧ-сенсора та акселерометра	Необхідність придбання окремого модуля для зберігання та обробки даних
StopSleep	Аналіз тиску пальців на рульове колесо, виявлення симетрії хвату	Неможливість керування з однією рукою, що не сумісно з МКПП

Таблиця 1.4 (Продовження)

Vigiton	Сигнальна система, що активується при виявленні сонливості, включає світло- та аудіосигнали	Масивні габарити, що обмежують оглядовість для водія
AntiSleep	Детекція нахилу голови з використанням гіродатчика	Не реагує на повороти голови у бік вікна, складний монтаж у нестандартних салонах
Avita	Вимірювання серцевого ритму для оцінки рівня втоми	Низька автономність батареї, непридатний для тривалих подорожей

Таким чином, хоча сучасні пристрої демонструють прогрес у напрямку детекції ознак сонливості, їх практичне застосування потребує подальшого вдосконалення. Основними напрямками розвитку залишаються інтеграція мультисенсорних каналів, мінімізація інвазивності, підвищення автономності та адаптація до індивідуальних параметрів користувача. Системи майбутнього повинні бути здатними до самонавчання, адаптивної оцінки змін стану оператора та гнучкого реагування на ситуаційні фактори з урахуванням контексту конкретної дорожньої або виробничої обстановки.

Отже, актуальні технічні рішення, спрямовані на попередження засинання водія, ґрунтуються на багатоканальному зборі фізіологічних і поведінкових даних, що дозволяє здійснювати оперативний моніторинг стану оператора в реальному часі [1]. Зокрема, у межах таких систем фіксуються зміни температури тіла, частоти серцевих скорочень, тиску рук на кермі, кутів нахилу голови та інші параметри, що можуть свідчити про початок фаз зниження пильності (рис. 1.2). Завдяки обробці цих сигналів система здатна ідентифікувати відхилення від фізіологічної норми та активувати превентивний механізм – візуальне, звукове або тактильне попередження – яке спрямоване на повернення водія до стану уважності [21].

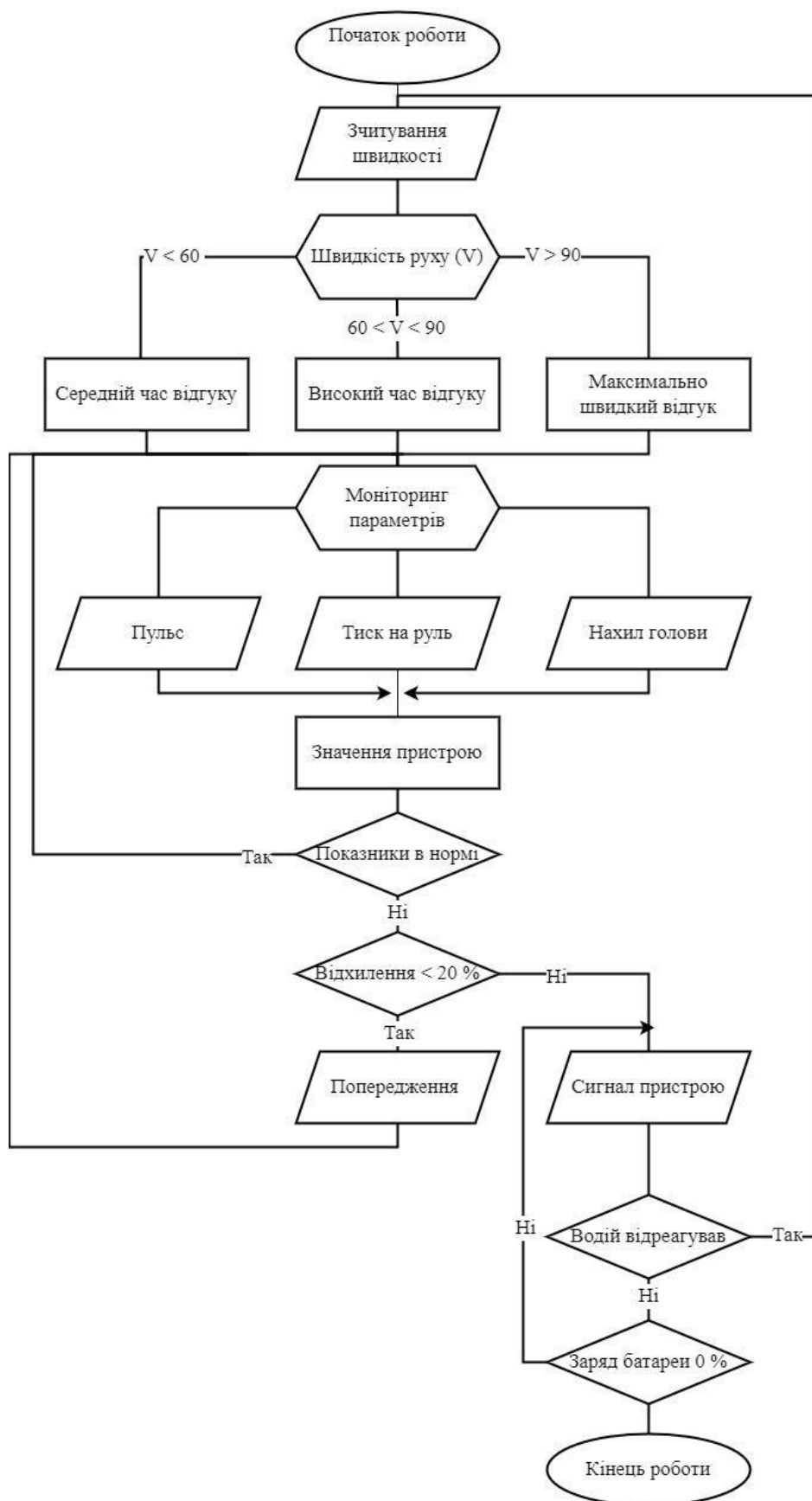


Рисунок 1.2 – Блок-схема алгоритму функціонування системи з модульною структурою виявлення ознак сонливості

Алгоритм роботи подібних систем передбачає кілька етапів: первинне зчитування даних із сенсорних модулів, порівняння отриманих значень із базовими індивідуальними або статистично обґрунтованими нормативами, визначення допустимого діапазону коливань, фіксація критичних відхилень і подальше формування відповідного попередження. Технології, доступні сьогодні на ринку, значною мірою покладаються на точність сенсорів і якість попереднього калібрування. Саме від цього залежить здатність системи виявити початкові симптоми втрати уваги, зокрема мікросон, когнітивну затримку або зниження частоти моргання.

Однак, попри заявлений функціонал, реальні експлуатаційні характеристики подібних рішень мають низку обмежень. Однією з головних проблем залишається залежність від дій самого користувача: водій повинен регулярно надягати відповідні елементи – наприклад, наручний пристрій, сенсорний браслет або нашоломну гарнітуру – для забезпечення роботи системи. Нехтування цими вимогами зводить ефективність пристрою до нуля. Крім того, низка систем погано адаптована до зовнішніх змін – таких як зміна освітлення, вібрації або нетипова поведінка водія в межах допустимої норми – що призводить до хибних спрацювань або, навпаки, ігнорування критичних змін [20].

Наявність людського фактора як джерела варіативності сигналів ускладнює розробку універсальних алгоритмів, що здатні однаково точно працювати в широкому спектрі сценаріїв. Це, своєю чергою, актуалізує необхідність створення адаптивних систем, які поєднують аналіз біометричних і кінематичних даних, використовують машинне навчання для підвищення точності та забезпечують мінімальну інвазивність під час використання. Лише за таких умов можна говорити про реальне підвищення ефективності запобігання засинанню та підтримання безпеки в умовах інтенсивного транспортного середовища.

1.6 Визначальні технічні та функціональні вимоги до системи виявлення сонливості оператора

Для ефективної реалізації системи, призначеної для виявлення ознак втрати пильності під час керування транспортним засобом, критично важливою є чітка формалізація вимог до її функціональності та апаратної складової. Такі вимоги мають враховувати як характеристики людського чинника, так і умови експлуатації технічних пристроїв у динамічному середовищі.

На рівні логіки роботи системи основоположними є параметри точності та надійності. Система повинна мати здатність з високим ступенем чутливості виявляти ключові фізіологічні ознаки, які супроводжують початкові фази засинання або когнітивного виснаження. Серед таких індикаторів – температура шкірного покриву, частота серцевих скорочень, кут нахилу голови, тиск пальців на елементи керування. Аналіз цих сигналів має виконуватись у режимі безперервного моніторингу з мінімальними затримками, що забезпечує своєчасне формування попередження у разі виявлення відхилень.

Не менш важливою є швидкодія: система повинна реагувати на критичні зміни у стані оператора миттєво, активуючи сигнальні механізми до того, як настане повна втрата уваги. При цьому взаємодія користувача з інтерфейсом повинна бути інтуїтивно зрозумілою, а процес увімкнення системи максимально автоматизованим – бажано, щоб вона активувалась одночасно з запуском двигуна без додаткових дій з боку водія. Особливої уваги потребує стійкість до змін зовнішніх умов: пристрій має функціонувати стабільно при різних температурних, вологісних та освітлювальних режимах.

Система має підтримувати повну сумісність із штатною архітектурою автомобіля, включаючи можливість підключення до CAN-шини або інтеграцію з наявними модулями безпеки. Сигнали попередження повинні

передаватися через багатоканальний інтерфейс – звуковий, візуальний або тактильний – з можливістю адаптації до індивідуальних потреб користувача.

З огляду на технічну реалізацію, до апаратної частини системи висуваються специфічні вимоги. Пристрій має бути компактним і не створювати додаткових перешкод для огляду чи ергономіки кабіни. Конструкція повинна забезпечувати надійний захист від пилу, вологи, механічних коливань і мати тривалий експлуатаційний ресурс. Ключовим є й питання енергоефективності: пристрій повинен мати низьке споживання енергії, щоб не створювати надмірного навантаження на бортову мережу автомобіля або, у разі автономної роботи, забезпечувати тривалий режим дії без підзарядки.

Крім того, передбачається підтримка оновлень програмного забезпечення, що дозволить адаптувати систему до нових алгоритмів виявлення критичних станів. Інтерфейс має бути універсальним і забезпечувати зручну взаємодію з користувачем, включаючи доступ до історії попереджень, журналів подій та базових діагностичних даних. Надійний захист даних, зокрема через використання зашифрованих протоколів обміну інформацією, є критично важливою умовою для запобігання втручанню ззовні.

У межах експлуатаційного контуру система повинна мати функціонал автоматичного самодіагностування, адаптивного калібрування під конкретного користувача та можливість масштабування для застосування в комерційному або громадському транспорті. Наявність зрозумілої технічної документації, інструкцій з обслуговування, підтримки з боку розробника, а також доступна вартість є важливими чинниками для практичного впровадження такої технології у масовому сегменті.

Таким чином, розробка системи виявлення сонливості повинна враховувати комплексний набір вимог, орієнтованих на точність, надійність, адаптивність та ергономіку, що в сукупності формує основу для створення дієвого інструменту превентивного контролю безпеки оператора.

2 ВИМОГИ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ВТРАТИ ПИЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА

2.1 Структура та адаптивність архітектури системи виявлення втрати пильності оператора

Інтелектуальна система превентивного виявлення критичних змін у стані оператора є інженерним рішенням, спрямованим на забезпечення безпеки в умовах інтенсивного інформаційного чи фізичного навантаження. Ключова характеристика такої системи – модульна структура, що дозволяє адаптувати її під конкретні завдання, тип транспортного засобу та індивідуальні особливості користувача.

Моделі такого типу не передбачають жорстко заданого складу компонентів: вони можуть містити різні сенсорні модулі, у тому числі камери для аналізу мікрорухів очей і повік, акселерометри для фіксації нахилів голови, датчики серцевого ритму, елементи оцінки тиску рук на кермі, мікропроцесори, системи енергозабезпечення, модулі звукової та візуальної сигналізації, а також інтерфейси комунікації з іншими системами [22]. Всі ці компоненти працюють у синергії для того, щоб фіксувати найменші ознаки зниження реакції або втрати когнітивної концентрації, й вчасно сповіщати оператора про критичний стан.

Такі системи особливо доцільні для операторів, які тривалий час перебувають у напруженому або монотонному режимі – наприклад, під час нічних поїздок, у дорожніх умовах із низькою змінністю ситуації або при виконанні рутинних операцій [23]. У таких умовах накопичення втоми часто відбувається непомітно, що підвищує ризик помилкових або сповільнених рішень. Система слугує своєрідним захисним інтерфейсом, який не лише виявляє зміни у стані водія, а й ініціює попереджувальні механізми з можливістю ескалації сигналів за рівнем критичності.

Адаптивна логіка дозволяє конфігурувати систему під конкретні потреби. Наприклад, у разі схильності до зорової втоми доцільною є

інтеграція відеомодуля для аналізу частоти кліпання. Якщо ж оператор характеризується схильністю до зниження тиску або частоти пульсу при перевтомі – доцільним є підключення сенсорів біометрії. У складніших сценаріях система може містити GPS-модуль із функцією передавання координат у разі критичної дезорієнтації або втрати контролю над транспортом [17].

Відкритість архітектури дозволяє поступове вдосконалення – модернізацію окремих компонентів, оновлення програмного забезпечення, інтеграцію нових алгоритмів аналізу поведінки або підключення до інших платформ управління безпекою. Водночас гнучкість у конфігурації дозволяє налаштовувати систему з урахуванням індивідуального профілю реакцій та моделей поведінки користувача, що підвищує точність розпізнавання і зменшує кількість хибних спрацьовувань.

Таким чином, система попередження аварій через виявлення втрати пильності виконує функцію персоналізованого захисного інструмента. Вона формує додатковий рівень контролю в умовах, де традиційні засоби безпеки не здатні вчасно виявити ризик, пов'язаний із психофізіологічним станом водія. Її адаптивна архітектура забезпечує масштабованість, актуальність і перспективу інтеграції у транспортні системи наступного покоління.

2.2 Вибір інфрачервоного сенсора для реалізації системи виявлення втрати пильності

Одним із ключових елементів у структурі системи, що фіксує втрату пильності водія, виступає інфрачервоний сенсор. Вибір відповідного типу сенсора визначається потребою у точному зчитуванні фізіологічних показників без інвазивного втручання, зокрема параметрів, які змінюються внаслідок зміни ритму серця або мікродинаміки поверхні шкіри. Враховуючи вимоги до стабільності роботи в умовах змінного освітлення та обмеженого простору кабіни транспортного засобу, доцільним є застосування

компактного і чутливого сенсора моделі IRM-42V, що є вдосконаленою версією традиційних фотоплетизмографічних пристроїв.

IRM-42V використовує технологію контролю оптичної щільності тканин шляхом аналізу змін відбитого інфрачервоного випромінювання, яке фіксується приймальним модулем. Ця модель дозволяє виявляти варіації серцевого ритму з високою частотою дискретизації, що є критичним для прогнозування втрати концентрації у динамічному середовищі дорожнього руху. У порівнянні з базовими модулями, пристрій має вдосконалену мікросхему PSD5000, яка забезпечує стійкість до шумів і має інтегровану термокомпенсацію. Це дозволяє зберігати точність вимірювання навіть за підвищеної вологості, вібрацій і нестабільного температурного фону.

З урахуванням практичної інтеграції в систему контролю пильності, IRM-42V демонструє достатню ефективність у порівнянні з аналогами: дальність реєстрації оптичного сигналу становить до 24 мм, робочий діапазон температур коливається в межах від -45°C до $+82^{\circ}\text{C}$, напруга живлення підтримується у межах 3,1–5,2 В, а конструктивні розміри забезпечують зручність інсталяції в інтер'єрі кабіни. Частота оновлення сигналу перебуває в діапазоні 90–130 Гц, що дозволяє оперативно відстежувати динаміку фізіологічного стану водія. Орієнтовна вартість сенсора становить 29 грн, що робить його доцільним варіантом у контексті масового застосування в системах активної безпеки транспортних засобів (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Приклад конструктивного вигляду сенсора IRM-42V

Інфрачервоні сенсори, що орієнтуються на непряме виявлення біосигналів, мають низку обмежень, зокрема залежність від правильного розміщення сенсора та індивідуальних особливостей шкіри користувача. Попри це, стабільні характеристики IRM-42V забезпечують баланс між точністю вимірювань і простотою експлуатації, що дозволяє використовувати його як базовий модуль для формування первинного каналу детекції втрати пильності.

Таблиця 2.1 – Технічні параметри сенсора IRM-42V

Характеристика	Значення
Максимальна дистанція	до 24 мм
Робочий температурний діапазон	–45 °C до +82 °C
Мікросхема	PSD5000
Робоча напруга	3,1–5,2 В
Розміри	17,5 мм × 9,5 мм × 7,2 мм
Частота зчитування	90–130 Гц
Орієнтовна вартість	29 грн

Інфрачервоний сенсор IR-MD08 являє собою мініатюрний пристрій, орієнтований на виявлення фізичних об'єктів у межах малого діапазону. Завдяки застосуванню мікросхеми A3144 він забезпечує стабільну роботу при виявленні перешкод на відстані до 280 мм, що дозволяє інтегрувати його в системи локального моніторингу навколишнього простору транспортного засобу (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – IR-сенсор перешкод IR-MD08

Застосування такого сенсора ефективно для адаптивних модулів, що забезпечують контроль простору поблизу водія. Разом із цим його придатність знижується в контексті завдань, які вимагають дистанційного виявлення перешкод. Основні параметри IR-MD08 подано у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики IR-сенсора IR-MD08

Характеристика	Значення
Діапазон виявлення	до 280 мм
Температурна стійкість	від -30 °C до +80 °C
Тип мікросхеми	A3144
Напруга живлення	3,2–5,5 В
Габарити	30 мм × 15 мм × 6 мм
Робоча частота	36 кГц
Орієнтовна вартість	15 грн

У контексті реалізації модуля передавання сигналів доцільним є застосування інфрачервоного випромінювача IR-LED QY-001. Він представляє собою економічний варіант, зручний для використання у простих і стабільних каналах передачі команд на малій відстані (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Плата IR-передавача IR-LED QY-001

Попри базовий функціонал, його конфігурація відповідає вимогам автономного підключення до вузлів передачі даних у межах кількох метрів. Характеристики компонента наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики інфрачервоного випромінювача IR-LED QY-001

Характеристика	Значення
Ефективна відстань передачі	до 2,1 м
Допустимий температурний режим	від -20 °С до +80 °С
Мікросхема	SFH4511
Напруга живлення	5 В
Габарити плати	22 мм × 20 мм
Частота модуляції	38 кГц
Орієнтовна вартість	21 грн

Для побудови приймального каналу інфрачервоного зв'язку застосовується мініатюрний приймач типу IR-IRV-02, який забезпечує стабільне декодування сигналів інфрачервоного випромінювання у ближній зоні (рис. 2.5).

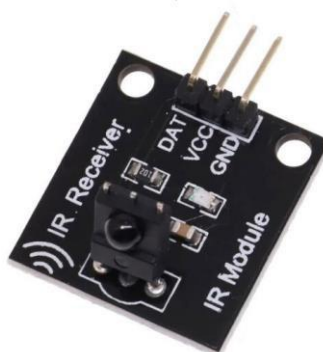


Рисунок 2.5 – Плата IR-приймача IR-IRV-02

За рахунок застосування чутливого фототранзистора із вбудованим фільтром шумів даний елемент успішно справляється з прийомом сигналів пультів, сенсорних команд або індикаційних протоколів. Основні характеристики IR-IRV-02 подано у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні характеристики IR-приймача IR-IRV-02

Характеристика	Значення
Максимальна дистанція прийому	до 2 м
Робочий температурний діапазон	від -25 °С до +85 °С

Таблиця 2.4 (Продовження)

Інтегрована мікросхема	GP1UX511QS
Робоча напруга	5 В
Габаритні розміри	24 мм × 22 мм
Частотний канал	38 кГц
Орієнтовна вартість	19 грн

Порівняльний аналіз низки інфрачервоних сенсорів, включаючи датчики IR-MX039, IR-Prox R301, приймач IR-IRV-02 та випромінювач IR-LED QY-001, свідчить про диференційовані технічні параметри кожного компонента, які зумовлюють доцільність їх використання в різних функціональних модулях. Наприклад, IR-MX039 вирізняється зручністю інтеграції в біометричні системи завдяки стабільному зчитуванню змін інфрачервоного відбиття, обумовленого серцевими імпульсами, що дозволяє використовувати його в системах базового контролю фізіологічного стану [21]. Водночас, приймач IR-IRV-02 демонструє підвищену чутливість та широкий просторовий діапазон прийому, що забезпечує надійність обробки команд інфрачервоного зв'язку в умовах фонових перешкод.

Найбільш універсальним серед наведених компонентів у контексті виявлення небезпечної зміни ситуацій у середовищі виявився сенсор перешкод IR-Prox R301. Його апаратна конфігурація, зокрема використання мікросхеми A3144, забезпечує точну детекцію об'єктів у межах коротких дистанцій із мінімальним енергоспоживанням та високою стійкістю до температурних коливань. Таке поєднання характеристик робить цей сенсор оптимальним вибором для інтеграції в автоматизовані модулі, орієнтовані на динамічну оцінку оточення. У загальному підсумку, при розгляді альтернатив для створення надійної системи, орієнтованої на виявлення втрати пильності або різких змін зовнішніх умов, саме IR-Prox R301 доцільно розглядати як базовий елемент завдяки поєднанню стабільності, точності та адаптивності.

2.3 Вибір п'єзоелектричного випромінювача

П'єзоелектричні звукові випромінювачі, до яких належать і зумери, ґрунтуються на здатності певних матеріалів – зокрема сегнетоелектричних керамік або кварцових кристалів – реагувати на електричні поля виникненням механічної деформації. Ця деформація перетворюється на коливальний рух, що, у свою чергу, генерує акустичну хвилю [18]. Такі пристрої знаходять застосування в індикаторних та сигнальних системах різного призначення, де необхідно оперативно повідомити користувача про зміну стану чи появу критичних подій. Зумери є логічним елементом архітектури систем, що реагують на зниження концентрації оператора, зокрема в умовах тривалого керування транспортним засобом.

З огляду на конструктивні особливості, зумери поділяються на активні та пасивні. Активні модулі обладнані власним генератором частоти і здатні самостійно випромінювати звук при подачі напруги живлення, без потреби в зовнішньому керуванні (рис. 2.6). Натомість пасивні зумери позбавлені генератора, тому потребують зовнішнього сигналу відповідної частоти для збудження акустичних коливань (рис. 2.7). Вибір між ними залежить від вимог системи: активні краще підходять для простих рішень із фіксованими характеристиками сигналу, тоді як пасивні забезпечують більшу гнучкість, дозволяючи змінювати частоту та динаміку звучання.

Окрім них, існують і альтернативні варіанти – наприклад, електромагнітні або мембранні пристрої, що застосовують інші принципи акустичної генерації. Однак для систем, де пріоритетом є компактність, мінімальне енергоспоживання та достатній рівень гучності, п'єзоелектричні рішення залишаються оптимальними.



Рисунок 2.6 – Активний зумер

Пристрій із вбудованим генератором, як показано на рисунку 2.6, є зручним варіантом для вбудованих рішень з фіксованою частотою сигналу. Його основні параметри наведені в таблиці 2.5. Як свідчать технічні дані, зумер функціонує при постійній напрузі 5 В і споживає струм близько 32 мА. Частота генерованого сигналу становить 2250 Гц, що забезпечує звуковий тиск 83 дБ на відстані 10 см. Фізичні розміри компактні – 13×7 мм, а температурний діапазон роботи – від –15 до +65 °С. Виготовляється з термостійкого полімеру. Його маса не перевищує 1,8 г. Орієнтовна вартість – 17 грн.

Таблиця 2.5 – Основні характеристики активного зумера

Характеристика	Значення
Робоча напруга	5 V
Робочий струм	32 mA
Частота звучання	2250 Hz
Рівень звукового тиску	83 dB на відстані 10 см
Розміри	13 мм × 7 мм
Робоча температура	від –15 °С до +65 °С
Вага	1,8 грама
Тип сигналу	Постійний
Монтаж	Вивідний
Матеріал корпусу	Полімер
Вартість	17 грн

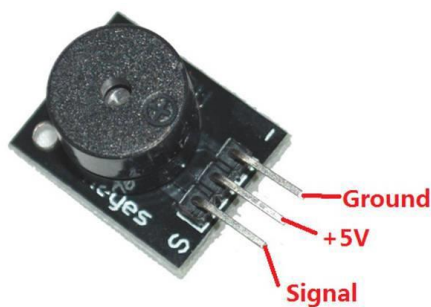


Рисунок 2.7 –Пасивний зумер

На відміну від попереднього прикладу, пасивний варіант потребує підключення до генератора, який задає частоту коливань. Це дозволяє адаптувати характер сигналу відповідно до потреб користувача чи системи в цілому. Його параметри наведено в таблиці 2.6. Пристрій підтримує роботу у широкому діапазоні напруг – від 3,2 до 22 В, при цьому споживаний струм становить близько 19 мА. Частота звучання задається зовнішнім генератором, рівень гучності дорівнює 87 дБ на 10 см. Розміри – 11×9 мм, температурний інтервал роботи – від –25 до +70 °С. Маса складає приблизно 2,2 г. Корпус також виконаний із полімеру. Вартість орієнтовно – 43 грн.

Таблиця 2.6 – Основні характеристики модульного пасивного зумера

Характеристика	Значення
Робоча напруга	3,2–22 V
Робочий струм	19 mA
Частота звучання	Визначається генератором
Рівень звукового тиску	87 dB на відстані 10 см
Розміри	11 мм × 9 мм
Робоча температура	від –25 °С до +70 °С
Вага	2,2 грама
Тип сигналу	Змінний
Монтаж	Вивідний
Матеріал корпусу	Полімер
Вартість	43 грн

Принцип функціонування активного п'єзоелектричного зумера базується на наявності в його конструкції автономного генератора, який формує періодичні імпульси напруги. Після подачі живлення ці імпульси

передаються безпосередньо на п'єзоелемент, змушуючи його циклічно деформуватися, що в результаті створює механічні коливання мембрани. Випромінювання акустичних хвиль, що виникає, не вимагає додаткових джерел збудження, тому подібні пристрої відзначаються простотою інтеграції у готові рішення та стабільністю звукового сигналу при фіксованих умовах живлення.

Натомість пасивні зумери функціонують за аналогічним принципом деформації п'єзоматеріалу, однак не мають вбудованих засобів генерації. Для їхньої активації необхідно використовувати зовнішнє джерело змінного електричного сигналу, яке формує керуючі імпульси певної форми та частоти. Під дією цих імпульсів п'єзоелектричний матеріал змінює свою конфігурацію, передаючи вібрацію на мембрану, яка, у свою чергу, генерує акустичні хвилі. Такий підхід забезпечує вищу гнучкість у керуванні параметрами звуку, проте вимагає додаткового схемного ускладнення.

Застосування в системах контролю зниження концентрації водія, зокрема у випадках ризику втрати пильності під час руху, обґрунтовує вибір того чи іншого типу зумера залежно від пріоритетів: швидкість реакції або функціональна варіативність. Активні пристрої, як зазначено у [21], завдяки автоматичному запуску акустичного сигналу після виявлення загрозливого стану, можуть забезпечити негайне інформування водія, мінімізуючи часовий інтервал між виявленням ознак втоми та поданням звукового попередження. Це підвищує ймовірність уникнення аварійних ситуацій. Пасивні модулі, хоч і потребують зовнішньої генерації сигналу, можуть бути використані в багатокомпонентних системах, де обробка даних та формування оповіщення виконуються централізовано.

З огляду на потребу забезпечення максимальної швидкості подачі сигналу при мінімізації схемотехнічних затримок, активні п'єзоелектричні зумери виявляються більш доцільними у контексті побудови систем превентивного оповіщення про критичне зниження реакції водія [4]. Їх здатність до автономного функціонування дозволяє уникнути зайвих

затримок у ланцюгу прийняття рішення, що суттєво зменшує ймовірність дорожньо-транспортних пригод.

2.4 Вибір вібраційного мотора

Вібраційні мотори є електромеханічними компонентами, призначеними для створення механічних коливань, що сприймаються тактильно. Такі пристрої знаходять широке застосування у сфері персональної електроніки, автоматизованих систем зворотного зв'язку, а також у функціональних модулях, що потребують ненав'язливого повідомлення користувача про зміну стану або появу зовнішніх подій [17]. У контексті використання з мікроконтролерами, такими як Arduino, ці мотори інтегруються в системи через цифрові порти, допускаючи програмне керування рівнем та частотою вібрації.

Вібромотори класифікуються за конструктивними особливостями. Роторні моделі базуються на принципі обертання валу з асиметрично розташованим навантаженням, яке, під час обертання, генерує імпульсну силу, що спричиняє вібрацію. Плоскі ж варіанти використовують ексцентрикову схему, де обертальний рух перетворюється на вібрацію за рахунок дисбалансу у формі плоскої маси, що обертається.

Arduino-платформи забезпечують можливість реалізації багатоваріантного керування вібраційними двигунами. Це можливо як через просте вмикання/вимикання живлення, так і з використанням драйверів, які дозволяють змінювати характер вібрації. Застосування таких рішень охоплює пристрої тактильного сповіщення, ігрові контролери, смарт-гаджети, де вібраційний відгук підвищує якість взаємодії користувача з електронною системою.



Рисунок 2.7 – Роторний вібромотор

Роторний тип вібромотора є популярним рішенням у портативних пристроях, що потребують чітко відчутного вібраційного імпульсу. Його конструкція забезпечує надійну роботу при відносно невеликому енергоспоживанні. Основні технічні параметри наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні характеристики роторного вібромотора

Характеристика	Значення
Робоча напруга	2.7–5.2 V
Робочий струм	70–90 mA
Частота обертів	11'500 об/хв
Сила вібрації	1.1–1.8 g
Розміри	9.8 мм × 3.2 мм
Робоча температура	від –15 °C до +55 °C
Вага	1.3 грама
Тип вібрації	Центрифужна
Монтаж	Вивідний/поверхневий
Матеріал корпусу	Металізований пластик
Вартість	58 грн



Рисунок 2.8 – Плаский вібромотор

Пласкі вібромотори, завдяки своїй конструктивній мініатюризації, дозволяють інтегрувати вібраційні функції у вузькі чи обмежені просторові

області корпусу пристрою. Вони актуальні у носимих гаджетах, розумних браслетах або інших пристроях, де габарити мають критичне значення. Їх технічні характеристики представлено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні характеристики плаского вібромотора

Характеристика	Значення
Робоча напруга	3.2–5 V
Робочий струм	75–95 mA
Частота обертів	9'500–11'800 об/хв
Сила вібрації	0.7–1.4 g
Розміри	10.2 мм × 2.5 мм
Робоча температура	від –20 °C до +60 °C
Вага	1.4 грама
Тип вібрації	Плоска ексцентрикова
Монтаж	Поверхневий/вивідний
Матеріал корпусу	Пластик із металевим оздобленням
Вартість	138 грн

У результаті аналізу технічних характеристик різних типів вібромоторів, було обґрунтовано доцільність вибору плаского вібромотора, зважаючи на його конструктивну перевагу – низькопрофільну форму, що дозволяє ефективно інтегрувати його в обмежений простір електронних систем [21]. Такий формат конструкції є критично важливим у пристроях, де кожен міліметр корпусу має значення, наприклад, у компактних модулів оповіщення в транспортних засобах. Окрім цього, пласкі вібромотори демонструють помірний рівень енергоспоживання, що забезпечує більшу автономність при роботі від живлення обмеженої ємності. Їхня адаптивність до вивідного чи поверхневого монтажу розширює можливості для гнучкої компоновки елементів плати. Вибір такого пристрою сприятиме підвищенню загальної функціональності та ергономічності системи реагування на зниження пильності оператора, водночас забезпечуючи стабільність тактильного зворотного зв'язку без надмірного ускладнення конструкції.

2.5 Вибір мікроконтролера з сімейства Arduino

Для реалізації системи, орієнтованої на виявлення втрати пильності водія як потенційного чинника аварійності, доцільно використовувати мікроконтролер на платформі Arduino, який поєднує гнучкість апаратної архітектури з простотою програмної реалізації [11]. Цей клас пристроїв базується на мікропроцесорах AVR або ARM, а також підтримує програмування мовою C/C++ у середовищі з відкритим вихідним кодом. Програмована логіка, зчитування даних із сенсорів та генерація відповідних реакцій у режимі реального часу здійснюється за допомогою стандартного набору цифрових і аналогових портів GPIO [14].

Завдяки широкій функціональності, Arduino ефективно використовується в прикладних проєктах різної складності – від навчальних макетів до промислових IoT-рішень [8]. В контексті створення системи виявлення ознак втрати реакції водія ключовими вимогами до вибору мікроконтролера є енергетична автономність, сумісність із високочутливими сенсорами, обчислювальна спроможність, інтерфейсна зручність і довготривала надійність.

Низьке енергоспоживання дозволяє зменшити частоту підзарядок і забезпечити роботу системи у фоновому режимі протягом тривалого періоду. Підтримка сенсорів із високою роздільністю та швидкою реакцією критична для аналізу фізіологічних параметрів (наприклад, ритму серця або мікрорухів голови). Обробка сигналів повинна відбуватись із мінімальною затримкою, оскільки в ситуації втрати пильності навіть незначна затримка реакції системи може мати критичні наслідки.

Крім того, важливою є простота програмування та гнучка інтеграція з іншими компонентами, оскільки система повинна бути легко масштабованою та адаптованою до змін у конфігурації. Надійність обраного мікроконтролера є визначальною, оскільки збої в роботі попереджувального механізму можуть звести нанівець всю концепцію підвищення безпеки. Усе це свідчить про

доцільність вибору Arduino як апаратної основи для реалізації даної інтелектуальної системи моніторингу стану водія.

У процесі проектування системи, здатної виявляти втрату пильності водія як потенційну передумову до аварійних ситуацій, критично важливим є правильний вибір мікроконтролера. Розглянемо три альтернативи з родини Arduino, кожна з яких має технічні та конструктивні характеристики, що дозволяють інтегрувати її в подібні інженерні рішення.

Платформа Arduino UNO (рис. 2.9), яка побудована на мікросхемі ATmega328P, є найбільш відомим представником серії. Вона забезпечує достатню продуктивність для проєктів середньої складності, надаючи користувачеві велику кількість цифрових і аналогових портів вводу-виводу. Крім того, наявність USB-інтерфейсу спрощує завантаження програмного забезпечення. UNO відзначається високою сумісністю з широким спектром сенсорів і модулів, що робить її придатною для реалізації систем моніторингу фізіологічного стану водія, які потребують обробки сигналів у реальному часі.

Компактніший варіант – Arduino Nano – забезпечує ту саму функціональність, що й UNO, але в набагато меншому форм-факторі. Це дозволяє ефективно інтегрувати його в пристрої з обмеженим простором або масовими обмеженнями. Завдяки низькому енергоспоживанню та компактності, Nano є зручним вибором для вбудованих систем, які реалізують вібраційний або звуковий зворотний зв'язок у кабіні автомобіля.

Ще більш мініатюрним є Arduino Pro Mini, який має аналогічні апаратні характеристики до UNO, однак не містить USB-порту. Це знижує його енергоспоживання, робить конструкцію компактнішою, проте потребує зовнішнього USB-to-Serial адаптера для програмування. Такий варіант доцільно використовувати в умовах, коли система має бути розміщена непомітно та енергоефективно працювати протягом тривалого часу без втручання.

Характеристики базової моделі Arduino UNO наведено в табл. 2.9. Цей мікроконтролер працює при напрузі 5 В і має у своєму розпорядженні 32 кбайт флеш-пам'яті для збереження програми. Оперативна пам'ять SRAM становить 2 кбайт, а енергонезалежна пам'ять EEPROM – 1 кбайт. Тактова частота контролера дорівнює 16 МГц, що забезпечує необхідну швидкість обробки сигналів від датчиків. Пристрій має 14 цифрових входів/виходів, з яких 6 підтримують ШІМ, і 6 аналогових входів. Серед доступних інтерфейсів передбачені USB, UART, I2C, SPI, PWM і ADC. При стандартному живленні в 5 В споживаний струм складає близько 50 мА. Вартість такої плати становить приблизно 300 грн, що робить її економічно доцільною для реалізації безпечних інтелектуальних систем.



Рисунок 2.9 – Плата Arduino UNO

Таблиця 2.9 – Характеристики Arduino UNO

Характеристика	Опис
Мікроконтролер	ATmega328P
Частота	16 МГц
Робоча напруга	5 В
Виводи GPIO	14 цифрових виводів, 6 аналогових виводів
Вбудована пам'ять (Flash)	32 кбайт
EEPROM	1 кбайт
SRAM	2 кбайт
Інтерфейси	USB, UART, I2C, SPI, PWM, ADC

Таблиця 2.9 (Продовження)

Сумісність	З великою кількістю додаткових модулів та датчиків, легко знайдете підтримку в мережі
Розмір	68,6 мм × 53,4 мм
Споживана потужність	50 мА при 5 В
Вартість	300 грн

Arduino UNO зарекомендував себе як один із найстабільніших мікроконтролерів у численних прикладних розробках, зокрема в сфері систем безпеки руху, завдяки збалансованому поєднанню технічних параметрів, широкого функціоналу та зручних габаритів. Проте, при створенні компактної архітектури пристрою для виявлення втрати пильності оператора варто розглянути більш мініатюрні рішення, як-от Arduino Nano (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Плата Arduino Nano

На відміну від UNO, Nano суттєво переважає в аспекті габаритів, не втрачаючи при цьому основних характеристик. Його форм-фактор дозволяє інтегрувати мікроконтролер у тісні монтажні простори без необхідності жертвувати можливостями введення/виведення. Параметри цієї плати наведено нижче (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Характеристики Arduino Nano

Характеристика	Опис
Мікроконтролер	ATmega328P
Частота	16 МГц
Робоча напруга	5 В

Таблиця 2.10 (Продовження)

Виводи GPIO	14 цифрових виводів, 8 аналогових виводів
Вбудована пам'ять (Flash)	32 кбайт
EEPROM	1 кбайт
SRAM	2 кбайт
Інтерфейси	USB, UART, I2C, SPI, PWM, ADC
Розмір	45 мм × 18 мм
Сумісність	З великою кількістю додаткових модулів та датчиків, легко знайти підтримку в мережі
Споживана потужність	19 мА при 5 В
Вартість	220 грн

Arduino Nano є універсальним рішенням для побудови компактних інтерактивних систем. Його оптимізований розмір у поєднанні з підтримкою більшості типових інтерфейсів, таких як UART, SPI чи I2C, забезпечує можливість створення високоефективних конструкцій для реєстрації та обробки сенсорних сигналів. У контексті систем, що контролюють стан уважності оператора, Nano дозволяє реалізувати багаторівневу обробку даних та забезпечити адекватну реакцію на виявлені прояви втрати концентрації без зайвого навантаження на простір чи енергоспоживання [14, 16].

Під час аналізу альтернативних рішень доцільно звернути увагу на варіант Arduino Pro Mini, представлений на рисунку 2.11. Його мініатюрна конструкція робить цей мікроконтролер функціональним аналогом Arduino Nano з незначними конструктивними відмінностями. Завдяки зменшеному профілю, плата ефективно використовується в системах, де критично обмежено простір для монтажу.



Рисунок 2.11 – Плата Arduino Pro Mini

На відміну від більшості інших представників серії Arduino, Pro Mini не має вбудованого USB-інтерфейсу, що передбачає потребу у зовнішньому програматорі для ініціалізації прошивки. Це дещо ускладнює початкову взаємодію, проте значно знижує енергоспоживання, що стає перевагою для вбудованих проєктів з автономним живленням. Узагальнені технічні характеристики представлено у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Характеристики Arduino Pro Mini

Характеристика	Опис
Мікроконтролер	ATmega328P або ATmega168 (залежно від модифікації)
Робоча напруга	3,3 В або 5 В
Частота	8 МГц або 16 МГц
Вбудована пам'ять (Flash)	32 кбайт
EEPROM	1 кбайт
SRAM	2 кбайт
Виводи GPIO	14 цифрових виводів, 8 аналогових виводів
Інтерфейси	UART, I2C, SPI, PWM, ADC
Споживаний струм	5–20 мА
Розмір	від 18 мм × 33 мм
Сумісність	Підтримує численні датчики і модулі, активна спільнота розробників
Вартість	250 грн

У процесі порівняльного аналізу платформ Arduino UNO, Arduino Pro Mini та Arduino Nano було встановлено, що всі три варіанти побудовані на базі одного й того ж мікроконтролера – ATmega328P. Незважаючи на це,

функціональні відмінності між ними охоплюють низку ключових параметрів, серед яких: форм-фактор, спосіб живлення, інтерфейси для програмування, а також гнучкість інтеграції в мініатюризовані електронні рішення. Узагальнена характеристика технічних параметрів представлена у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Порівняльна характеристика мікроконтролерів

Характеристика	Arduino Nano	Arduino UNO	Arduino Pro Mini
Розміри	45 мм × 18 мм	68,6 мм × 53,4 мм	18 мм × 33 мм
Тактова частота	16 МГц	16 МГц	8 МГц (при 3,3 В) / 16 МГц (при 5 В)
Вхідна напруга (рекомендована)	7–12 В	7–12 В	3,3–12 В
Робоча напруга	5 В	5 В	3,3 В або 5 В
Flash-пам'ять	32 кбайт	32 кбайт	32 кбайт
SRAM	2 кбайт	2 кбайт	2 кбайт
EEPROM	1 кбайт	1 кбайт	1 кбайт
Кількість цифрових I/O	14 (з них 6 PWM)	14 (з них 6 PWM)	14 (з них 6 PWM)
Кількість аналогових входів	8	6	8
Інтерфейси програмування	Mini USB	USB Type-B	FTDI або USB-to-Serial
Конектор живлення	Mini USB або гніздо	Гніздо живлення	Відсутній
Вартість	220 грн	300 грн	250 грн

Проаналізувавши наведені технічні особливості, можна зробити обґрунтований висновок, що Arduino Nano найкраще відповідає вимогам системи виявлення стану сонливості водія [16]. Вона поєднує достатню функціональність із мініатюрністю, що дозволяє використовувати її у конфігураціях, де просторові обмеження є критичними. Завдяки підтримці основних комунікаційних протоколів (UART, SPI, I2C) та наявності достатньої кількості аналогових і цифрових входів/виходів, Arduino Nano забезпечує надійну інтеграцію з біометричними, акустичними та оптичними сенсорами. Такий вибір сприятиме створенню стабільної та чутливої

системи, здатної у реальному часі реагувати на ознаки зниження реакції водія.

3 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Розгортання апаратної частини системи

У межах даної бакалаврської кваліфікаційної роботи визначено завдання побудови автоматизованої системи, покликаної фіксувати ознаки втрати пильності оператором під час потенційно критичних ситуацій, зокрема у контексті керування транспортними засобами. Попередній аналіз існуючих рішень, впроваджених у продуктах провідних автомобільних виробників, таких як Volvo, General Motors і Toyota, свідчить про наукову і практичну релевантність обраного напрямку [12]. Водночас масове впровадження подібних технологій гальмується високою вартістю систем, що пропонуються на ринку. Саме тому в межах цього дослідження було поставлено за мету створити економічно досяжну систему, що базується на відкритих технологіях і може бути адаптована для широкого споживача без спеціальної підготовки.

На підставі техніко-аналітичного огляду, проведеного у попередньому розділі, до складу апаратного комплексу системи моніторингу реакції оператора включено обрані компоненти, які забезпечують належний рівень чутливості та функціональності за помірної вартості. Центральним елементом виступає мікроконтролер Arduino Nano, обраний завдяки своїй компактності та енергоефективності. Для реалізації аудіовізуального зворотного зв'язку застосовано активний зумер на 5 Вольт та вібромотор з аналогічною напругою живлення. Детекція фізіологічного сигналу здійснюється за допомогою інфрачервоного сенсора перешкод типу HW-201, що характеризується стабільною чутливістю при незначному споживанні енергії.

Структурна організація функціонування апаратної частини системи представлена на рисунку 3.1, де відображено принцип взаємодії ключових

компонентів у межах схеми виявлення та оповіщення про потенційну втрату реакції з боку оператора.

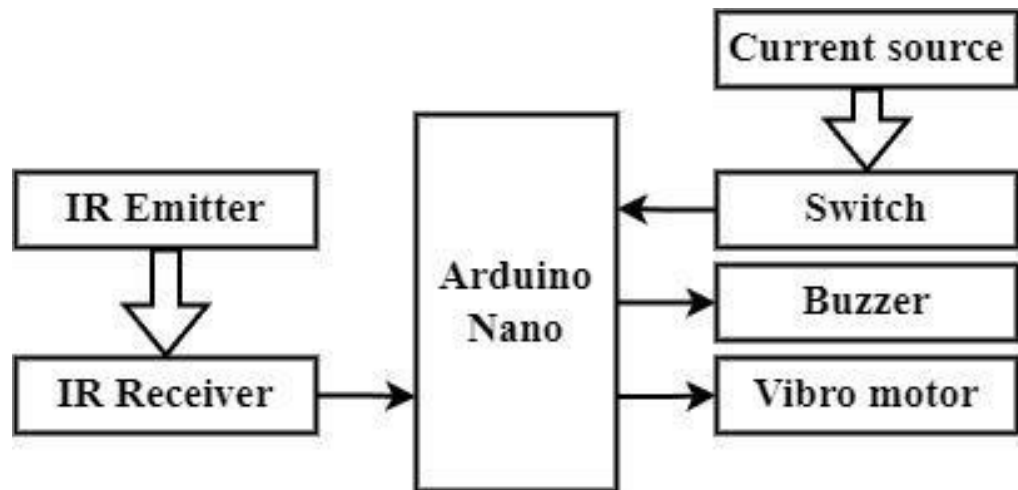


Рисунок 3.1 – Функціональна схема принципу роботи системи протидії втраті пильності оператором під час виконання критичних завдань

Загальна архітектура системи передбачає централізоване керування всіма її складовими за допомогою мікроконтролера Arduino Nano, який виконує функцію головного логічного елемента. Саме цей компонент відповідає за обробку вхідних даних з інфрачервоного сенсора, прийняття рішень у режимі реального часу та ініціацію зворотного зв'язку через звукові й тактильні індикатори. Система працює циклічно й автономно, з мінімальною потребою в ручному втручанні.

Запуск відбувається після подачі живлення, що ініціює активний стан усіх підсистем. Увімкнення може здійснюватися за допомогою звичайного перемикача або фіксованої кнопки, а джерелом енергії можуть виступати елементи живлення типу акумуляторів або батарея формату 6F22. З моменту активації система постійно моніторить просторові зміни за допомогою оптичного сенсора HW-201, вбудованого у вузол виявлення фізіологічної індикації втрати пильності. Принцип дії сенсора базується на випромінюванні інфрачервоного сигналу та фіксації його відбиття з поверхні об'єкта, зокрема з області навколо очей оператора. Якщо протягом певного заданого інтервалу часу (за замовчуванням – 2 секунди, але цей параметр

може бути змінений користувачем) не зафіксовано типового відбиття, це розцінюється як сигнал про втрату уваги або закриті очі.

Після підтвердження ознак зниження реакції відповідний імпульс передається на обробку до мікроконтролера. Надалі Arduino Nano активує виконавчі елементи – зумер та вібромотор. Звуковий сигнал формується за допомогою компактного, але гучного п'єзокомпонента, розміщеного у безпосередній близькості до користувача. Водночас вмикається вібромотор, що генерує відчутну вібрацію з частотою обертання близько 12 000 об/хв, надаючи оператору додатковий тактильний стимул для пробудження та відновлення контролю над ситуацією. Завдяки такій багатоканальній структурі оповіщення, система забезпечує високу ймовірність своєчасного реагування на ситуації, що можуть призвести до критичних наслідків.

Функціонування системи, спрямованої на виявлення втрати пильності з боку оператора, ґрунтується на принципі виявлення об'єкта, що перешкоджає відбиттю інфрачервоного сигналу упродовж контрольованого інтервалу часу. У реалізованій конфігурації цей інтервал становить дві секунди, що обумовлюється потребою диференціювати між звичайним кліпанням і більш тривалою відсутністю реакції, притаманною стану втрати контролю. Якщо перешкода фіксується впродовж заданого часу, відповідний сигнал надходить на мікроконтролер, який ініціює активацію елементів сповіщення. Система залишається активною доти, доки не буде зафіксовано відкриття очей або не буде вичерпано енергетичний ресурс живлення. Візуальне відображення схеми підключення представлено нижче.

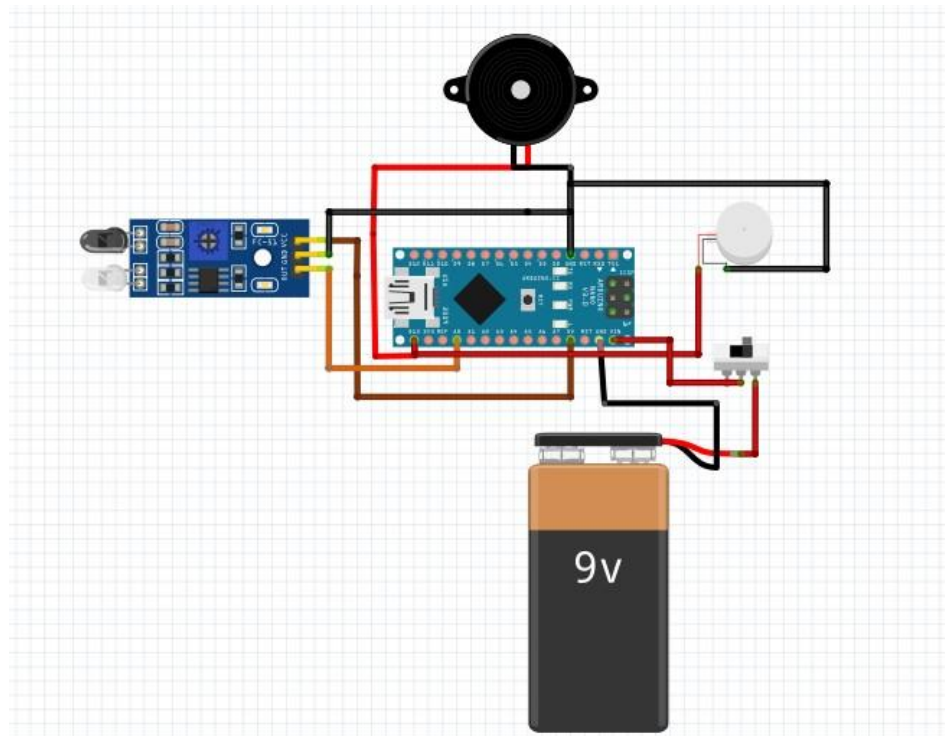


Рисунок 3.2 – Схема підключення пристрою

Після узгодження електричної схеми пристрою було здійснено пошук оптимального середовища для розміщення його елементної бази. Проведений аналіз [19] дозволив виявити, що звичайні захисні окуляри з прозорими лінзами та посиленою пластиковою оправою є доцільною конструктивною основою. Така конструкція забезпечує необхідну ергономіку, дозволяючи зручно інтегрувати компоненти. У результаті були визначені параметри довжини провідників для розміщення на дужках оправы, що забезпечує стабільність та комфорт при носінні.

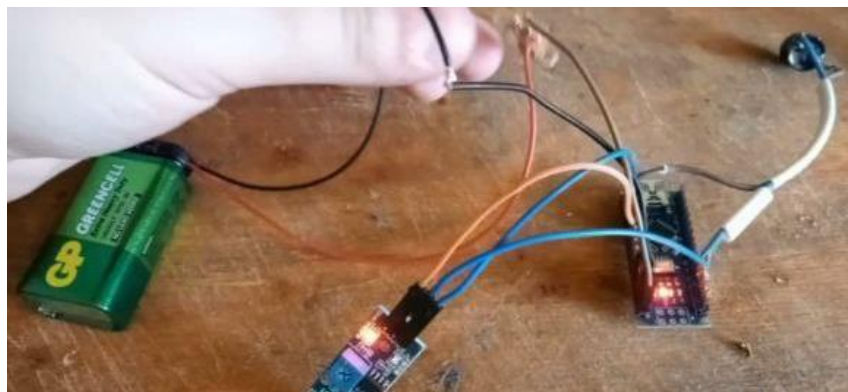


Рисунок 3.3 – Початковий вид конструкції

З метою підвищення ефективності використання пристрою було здійснено доопрацювання модуля інфрачервоного сенсора. Зокрема, елементи випромінювання (IR-LED) та прийому (IR-Receiver) було від'єднано від загальної друкованої плати і змонтовано на окремих гнучких провідниках. Це дало змогу розташувати їх на оправі таким чином, щоб не обмежувати поле зору користувача. Водночас електричні контакти було з'єднано з базовою платою сенсора, що зберегло цілісність схеми. Такий підхід дозволив створити конструкцію, яка відповідає вимогам інженерної адаптивності до умов використання в обмеженому просторі.



Рисунок 3.4 – Покращення IR-сенсора

Фінальний вигляд пристрою, зібраного з урахуванням усіх конструктивних та функціональних вимог, наведено на наступному рисунку.



Рисунок 3.5 – Кінцевий результат

Для підтвердження доцільності застосування розробленого пристрою в умовах обмеженого бюджету було проведено економічне обґрунтування

проекту. Кошторисна вартість системи представлена в таблиці 3.1, яка демонструє загальну доступність її складових елементів на ринку.

Таблиця 3.1 – Кошторис обладнання для системи виявлення втрати пильності оператора

Назва компонента	Од. вим.	К- сть	Ціна за од., грн	Загальна вартість, грн
IR-сенсор HW-201	шт.	1	48,00	48,00
Вібромотор	шт.	1	135,00	135,00
Плата Arduino Nano	шт.	1	210,00	210,00
Живлення типу «Крона»	шт.	1	35,00	35,00
Гніздо під батарейку	шт.	1	27,00	27,00
Провідники для монтажу	набір	1	38,00	38,00
Кнопка для вмикання	шт.	1	9,00	9,00
Звуковий сигналізатор	шт.	1	13,00	13,00
Окуляри з пластиковою оправою	шт.	1	75,00	75,00
Загальна вартість				590,00 грн

Вибрані окуляри були оптимізовані за критерієм зручності встановлення, однак конструкція системи не залежить критично від конкретної моделі оправ. Універсальність рішення дозволяє адаптувати конструкцію до інших типів носимих аксесуарів. До зазначеної вартості не входить інструментальне забезпечення (паяльник, припій, флюс, термозбіжна ізоляція), що зазвичай наявне в лабораторних умовах або побутовому використанні.

3.2 Мова програмування в сімействі Arduino

Мова програмування, яка використовується в середовищі Arduino IDE, являє собою спрощену реалізацію стандарту C/C++ з вбудованими можливостями для прямої роботи з апаратними ресурсами мікроконтролерів, що лежать в основі плати Arduino [14]. Її ключовою особливістю є наявність високорівневих абстракцій для взаємодії з сенсорами, виконавчими пристроями, інтерфейсами зв'язку та іншими периферійними модулями без необхідності низькорівневого програмування регістрів.

Типовий алгоритм, реалізований на платформі Arduino, структурований у дві обов'язкові частини – процедури ``setup()`` та ``loop()``. Функція ``setup()`` ініціалізується один раз при запуску або перезавантаженні пристрою і виконує всі конфігураційні налаштування, зокрема визначення напрямку вводу-виводу портів, запуск бібліотек, ініціалізацію глобальних змінних і встановлення стартових значень [11]. Функція ``loop()`` реалізує основний цикл обробки, який виконується безперервно, поки контролер перебуває під живленням. У цьому циклі реалізується логіка аналізу сигналів, прийняття рішень і активація виконавчих елементів – саме тут відбувається обробка даних з IR-сенсора та ініціалізація сповіщень у системі моніторингу реакції оператора.

Середовище Arduino IDE також забезпечує користувача широким набором бібліотек, які полегшують взаємодію з зовнішніми пристроями. Наприклад, підключення датчиків виявлення перешкод або генерація сигналів для вібромотора й зумера виконується за допомогою вже готових бібліотечних функцій. Це дозволяє зосередитися на функціональному проєктуванні без необхідності створювати низькорівневі драйвери для кожного пристрою окремо.

Серед основних переваг такої мови – її низький поріг входу, що забезпечує доступність навіть для студентів без попереднього досвіду у вбудованому програмуванні. Водночас вона зберігає гнучкість і можливість реалізації складних алгоритмів, зокрема використання таймерів, інтерфейсів I2C/SPI, а також створення адаптивних систем у відповідь на зміну середовища.

У контексті розробки автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію, використання програмної моделі Arduino є виправданим з огляду на її функціональну достатність, доступність ресурсу розробки та сумісність із обраним апаратним забезпеченням.

3.3 Інструмент Arduino Integrated Development Environment

Arduino Integrated Development Environment (IDE) виступає як головне середовище розробки програмного забезпечення для апаратних проєктів на базі платформи Arduino. Його універсальність проявляється у кросплатформенності, що забезпечує повну сумісність із провідними операційними системами, включаючи Windows, macOS і Linux [11]. Завдяки цьому розробники мають змогу працювати над своїми проєктами незалежно від використовуваного середовища, що значно підвищує мобільність і гнучкість при створенні систем на основі мікроконтролерів.

Середовище Arduino IDE поєднує в собі інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс та потужні функціональні можливості. Воно забезпечує підсвічування синтаксису, підтримку автодоповнення операторів і функцій, а також механізми перевірки коду на наявність помилок ще до етапу компіляції. Завдяки цьому навіть користувачі з базовими навичками програмування можуть швидко орієнтуватися у структурі проєкту, виявляти логічні похибки та оптимізувати алгоритми.

Особливу роль у зручності користування Arduino IDE відіграє інтегрована система керування бібліотеками, що дозволяє оперативно підключати необхідні бібліотеки, зокрема для роботи з периферійними пристроями: сенсорами, дисплеями, звуковими модулями, бездротовими інтерфейсами. Крім того, середовище містить вбудовану колекцію прикладів коду, які демонструють базові та розширені функції мікроконтролера, полегшуючи засвоєння матеріалу користувачами.

З точки зору навчання та дослідницької діяльності, Arduino IDE є ефективним інструментом для студентських і наукових розробок. Воно забезпечує реалізацію програмного контролю пристроїв у межах проєктів, таких як автоматизовані системи реагування оператора на критичні події. Наприклад, реалізуючи алгоритм фіксації втрати пильності, програміст може оперативно використовувати серійний монітор для відлагодження значень,

що надходять з IR-сенсора, або тестувати взаємодію між компонентами системи без потреби додаткових інструментів.

Наявність спільноти користувачів Arduino, численних форумів, відкритих репозиторіїв та документації дозволяє ефективно вирішувати задачі будь-якої складності. Arduino IDE може бути адаптоване під конкретні потреби користувача через встановлення додаткових модулів, включаючи плагіни для автоматичного форматування коду, інтеграцію з зовнішніми компіляторами або інструментами аналізу продуктивності.

Інтерфейс середовища ілюструється на рис. 3.6, де відображено панель розробки, область компіляції та доступ до інструментів керування бібліотеками.

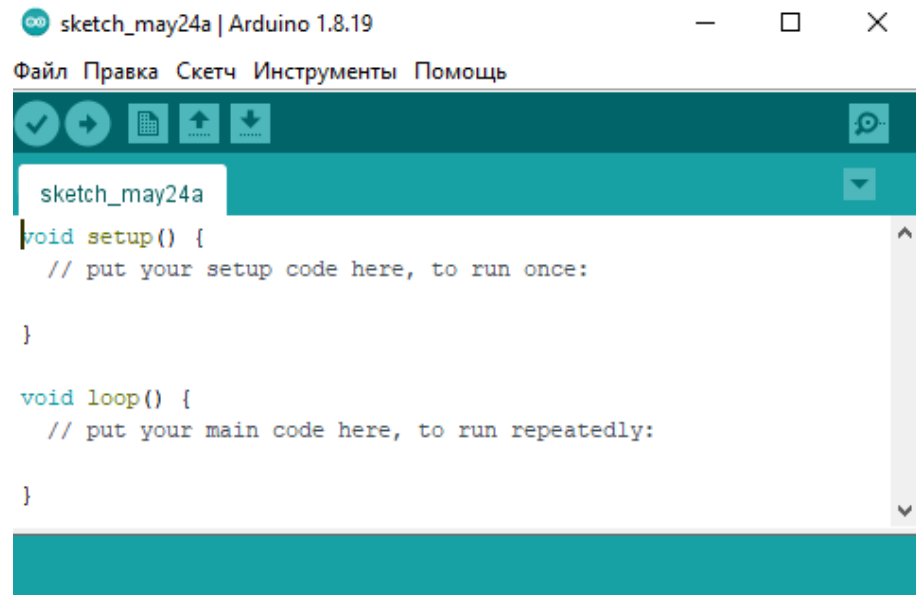


Рисунок 3.6 – Інтерфейс середовища Arduino IDE

3.4 Програмування системи моніторингу втрати реакції оператора в критичних умовах

На етапі розробки програмного забезпечення для системи моніторингу втрати реакції оператора в критичних умовах особлива увага приділяється написанню й відлагодженню коду мікроконтролера, у даному випадку – Arduino Nano. Цей процес є ключовим для забезпечення точного розпізнавання ознак зниження пильності та своєчасного реагування системи.

Першим кроком є використання середовища Arduino IDE, яке забезпечує зручну платформу для створення, компіляції та передачі програмного коду на мікроконтролер. Це середовище є кросплатформенним і підтримується більшістю сучасних операційних систем, що дозволяє забезпечити універсальність використання.

Після встановлення IDE, плата Arduino Nano підключається до персонального комп'ютера через USB-інтерфейс, що дозволяє передати скомпільований код на мікроконтролер. На цьому етапі важливо коректно обрати тип плати у середовищі розробки та вказати відповідний COM-порт для встановлення стабільного зв'язку. При першому підключенні може виникнути потреба в інсталяції драйверів, які забезпечують взаємодію апаратного рівня між комп'ютером і платою.

У процесі створення програмного коду реалізується логіка роботи всієї системи. Основними складовими програми є функції ініціалізації системних параметрів у функції `'setup()'` та реалізація основного циклу у функції `'loop()'`. У першій з них виконується конфігурація пінів для зчитування з IR-сенсора та керування виконавчими пристроями (звуковим модулем і вібромотором), тоді як друга слугує для постійного контролю сигналів, що надходять на мікроконтролер.

Код містить програмні умови, за яких сигнал про зниження рівня уваги оператора – наприклад, тривале перекриття ІЧ-променів на сенсорі – активує відповідні виконавчі пристрої. У середовищі Arduino IDE забезпечено механізми для виявлення помилок на етапі компіляції, що дає змогу ще до завантаження коду виправити некоректні конструкції або логічні помилки. Після компіляції програма завантажується на плату за допомогою вбудованого завантажувача.

Контроль за правильністю функціонування реалізується за допомогою серійного монітора, що дозволяє виводити значення ключових змінних, відстежувати моменти активації сигналів та аналізувати поведінку системи у реальному часі. У процесі верифікації можуть бути виявлені критичні

моменти, пов'язані з некоректним інтерпретуванням сигналів сенсора, уповільненою реакцією або небажаним циклуванням логіки.

Для досягнення необхідної надійності система проходить через декілька ітерацій оптимізації, під час яких проводиться вдосконалення програмної структури, спрощення умовних блоків, застосування таймерів або функцій затримки з метою синхронізації дій пристроїв. Такий підхід дозволяє не лише усунути потенційні логічні помилки, а й забезпечити стабільну роботу системи в умовах експлуатації.

Щоб забезпечити коректну роботу автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на критичну ситуацію, необхідно послідовно реалізувати низку етапів, пов'язаних із програмуванням мікроконтролера. На першому кроці здійснюється встановлення інтегрованого середовища розробки Arduino IDE, яке виступає основним інструментом для написання, компіляції та завантаження програмного забезпечення на мікроконтролер. Після встановлення середовища слід під'єднати мікроконтролер Arduino Nano до персонального комп'ютера за допомогою USB-кабелю. У процесі підключення може виникнути потреба встановлення драйверів, які забезпечують належну взаємодію плати з операційною системою.

У межах середовища Arduino IDE створюється програмний код, який реалізує логіку спостереження за станом сенсорів і активації виконавчих пристроїв. Після написання програми вона компілюється, що дозволяє перевірити коректність синтаксису та структурної логіки. Якщо виявлено помилки, вони мають бути усунені перед завантаженням прошивки на пристрій. Весь процес можна проілюструвати послідовністю дій, зображеною на рис. 3.7.

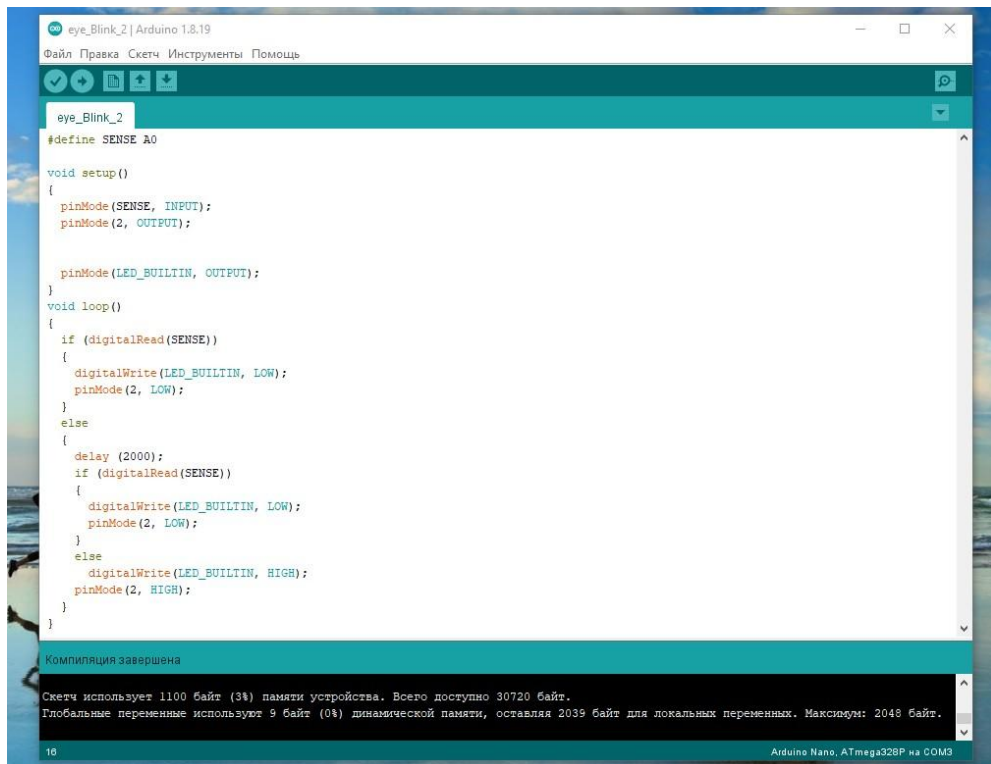


Рисунок 3.7 – Процес створення програмного коду за допомогою застосунку Arduino IDE

Після успішної інсталяції прошивки мікроконтролер готовий до взаємодії з підключеними компонентами. Інтерфейс середовища демонструє повідомлення про успішну передачу коду на пристрій (рис. 3.8).

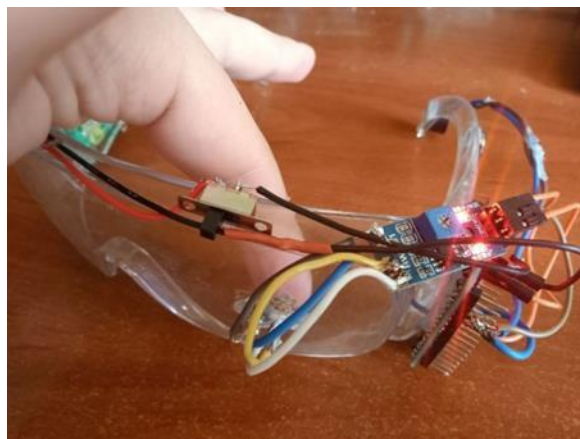


Рисунок 3.8 – Результат після встановлення прошивки

У реалізованому проєкті центральним компонентом є мікроконтролер Arduino Nano, який має декілька цифрових пінів, зокрема два контакти заземлення (GND) та пін живлення на 5 В. Структура підключення пристроїв організована з урахуванням необхідності оптимального використання доступних пінів. Для цього реалізовано спільне заземлення декількох компонентів, що дозволяє підключити вібромотор і звуковий модуль до одного пину живлення з розмежуванням керуючих пінів.

Сенсор HW-201 підключений до аналогового входу A0, що дозволяє зчитувати дані про переривання інфрачервоного променя. Початкова директива у програмному коді – `#define SENSE A0` – визначає логічне ім'я пину, через який здійснюється прийом сигналу від сенсора. У функції `setup()` проводиться ініціалізація: пін `SENSE` встановлюється у режим зчитування (вхід), а керуючий пін 2 – у режим подачі сигналу на виконавчі пристрої (вихід).

Далі у функції `loop()` реалізовано логіку постійного моніторингу. Зчитується значення з пину `SENSE`. Якщо сенсор фіксує зміну інтенсивності сигналу, що свідчить про тривале перекриття ІЧ-променя, вмикаються вібромотор і зумер – як реакція на можливу втрату концентрації оператора. Якщо ж сенсор не фіксує перешкоди, система чекає дві секунди, перш ніж знову перевірити вхідний сигнал. У разі повторного підтвердження відсутності перешкод, виконавчі пристрої залишаються вимкненими. Така логіка забезпечує стійкість системи до випадкових тригерів і дозволяє зменшити ймовірність хибного спрацьовування, залишаючись адаптивною до змін у зовнішньому середовищі.

3.5 Підходи до підвищення ефективності автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію

Підвищення ефективності автоматизованої системи моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію можливе шляхом впровадження додаткових технічних і функціональних рішень, орієнтованих на адаптацію

системи до змінних умов експлуатації та індивідуальних особливостей користувача. Одним із перспективних напрямів удосконалення є інтеграція можливостей дистанційного контролю з використанням плати Arduino Wemos D1 mini, що поєднує функції мікроконтролера і модуля Wi-Fi [14]. Завдяки цьому з'являється можливість реалізувати інтерфейс управління системою в реальному часі через віддалений сервер або мобільний додаток, що підвищує функціональну гнучкість рішення.

Крім того, варто розглянути підключення додаткових сенсорних модулів, які дозволяють розширити спектр реакцій системи на зміну стану оператора. До таких модулів можуть належати, наприклад, акселерометри або гіроскопи, що фіксують різкі рухи голови або зміну положення тіла, а також релейні елементи, які забезпечують активацію імпульсного впливу (низькоінтенсивного електричного сигналу) для короточасної стимуляції оператора у разі фіксації порушень [18]. Такі опції можуть налаштовуватись індивідуально з урахуванням уподобань користувача та специфіки умов експлуатації, що дозволяє підвищити персоналізацію системи.

Додатково, можливе впровадження модуля збору аналітичних даних, що фіксуватиме часові параметри поїздок, частоту активації сигналів попередження, тривалість збереження пасивного стану, кількість втрат реакції тощо. Вся ця інформація може зберігатися локально або передаватися на віддалений сервер, де вона буде використана для створення статистичного профілю поведінки водія. На основі таких даних можна реалізувати системи прогнозування та раннього попередження про потенційне зниження реакції чи перевтому, що суттєво підвищує превентивні можливості системи.

Таким чином, запропоновані напрями покращення не лише розширюють технічні можливості існуючої розробки, а й підвищують її релевантність як до індивідуальних користувацьких потреб, так і до вимог до безпеки в умовах підвищеного ризику.

3.6 Платформа Arduino Wemos D1 Mini

Arduino Wemos D1 Mini, побудований на основі мікросхеми ESP8266, є високофункціональним мікроконтролером, що поєднує компактні розміри з широким функціональним потенціалом [14]. Його ключовою особливістю є наявність вбудованого Wi-Fi-модуля, який дозволяє реалізувати бездротовий зв'язок у системах класу Internet of Things (IoT) без необхідності додаткових адаптерів. Це забезпечує суттєве розширення можливостей автономних пристроїв моніторингу, таких як системи контролю стану оператора під час критичних або тривалих навантажень.

Завдяки сумісності з мовою програмування Arduino та підтримці широкого набору бібліотек, ця плата дозволяє швидко реалізовувати проєкти, орієнтовані на телеметрію, автоматичне регулювання та інтерактивне управління пристроями. Серед ключових функцій варто виокремити здатність до створення локальних або глобальних вебсервісів на основі обробки HTTP-запитів. Це відкриває можливості для реалізації вебінтерфейсу, через який користувач зможе в реальному часі переглядати параметри стану оператора або вручну активувати/деактивувати модулі системи [13].

Інтеграція Arduino Wemos D1 Mini у вже описану систему протидії втраті реакції може суттєво розширити її потенціал. Наприклад, дані про активність водія можуть передаватися до хмарного сервера або мобільного застосунку, де буде формуватися поведінковий профіль з подальшим аналізом. Крім того, реалізація каналів зворотного зв'язку дозволяє дистанційно керувати параметрами роботи пристрою залежно від поточної дорожньої ситуації або індивідуальних характеристик водія. Такий підхід суттєво підвищує гнучкість архітектури та забезпечує новий рівень адаптивності в системах персоналізованої безпеки.

3.7 Специфікація платформи Arduino Wemos D1 Mini

Arduino Wemos D1 Mini є високофункціональною платформою розробки на основі мікроконтролера ESP8266, що поєднує компактність форм-фактора з можливостями повноцінного бездротового обміну даними (рис. 3.9). У межах системи моніторингу реакції оператора на кризові ситуації, ця плата може стати критично важливою складовою для реалізації функцій збору телеметричних даних, їх передачі до віддалених серверів, а також для реалізації системного зворотного зв'язку з оператором у реальному часі.

Ключовим компонентом плати є чип ESP8266, який відзначається високою обчислювальною продуктивністю та низьким енергоспоживанням. Завдяки інтегрованому Wi-Fi-модулю, плата забезпечує повноцінну підтримку мережевого з'єднання без потреби в додаткових модулях або зовнішніх адаптерах. Це дає змогу реалізовувати як точкове підключення до хмарних сервісів, так і створення локальних серверів обробки інформації.

Незважаючи на малі розміри, Arduino Wemos D1 Mini забезпечує підтримку цифрових і аналогових каналів вводу-виводу, що дозволяє легко підключати різні сенсори, виконавчі механізми або периферійні пристрої. Інтерфейси UART, I2C і SPI доступні через зручні порти, що відкриває можливість як для паралельного, так і для послідовного обміну даними в системі. Живлення може здійснюватися через micro-USB або через зовнішній вхід з напругою від 5 до 9 В, що робить її адаптивною до різних варіантів використання.

Сумісність із середовищем розробки Arduino IDE забезпечує просту інтеграцію з уже існуючими бібліотеками, спрощуючи створення прошивки. Це дозволяє навіть розробникам-початківцям розгорнути повноцінні системи без потреби у глибокому вивченні мережевих протоколів або низькорівневого програмування.

Завдяки своїй функціональній насиченості та відкритості до модифікацій, Arduino Wemos D1 Mini є ідеальним вибором для побудови

модульних, масштабованих рішень у сфері автоматизації та безпеки, включаючи системи активного реагування на втрату пильності оператора або інші поведінкові маркери критичних станів.

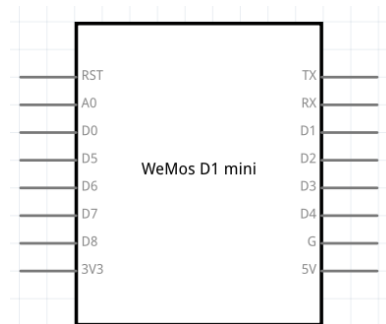


Рисунок 3.9 – Схема Arduino Wemos D1 Mini

3.8 Налаштування вебсервера на базі Arduino Wemos D1 Mini

Arduino Wemos D1 Mini надає можливість налаштування як повноцінного вебсервера, що дозволяє інтерактивну взаємодію з користувачем через інтерфейс браузера. Такий підхід дозволяє забезпечити моніторинг або керування системою дистанційно, без необхідності додаткових пристроїв чи програмного забезпечення (рис. 3.10).

Для реалізації цієї функціональності використовується бібліотека ESP8266WebServer, яка інтегрується з середовищем Arduino IDE та надає програмісту абстрагований інтерфейс для обробки вхідних HTTP-запитів, динамічного генерування відповідей та формування вебсторінок. Першим етапом є фізичне підключення плати до ПК через micro-USB та забезпечення наявності відповідного драйвера, який гарантує коректне розпізнавання пристрою системою.

Далі необхідно впевнитися, що Arduino IDE підтримує плати на базі ESP8266. Для цього в налаштуваннях середовища додається URL менеджера плат, після чого здійснюється встановлення підтримки Wemos D1 Mini. Після цього стає можливим вибір відповідної плати («Wemos D1 R2 & Mini») у

параметрах проєкту, а також коректного COM-порту, до якого здійснено підключення пристрою.

Програмна частина вебсервера реалізується за допомогою оголошення об'єкта типу `ESP8266WebServer`, в якому встановлюються обробники для різних маршрутів, таких як `"/`, `"/status"`, або `"/action"`. За допомогою цих обробників можна реалізувати сторінки керування, зчитування стану датчиків або виклик певних функцій пристрою. У функції `setup()` здійснюється підключення до Wi-Fi-мережі шляхом вказання SSID і пароля, після чого запускається сам сервер і реєструються маршрути. Головна функція `loop()` містить метод `handleClient()`, який обслуговує кожен запит від клієнта.

Після прошивки пристрою, у серійному моніторі буде виведена призначена йому IP-адреса. При введенні цієї адреси в адресний рядок браузера відкриється вебінтерфейс, який реалізовано у коді. Таким чином, Arduino Wemos D1 Mini перетворюється на повноцінний сервер, здатний надавати інформацію у вигляді вебсторінки, реагувати на запити користувача, та навіть взаємодіяти з іншими пристроями через мережу.

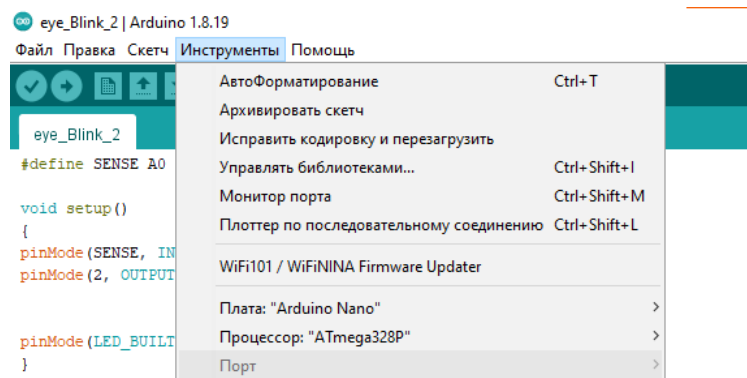


Рисунок 3.10 – Середовище розробки та перевірка вебсервера на базі Arduino Wemos D1 Mini

3.9 Реалізація дистанційного керування

Інтеграція функціоналу дистанційного керування у систему моніторингу реакції оператора дозволяє значно розширити її функціональні можливості та зручність у використанні. Завдяки застосуванню плати Arduino Wemos D1 Mini як вебсервера, забезпечується можливість керування пристроєм через Wi-Fi з будь-якої точки, де доступна мережева інфраструктура. Такий підхід відкриває перспективи для інтеграції проєкту в екосистему Інтернету речей, зокрема для реалізації моніторингу та реагування в реальному часі (рис. 3.11).

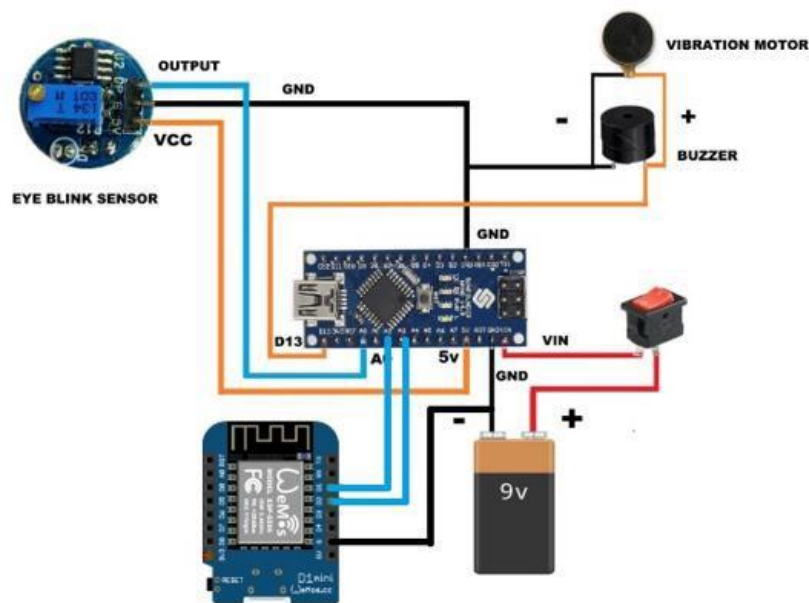


Рисунок 3.11 – Принципова схема підключення модулів Arduino Nano та Wemos D1 Mini для реалізації Wi-Fi-керування

Для організації зв'язку між Arduino Nano та Arduino Wemos D1 Mini було застосовано інтерфейс UART. Передача даних здійснювалася через цифрові лінії TX та RX. На стороні Arduino Nano було обрано пін 1 як лінію передачі (TX) та пін 0 як лінію прийому (RX), тоді як на Wemos D1 Mini було використано пін D6 як TX та пін D7 як RX. Для забезпечення стабільної роботи системи була обов'язково реалізована спільна лінія заземлення між двома мікроконтролерами.

Подальший етап включав написання окремих програм для кожної з плат. Код для Arduino Nano відповідав за формування та передачу даних через послідовний порт, у той час як програма на Arduino Wemos D1 Mini обробляла вхідні сигнали та формувала відповідь користувачу через вебінтерфейс. Таким чином, за допомогою з'єднання UART, обидві плати функціонували як складові однієї інтегрованої системи, що дозволяє взаємодіяти з пристроєм віддалено, наприклад, з мобільного телефону або ноутбука через браузер.

Для налагодження процесу було використано середовище Arduino IDE, через яке виконувалося завантаження прошивок на обидва мікроконтролери через USB-кабелі. Після успішної компіляції й завантаження програми, було здійснено тестування каналу зв'язку. Пристрої стабільно обмінювались даними, що підтвердило коректність розробленого з'єднання та логіки керування.

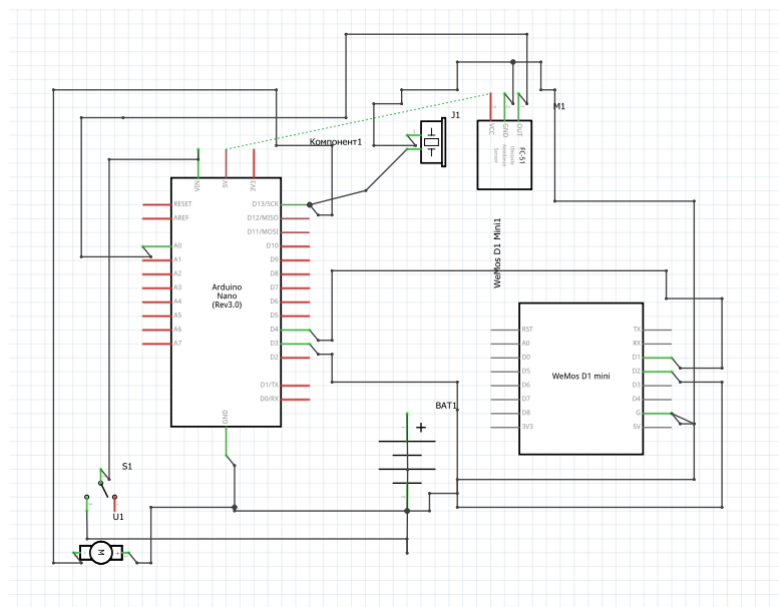


Рисунок 3.12 – Схема електричних з'єднань для реалізації UART-комунікації між пристроями

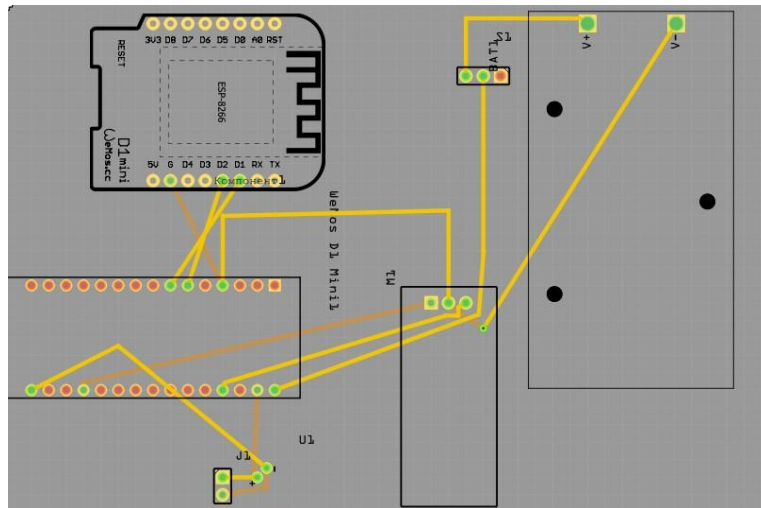


Рисунок 3.13 – Дизайн друкованої плати, що забезпечує компактне та надійне розміщення компонентів системи

Розширення функціональності системи за рахунок інтеграції з базою даних суттєво підвищує її ефективність, надійність і здатність до довгострокового аналізу. Завдяки використанню Arduino Wemos D1 Mini як сервера можна реалізувати не лише збір, але й збереження даних у зовнішню базу даних, наприклад, MySQL. Це відкриває можливість створення історичних звітів про реакції сенсорів, частоту активації модулів, а також аналізу поведінкових шаблонів водія у динаміці (рис. 3.13–3.14).

Для цього на мікроконтролері Arduino Wemos D1 Mini реалізується вебсервер, який підтримує зв'язок з клієнтами за протоколом HTTP. У відповідному коді реалізовано обробку вхідних запитів, зчитування даних з сенсорів та передачу їх до бази даних через Wi-Fi. Бібліотеки, необхідні для підключення до MySQL (наприклад, `MySQL\_Connector\_ESP8266.h`), забезпечують сумісність Wemos D1 Mini із сучасними системами зберігання даних (рис. 3.14).

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#define SENSE A0
// Змінні для підключення до Wi-Fi мережі
const char* ssid = "ім'я_мережі";
const char* password = "пароль_мережі";
// Створення екземпляру сервера
ESP8266WebServer server(80);
void setup() {
    // Підключення до Wi-Fi мережі
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.println("Connecting to WiFi...");
    }
    // Встановлення пінів
    pinMode(SENSE, INPUT);
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    pinMode(D2, OUTPUT); // Встановлення піна D2 як вихідний

    // Реєстрація обробників запитів
    server.on("/", handleRoot);
    server.begin();
    Serial.println("HTTP server started");
}
void loop() {
    server.handleClient(); // Обробка клієнтських запитів
}
// Обробник кореневого URL-адреси
void handleRoot() {
    String response;
    if (digitalRead(SENSE)) {
        response = "LED is OFF";
        digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // Вимкнути вбудований світлодіод
        digitalWrite(D2, LOW); // Вимкнути зовнішній світлодіод
    } else {
        response = "LED is ON";
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // Увімкнути вбудований світлодіод
        digitalWrite(D2, HIGH); // Увімкнути зовнішній світлодіод
    }
    server.send(200, "text/plain", response);
}

```

Рисунок 3.13 – Приклад коду вебсервера на базі Arduino Wemos D1 Mini для передачі даних у базу даних

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <MySQL_Connection.h>
#include <MySQL_Cursor.h>

```

Рисунок 3.14 – Перелік необхідних бібліотек для інтеграції з MySQL

Для візуалізації загальної логіки функціонування розширеної системи було створено блок-схему, на якій показано взаємодію між Wemos D1 Mini, трьома модулями (гіроскопом, реле та ІЧ-сенсором) та базою даних. Така

структура дозволяє модульно налаштовувати систему, додаючи або відключаючи окремі компоненти за потреби, що забезпечує гнучкість і масштабованість проєкту (рис. 3.15).

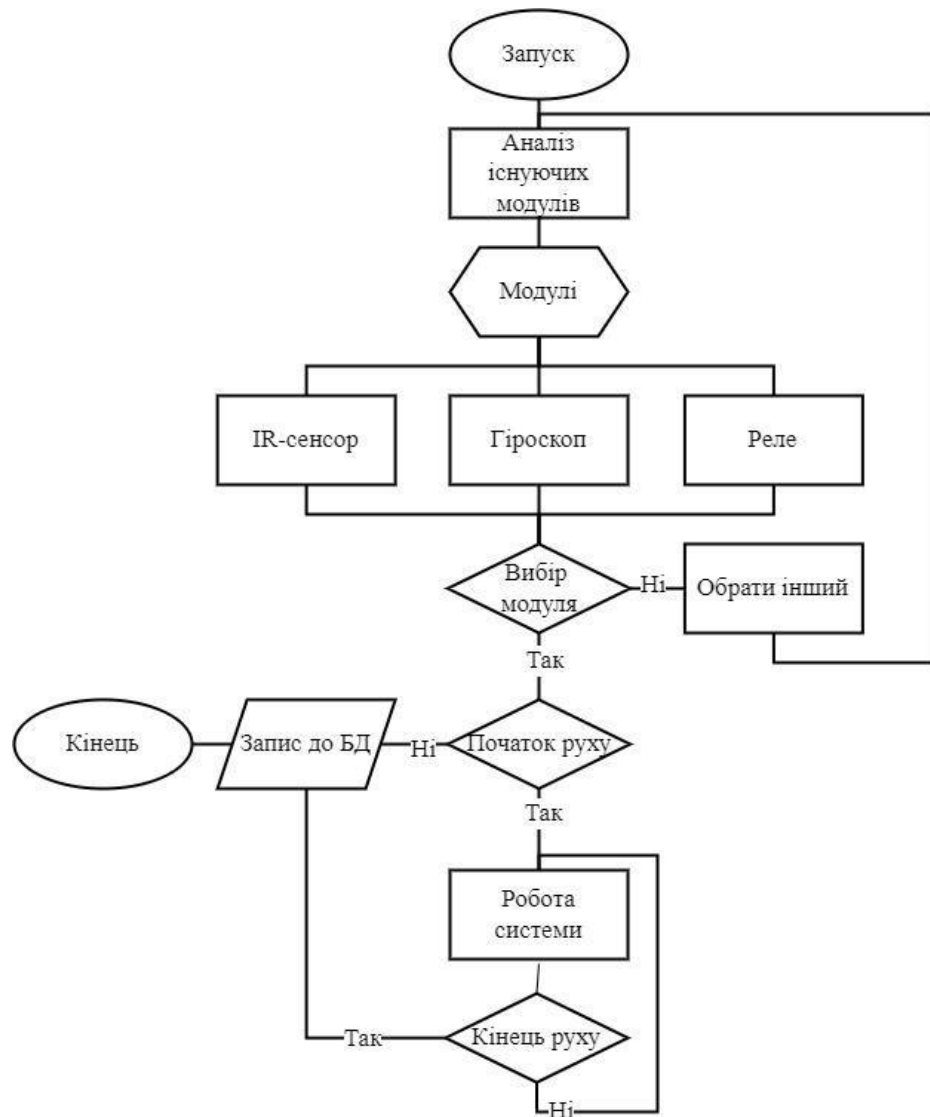


Рисунок 3.15 – Блок-схема вдосконаленої системи з інтеграцією бази даних для збору й обробки інформації

3.10 Перспективи розширення сфери застосування створеної системи

Застосування автоматизованої системи моніторингу реакції оператора в суміжних сферах діяльності відкриває перспективи для її масштабування поза межами критичних ситуацій. Зокрема, однією з потенційних сфер впровадження є офісне середовище, де спостереження за поведінковими та

фізіологічними параметрами працівників дозволяє виводити процес управління персоналом на якісно новий рівень. Система, створена на основі платформ Arduino, уможливорює безперервний аналіз активності працівників з акцентом на профілактику професійного вигорання, підтримку концентрації та оптимізацію розподілу навантаження.

У контексті офісної діяльності система може використовуватися для динамічного відстеження змін у рівні залученості персоналу, ідентифікації часових проміжків найвищої ефективності, а також формування індивідуального зворотного зв'язку. На основі даних, що генеруються сенсорами, здійснюється оцінка фізіологічних показників, які сигналізують про зниження реакції чи втрату пильності, що критично важливо для запобігання помилкам у високонавантажених робочих сценаріях. У межах цієї моделі реалізується також алгоритмічна обробка патернів активності з метою визначення оптимальних графіків роботи.

Система дозволяє оперативно реагувати на появу ознак перенавантаження, надсилаючи персоналізовані сигнали про необхідність перерви або зміну роду діяльності. За умови інтеграції з корпоративними інформаційними платформами, вона також підтримує формування автоматизованих звітів для керівництва щодо виконання завдань у реальному часі, що покращує управління проектами та ресурсами. Завдяки модулю адаптивного аналізу можливе формування рекомендацій з коригування поведінкових стратегій працівників для підвищення їх стресостійкості та загальної продуктивності.

На відміну від стандартних методів обліку часу чи контролю присутності, запропонована система орієнтується на якісні параметри діяльності. Це дозволяє не лише виявляти тенденції до зниження концентрації, а й прогнозувати ризики виникнення професійних захворювань, таких як синдром комп'ютерного зору чи хронічне напруження м'язів. Застосування предикативного аналізу дає змогу заздалегідь

формувати індивідуальні стратегії профілактики, адаптовані до конкретного типу завдань і психофізіологічних характеристик працівника.

Реалізація функціоналу автоматизованого збору та обробки даних також створює підґрунтя для розроблення внутрішніх систем стимулювання, зокрема – на основі кількісної оцінки внеску працівника у загальний результат команди. Такі механізми можуть бути інтегровані з навчальними модулями, які активуються за умов виявлення специфічних прогалин у навичках чи знаннях.

Візуальна структура взаємозв'язків між компонентами системи, представлена на рисунку 3.16, демонструє, як синхронна робота апаратного й програмного забезпечення забезпечує гнучкість адаптації до нових сценаріїв використання без зміни архітектури системи.

На підставі проведеного аналізу можна стверджувати, що кожен структурний елемент системи є ключовим у формуванні єдиного функціонального середовища, здатного адаптивно реагувати на зміни у поведінці працівників та забезпечувати підтримку їх професійної ефективності у межах офісного простору.

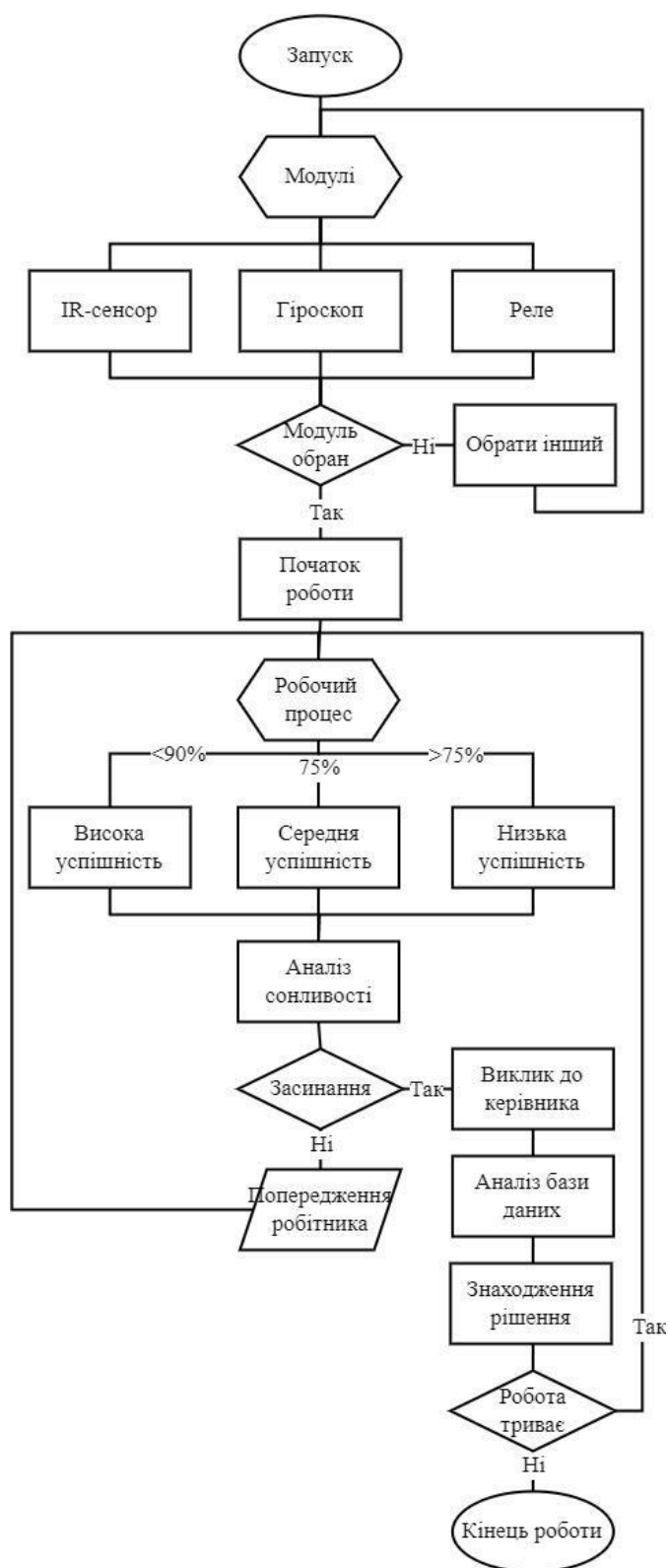


Рисунок 3.16 – Блок-схема інтеграції системи

ВИСНОВКИ

Розроблена система ідентифікації втрати пильності оператора, зокрема в контексті запобігання дорожньо-транспортним подіям, демонструє приклад технологічного підходу до вирішення складної безпекової проблеми, що має тенденцію до зростання в умовах підвищеної мобільності та інтенсифікації транспортного потоку. В основі функціонування системи – сукупність сенсорних модулів і обчислювальних алгоритмів, спрямованих на виявлення критичних змін у психофізіологічному стані водія, зокрема сигналів, що передують втраті уваги або мимовільному засинанню. Актуальність такого рішення підтверджується стабільно високим рівнем аварійності, що обумовлюється саме людським фактором, особливо в умовах довготривалих поїздок чи роботи у змінному режимі.

Інтерес до подібних технологій активно виявляють і ключові представники автомобільної індустрії, які розглядають системи активного моніторингу стану водія не лише як елемент безпеки, а й як інструмент підвищення ринкової конкурентоспроможності. Впровадження систем, що дозволяють запобігти аваріям, має позитивний вплив як на репутаційні показники компаній, так і на економічні результати через зниження втрат, пов'язаних із нещасними випадками.

При цьому доцільно розглядати запропоновану систему не виключно в межах транспортного сектору. Її функціональність може бути адаптована до середовищ із підвищеним рівнем відповідальності – промислові об'єкти, диспетчерські пункти, офісні середовища, де потрібен постійний контроль когнітивної активності працівника. Система може бути використана як складова більш комплексних рішень – наприклад, в інтеграції з програмно-апаратними модулями автоматичного реагування, зокрема екстреного гальмування чи корекції траєкторії, а також у поєднанні з відеоаналітичними засобами розпізнавання міміки та напрямку погляду.

У контексті подальшого вдосконалення системи доцільним є проведення міждисциплінарних досліджень на перетині галузей комп'ютерного зору, штучного інтелекту та психофізіології. Вивчення нейрофізіологічних реакцій на ранніх стадіях втрати концентрації дозволить розширити спектр діагностичних ознак, що підвищить точність класифікації станів та дозволить системі реагувати на ризики на більш ранньому етапі. Удосконалення алгоритмів обробки біометричних даних, а також створення адаптивних моделей машинного навчання відкриває можливості для індивідуалізації роботи системи з урахуванням персональних фізіологічних особливостей користувача.

З прикладної точки зору, запропоноване рішення має значне практичне значення: його можна використовувати як у процесі розробки засобів активної безпеки для автомобільного транспорту, так і в дослідницьких цілях – для оцінки динаміки стану людини у високонавантажених середовищах. Універсальність системи також зумовлює її потенційне поширення на інші види транспорту – важковагові вантажівки, пасажирські автобуси, морські судна, авіаційні кабіни, де людський фактор має вирішальне значення для безпеки.

Таким чином, результати дослідження не лише підтвердили доцільність створення автоматизованої системи ідентифікації втрати пильності оператора, але й окреслили перспективи її мультисекторального застосування. Подальший розвиток у цьому напрямі може стати поштовхом до формування нових технологічних стандартів у сфері безпеки та посилення міждисциплінарної кооперації в дослідницьких середовищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атаманчук, П. С. (2018). Методи та засоби виявлення втоми водія: сучасний стан проблеми. Системи обробки інформації, 4(154), 117–121.
2. Ігнатенко, В. О. (2021). Автоматизовані системи контролю стану водія: аналіз рішень та перспективи розвитку. Вісник НТУ "ХПІ", 9(1413), 34–40.
3. Боровик, А. В., & Мельник, С. М. (2022). Аналіз застосування біометричних сенсорів у системах моніторингу. Наукові записки ТНПУ, 4(94), 45–51.
4. Чубенко, О. М. (2019). Використання Arduino в системах моніторингу: досвід розробки. Інформаційні технології і засоби навчання, 1(69), 21–28.
5. Соловей, С. В. (2020). Психофізіологічні особливості втоми в екстремальних умовах. Актуальні проблеми психології, 1(28), 51–56.
6. Денисенко, Ю. В. (2023). Автоматизовані системи безпеки в транспорті: технічні рішення і виклики. Збірник наукових праць НАУ, 2(76), 65–71.
7. Савчук, Р. І., & Крамар, Н. Б. (2020). Огляд технологій виявлення засинання водія. Науковий вісник ХДУ, 1(31), 129–135.
8. Снігур, О. С. (2022). Системи реального часу в задачах виявлення втрати пильності. Комп'ютерні науки та інформаційні технології, 2(30), 92–97.
9. Li, Z., Wang, C., & Wang, H. (2021). Driver drowsiness detection based on eye state recognition using CNN. IEEE Access, 9, 113615–113623. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104553>
10. Zhang, Y., Wang, S., & Liu, J. (2022). A review of driver fatigue detection based on computer vision and deep learning. Sensors, 22(3), 983. <https://doi.org/10.3390/s22030983>

11. John, D., & Park, J. (2019). Real-time alert systems for driver fatigue detection using smart cameras. *Procedia Computer Science*, 155, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.058>
12. Alshaqaqi, A., Al-Naji, A., & Chahl, J. (2020). Remote sensing of driver drowsiness using computer vision and machine learning. *Electronics*, 9(9), 1465. <https://doi.org/10.3390/electronics9091465>
13. Alotaibi, Y., & Hussain, M. (2019). Vision-based drowsiness detection system for drivers: A survey. *Applied Sciences*, 9(12), 2461. <https://doi.org/10.3390/app9122461>
14. Deng, Y., Zhou, Z., & Yu, X. (2021). A multimodal fatigue detection system for intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(12), 7740–7748. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3031574>
15. Islam, N., Ferdous, S., & Rahman, M. (2018). Arduino-based system for real-time driver fatigue detection. *International Journal of Computer Applications*, 180(24), 18–22.
16. Shahverdy, M., Fathy, M., & Sabokrou, M. (2020). Driver behavior detection: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(5), 1799–1815. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2898898>
17. Awais, M., Badruddin, N., & Drieberg, M. (2017). A hybrid approach to detect driver drowsiness utilizing physiological signals to improve system performance and accuracy. *Sensors*, 17(9), 1991. <https://doi.org/10.3390/s17091991>
18. Lee, J., Kim, D., & Park, M. (2022). Drowsiness detection using fusion of EEG and facial features. *IEEE Access*, 10, 23356–23365. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146879>
19. Kussul, E., & Skoryk, A. (2023). Smart monitoring systems in industrial environments: A human-centric approach. *Cybernetics and Systems Analysis*, 59(1), 73–80. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00536-3>
20. Misailović, A., & Tomašević, N. (2020). Real-time monitoring of driver vigilance using embedded systems. *Journal of Ambient Intelligence and*

Humanized Computing, 11, 3621–3631. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02049-7>

21. Григор'єв, М. С. (2021). Вплив монотонного режиму праці на рівень уваги оператора. Проблеми управління та інформатики, 2(80), 33–39.
22. Кожушко, І. П. (2020). Біоінженерні аспекти систем виявлення втоми оператора. Біомедична інженерія і технологія, 1(2), 52–59.
23. Діденко, Ю. М. (2019). Перспективи впровадження систем контролю уваги в інтелектуальних транспортних засобах. Інтелектуальні системи прийняття рішень, 3(34), 74–80.
24. Шевченко, А. Л., & Гуменюк, О. Б. (2022). Виявлення втрати пильності за допомогою нейромережових моделей. Вісник Хмельницького національного університету, 5(303), 89–94.

Додаток А
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Автоматизована система моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра КСУ
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0.1 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

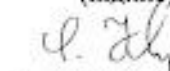
Експертна комісія:

Завідувач кафедри КСУ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

В'ячеслав КОВТУН

Гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

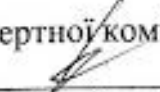
Олег КОВАЛЮК

Особа, відповідальна за перевірку

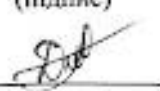

(підпис)

Володимир ДУБОВОЙ
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

В'ячеслав КОВТУН
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Святослав ДОЛЮК
(прізвище, ініціали)

Додаток Б
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри КСУ ВНТУ,

д.т.н., проф.



В'ячеслав КОВТУН

“ 23 ” травня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи

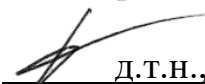
**«АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕАКЦІЇ ОПЕРАТОРА
НА КРИЗОВУ СИТУАЦІЮ»**

Студент групи



2АКІТ-216 Євгеній Долюк

Керівник



д.т.н., проф. В'ячеслав КОВТУН

Вінниця 2025

1. Назва та галузь застосування

1.1. Назва – Автоматизована система моніторингу реакції оператора на кризову ситуацію

1.2. Галузь застосування – Транспорт, промисловість, інфраструктура безпеки.

2. Підстава для проведення розробки.

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи затверджена наказом по ВНТУ № 97 від 20.03.2025 р.

3. Мета та призначення розробки.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка прототипу автоматизованої системи, здатної здійснювати моніторинг стану оператора у реальному часі та виявляти ознаки сонливості, втоми або зниження уваги для попередження потенційно небезпечних ситуацій.

4. Джерела розробки.

Бакалаврська кваліфікаційна робота виконується вперше. В ході проведення розробки повинні використовуватись такі документи:

1. Кожушко, І. П. (2020). Біоінженерні аспекти систем виявлення втоми оператора. Біомедична інженерія і технологія, 1(2), 52–59.
2. Чубенко, О. М. (2019). Використання Arduino в системах моніторингу: досвід розробки. Інформаційні технології і засоби навчання, 1(69), 21–28.
3. Діденко, Ю. М. (2019). Перспективи впровадження систем контролю уваги в інтелектуальних транспортних засобах. Інтелектуальні системи прийняття рішень

5. Вимоги до розробки.

5.1. Перелік головних функцій:

- зчитування фізіологічних та поведінкових індикаторів
- аналіз отриманих сигналів для виявлення сонливості та втоми
- реєстрація подій у лог або передача через бездротовий інтерфейс
- адаптація під індивідуальні параметри користувача

5.2. Основні технічні вимоги до розробки.

5.2.1. Вимоги до програмної платформи:

- Python, C++;
- Windows, Linux або MacOS

5.2.2. Умови експлуатації системи:

- тривала автономна робота;
- збір даних у режимі реального часу;
- стійкість до зовнішніх перешкод.

6. Стадії та етапи розробки.

6.1 Пояснювальна записка:

1. Аналіз методів, принципів, підходів і засобів реалізації задачі автоматизації процесами в об'єкті управління відповідно до теми кваліфікаційної роботи. Постановка задач дослідження «15» травня 2025 р.
2. Визначення технічних характеристик системи «19» травня 2025 р.
3. Розробка програмного забезпечення системи «23» травня 2025 р.

6.2 Графічні матеріали:

1. Розробка моделі системи «24» травня 2025 р.
2. Тестування програмного забезпечення «10» червня 2025 р.

7. Порядок контролю і приймання.

- 7.1. Хід виконання роботи контролюється керівником роботи. Рубіжний контроль провести до «4» червня 2025 р.
- 7.2. Атестація роботи здійснюється на попередньому захисті. Попередній захист бакалаврської кваліфікаційної роботи провести до «10» червня 2025 р.
- 7.3. Підсумкове рішення щодо оцінки якості виконання роботи приймається на засіданні ЕК. Захист бакалаврської кваліфікаційної роботи провести до «18» червня 2025 р.

Додаток В
(довідковий)
Лістинг основних модулів

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <EEPROM.h>
#include <MAX30100_PulseOximeter.h>

#define BUZZER_PIN 9
#define LED_ALERT_PIN 8
#define IR_SENSOR_PIN A0
#define PROFILE_BUTTON 7
#define CHIP_SELECT 10

PulseOximeter pox;
float bpm;
bool alert = false;
int profile = 0;

struct UserProfile {
    uint8_t pulseLow;
    uint8_t pulseHigh;
    int irThreshold;
};

UserProfile profiles[2] = {
    {45, 60, 100}, // Профіль 0
    {50, 70, 120} // Профіль 1
};

// EEPROM: зберігаємо активний профіль у комірці 0
void saveProfileToEEPROM(int profile) {
    EEPROM.update(0, profile);
}

int readProfileFromEEPROM() {
    return EEPROM.read(0);
}
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
  pinMode(LED_ALERT_PIN, OUTPUT);
  pinMode(PROFILE_BUTTON, INPUT_PULLUP);

  if (!pox.begin()) {
    Serial.println("Pulse sensor not found!");
    while (1);
  }

  if (!SD.begin(CHIP_SELECT)) {
    Serial.println("SD init failed!");
    while (1);
  }

  profile = readProfileFromEEPROM();

  pox.setIRLedCurrent(MAX30100_LED_CURR_7_6MA);
  Serial.println("System initialized.");
}

void loop() {
  pox.update();
  bpm = pox.getHeartRate();
  int ir_value = analogRead(IR_SENSOR_PIN);

  UserProfile active = profiles[profile];

  bool drowsy = (bpm > active.pulseLow && bpm < active.pulseHigh) && (ir_value < active.irThreshold);

  if (drowsy) {
    triggerAlert();
    alert = true;
  } else {
    alert = false;
    noTone(BUZZER_PIN);
    digitalWrite(LED_ALERT_PIN, LOW);
  }
}

```

```

}

logToSD(bpm, ir_value, drowsy);

// Перемикання профілю кнопкою
if (digitalRead(PROFILE_BUTTON) == LOW) {
    delay(300); // debounce
    profile = (profile + 1) % 2;
    saveProfileToEEPROM(profile);
    Serial.print("Switched to profile: ");
    Serial.println(profile);
}

delay(1000);
}

void triggerAlert() {
    tone(BUZZER_PIN, 1200, 500);
    digitalWrite(LED_ALERT_PIN, HIGH);
}

void logToSD(float bpm, int ir, bool drowsy) {
    File file = SD.open("log.txt", FILE_WRITE);
    if (file) {
        file.print("BPM: ");
        file.print(bpm);
        file.print(", IR: ");
        file.print(ir);
        file.print(", Alert: ");
        file.println(drowsy ? "YES" : "NO");
        file.close();
    } else {
        Serial.println("Cannot open log file");
    }
}

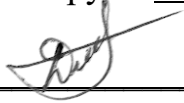
```

Додаток Г
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

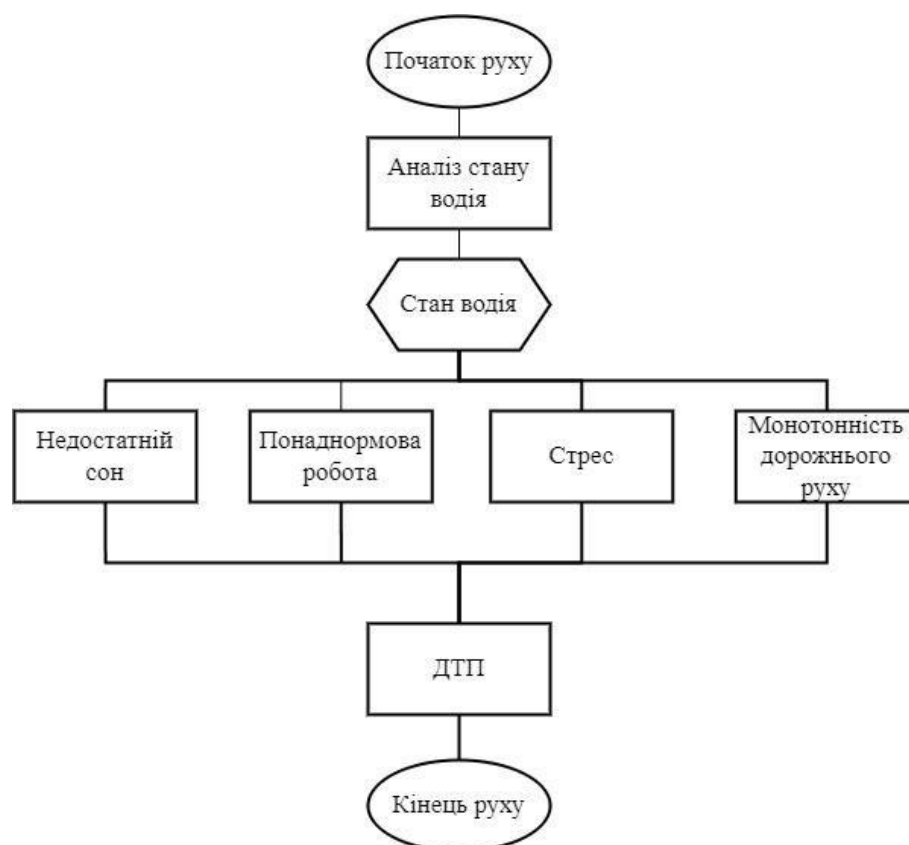
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕАКЦІЇ ОПЕРАТОРА НА КРИЗОВУ СИТУАЦІЮ.

Студент групи 2АКІТ-216

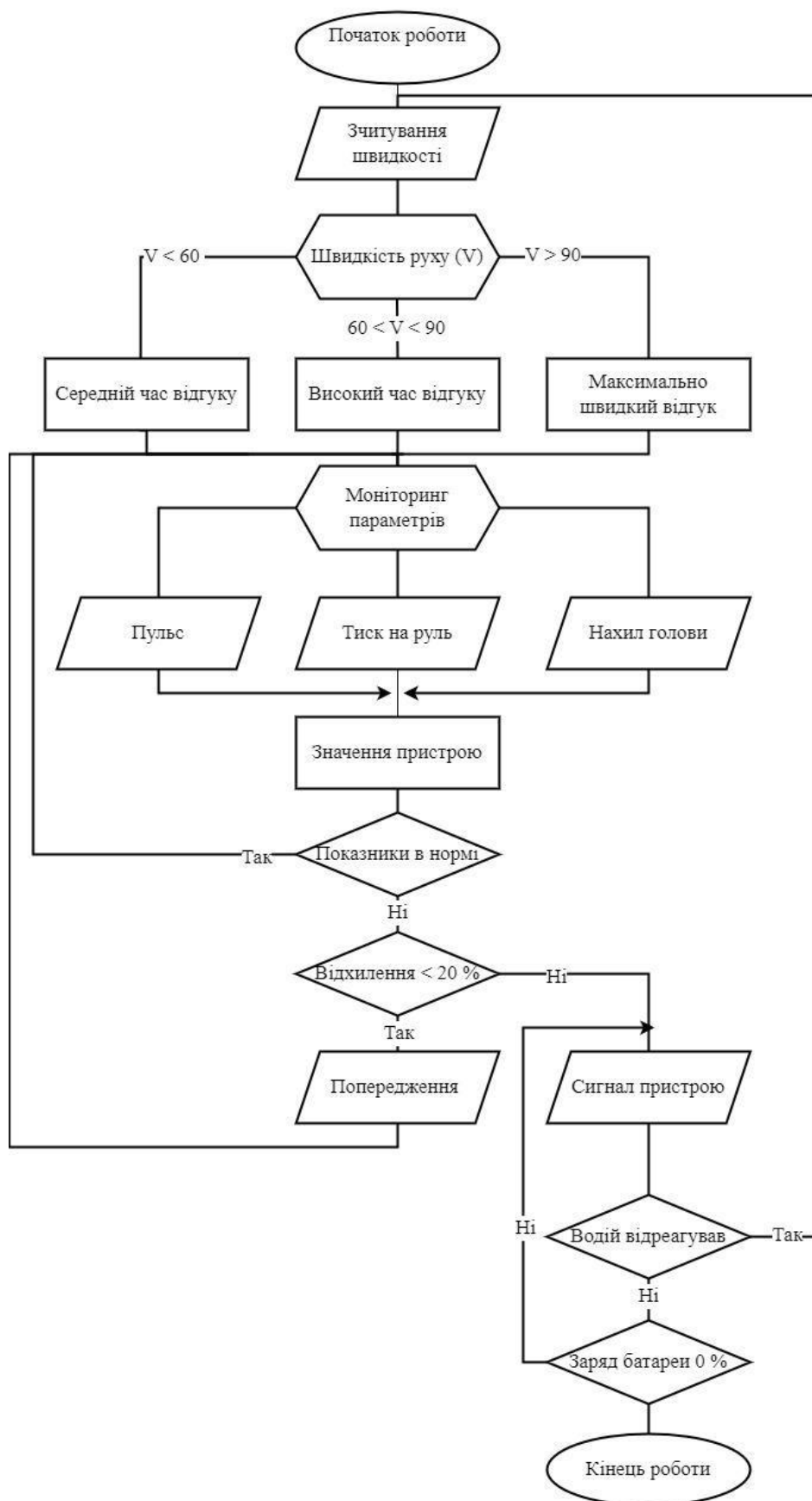

Євгеній ДОЛЮК

Керівник д.т.н., проф.

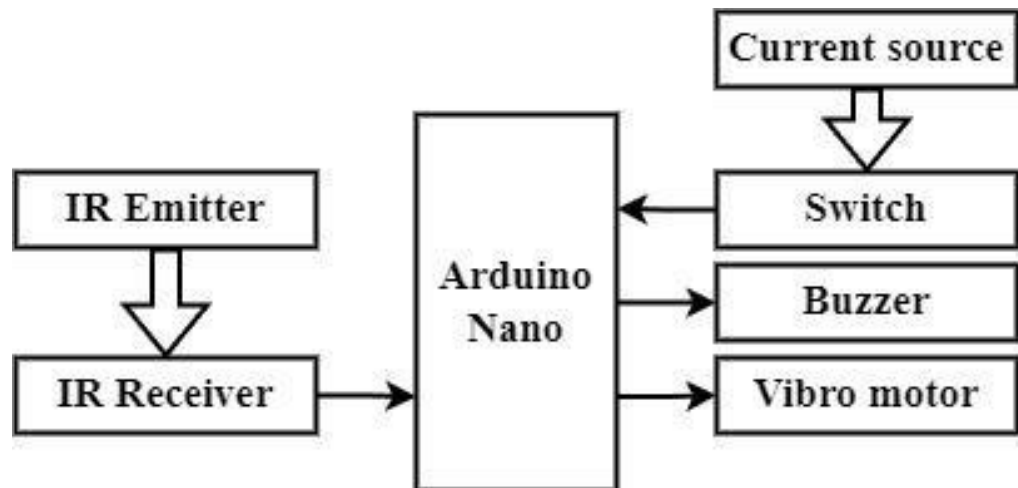

В'ячеслав КОВТУН



Блок-схема провідних факторів, що спричиняють зниженню реакції оператора



Блок-схема алгоритму функціонування системи з модульною структурою виявлення ознак зниження реакції оператора



Функціональна схема принципу роботи системи протидії втраті пильності оператором під час виконання критичних завдань

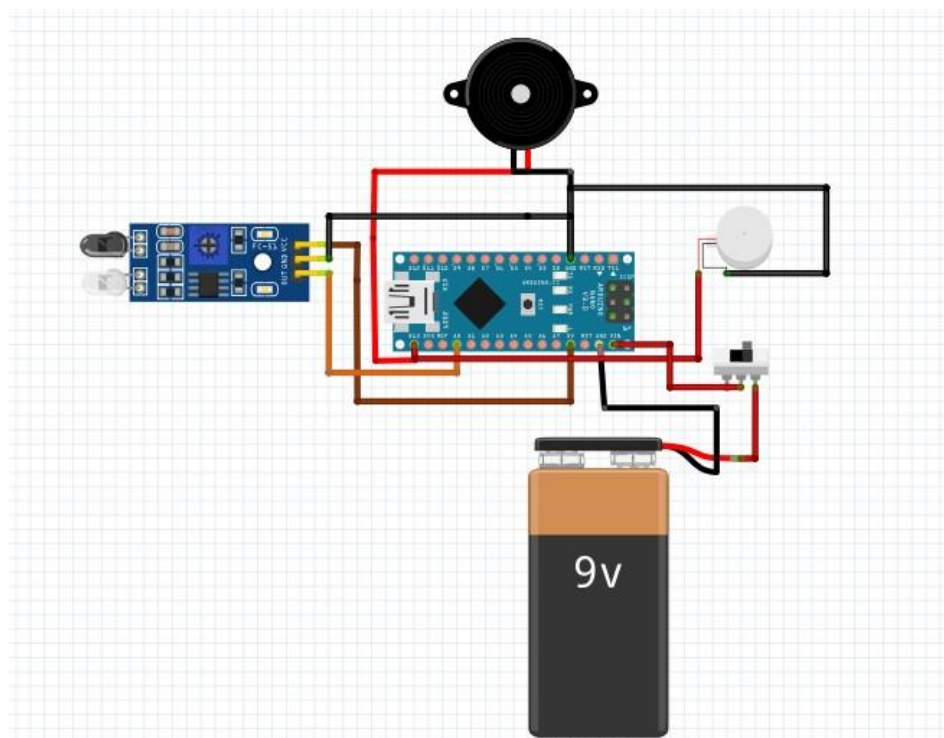
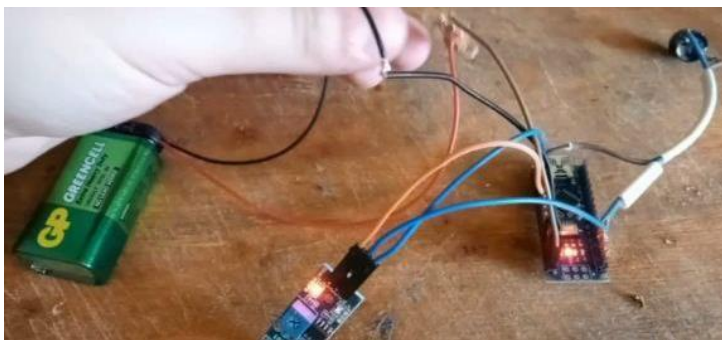


Схема підключення пристрою



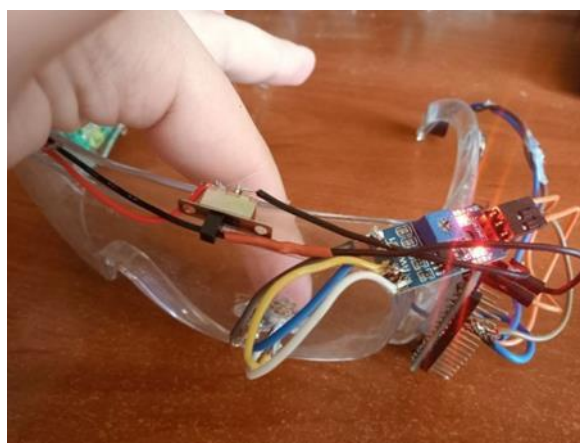
Первинний вигляд конструкції



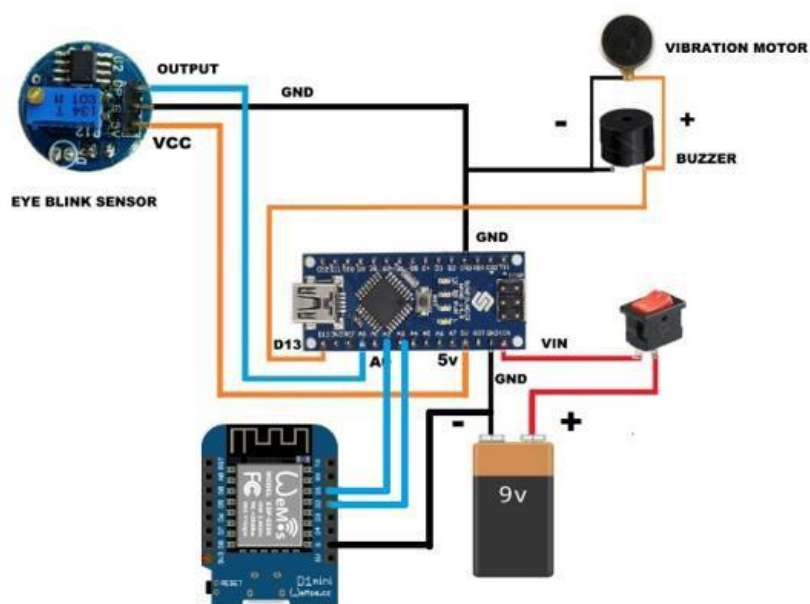
Покращення IR-сенсора



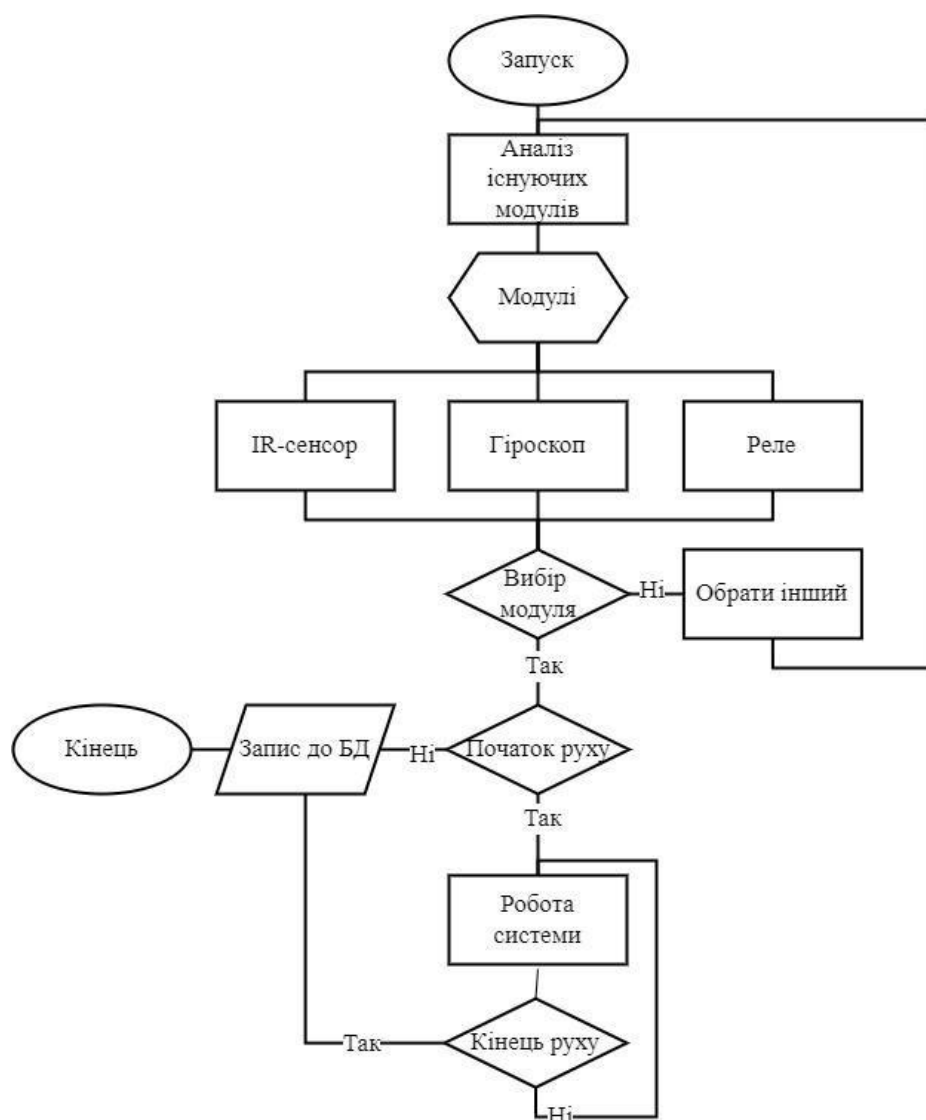
Готовий пристрій



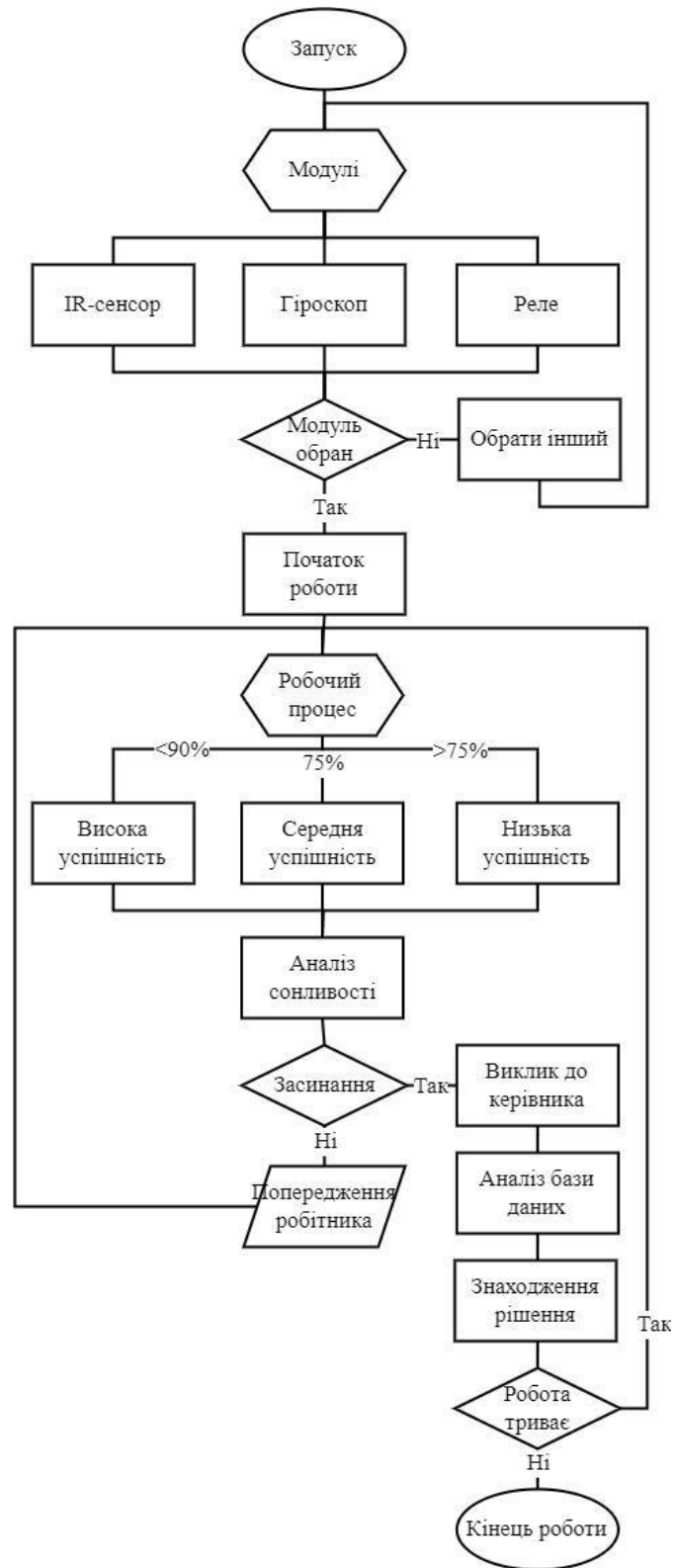
Результат після встановлення прошивки



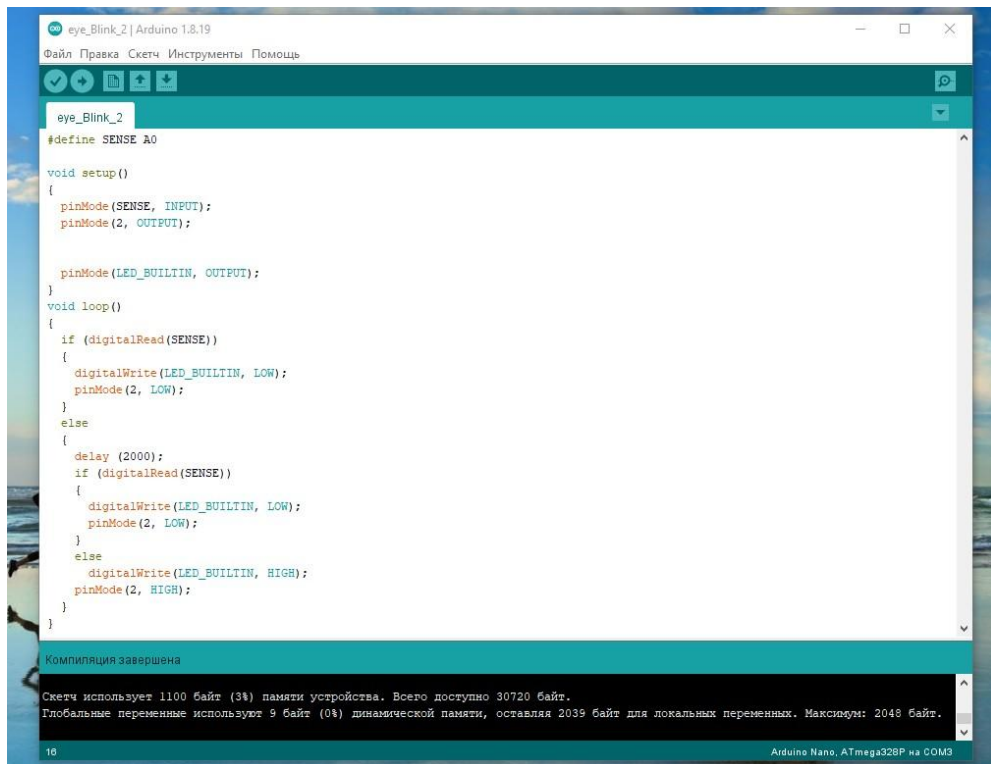
Принципова схема підключення модулів Arduino Nano та Wemos D1 Mini для реалізації Wi-Fi-керування



Блок-схема вдосконаленої системи з інтеграцією бази даних для збору й обробки інформації



Блок-схема інтеграції системи



```
eye_Blink_2 | Arduino 1.8.19
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

eye_Blink_2
#define SENSE_A0

void setup()
{
  pinMode(SENSE, INPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);

  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

void loop()
{
  if (digitalRead(SENSE))
  {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    pinMode(2, LOW);
  }
  else
  {
    delay (2000);
    if (digitalRead(SENSE))
    {
      digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
      pinMode(2, LOW);
    }
    else
    {
      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
      pinMode(2, HIGH);
    }
  }
}

Компиляция завершена

Скетч использует 1100 байт (3%) памяти устройства. Всего доступно 30720 байт.
Глобальные переменные используют 9 байт (0%) динамической памяти, оставляя 2039 байт для локальных переменных. Максимум: 2048 байт.

10 Arduino Nano, ATmega328P на COM3
```

Приклад роботи програмного коду