



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютерна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Лучці Микиті Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Багатофункціональний тренажер на базі мікроконтролера \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 425 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 14 липня 2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вхідні дані до роботи 1. Моніторинг фізичних параметрів. \_\_\_\_\_

2. Фізіологічний моніторинг. \_\_\_\_\_

3. Адаптивне управління. \_\_\_\_\_

4. Комунікаційні можливості. \_\_\_\_\_

5. Користувацький інтерфейс. \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1. Огляд мікроконтролерних застосувань в тренажерах \_\_\_\_\_

2. Архітектура та структурна організація системи \_\_\_\_\_

3. Проектування алгоритмів роботи системи \_\_\_\_\_

4. Розробка інтерфейсу взаємодії користувача \_\_\_\_\_

5. Інтеграція програмних модулів у єдину систему \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 13 слайдів \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

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

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд мікроконтролерних застосувань в тренажерах	10.06.25-13.06.25	
2	Архітектура та структурна організація системи	14.06.25-17.06.25	
3	Проектування алгоритмів роботи системи	18.06.25-21.06.25	
4	Розробка інтерфейсу взаємодії користувача	23.06.25-28.06.25	
5	Інтеграція програмних модулів у єдину систему	30.06.25-02.07.25	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.07.25-05.07.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	07.07.25-09.07.25	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	10.07.25-11.07.25	

Дата видачі завдання “ 09 ” червня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

ст. викл. Дмитро РОСІНСЬКИЙ \_\_\_\_\_

(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 80 с., 6 рис., 1 дод., 35 джерел.

АДАПТИВНЕ ТРЕНУВАННЯ, ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОНІТОРИНГ, СЕНСОРНА СИСТЕМА, ТРЕНАЖЕР, ФІЗІОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ESP32, FREERTOS, IOT.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка багатофункціонального тренажера на базі мікроконтролера, здатного здійснювати комплексний моніторинг параметрів тренувального процесу та адаптуватися до індивідуальних потреб користувача.

У процесі дослідження проведено аналіз сучасних мікроконтролерних платформ і сенсорних систем, спроєктовано апаратну й програмну архітектуру тренажера, реалізовано систему збору, обробки та візуалізації даних фізичної активності. У роботі використано мікроконтролер ESP32, FreeRTOS, сенсори навантаження, руху та фізіологічних параметрів. Результати можуть бути використані в реабілітаційних, спортивних та навчальних системах.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis: 80 pages, 6 figures, 1 appendices, 35 sources.

ADAPTIVE TRAINING, ESP32, FREERTOS, IOT, MICROCONTROLLER, MONITORING, PHYSIOLOGICAL PARAMETERS, SENSOR SYSTEM, TRAINER, USER INTERFACE.

The objective of this qualification work is to design a multifunctional exercise machine based on a microcontroller, capable of performing comprehensive monitoring of training parameters and adapting to individual user needs. The research involved analyzing modern microcontroller platforms and sensor systems, designing the hardware and software architecture of the device, and implementing a data acquisition, processing, and visualization system for physical activity. The solution is based on the ESP32 microcontroller, FreeRTOS, and a set of sensors for force, motion, and physiological data. The developed system is applicable in rehabilitation, fitness, and educational environments.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ .....	12
1.1 Огляд мікроконтролерних застосувань в тренажерах.....	12
1.1.1 Основні типи мікроконтролерів для фітнес-застосунків .....	12
1.1.2 Застосування в розумних тренажерах.....	14
1.1.3 Програмне забезпечення та середовища розробки.....	15
1.2 Аналіз сенсорних пристроїв та датчиків для контролю параметрів тренувань.....	15
1.2.1 Датчики руху та положення .....	16
1.2.2 Датчики фізіологічних параметрів .....	17
1.2.3 Датчики навантаження та сили.....	18
1.2.4 Датчики температури.....	20
1.2.5 Оптичні та ультразвукові датчики .....	22
1.2.6 Інтеграція та обробка сигналів .....	23
1.3 Постановка завдання проєктування .....	24
2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТРЕНАЖЕРА .....	26
2.1 Загальна концепція.....	26
2.2 Архітектура та структурна організація системи .....	27
2.2.1 Багаторівнева архітектура системи .....	27
2.2.2 Інформаційні потоки та взаємодія підсистем .....	29
2.3 Вибір та обґрунтування ключових компонентів.....	30
2.3.1 Центральний контролер системи.....	30
2.3.2 Система створення навантаження .....	31
2.3.3 Сенсорна підсистема.....	32
2.3.4 Інтерфейс користувача .....	33
2.4 Електричні схеми та силові компоненти .....	34

2.4.1 Система електроживлення .....	34
2.4.2 Силові драйвери виконавчих механізмів.....	36
2.4.3 Аналогова обробка сигналів датчиків.....	37
<b>3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРЕНАЖЕРА .....</b>	<b>39</b>
3.1 Вибір середовища програмування та програмних інструментів .....	39
3.1.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення .....	39
3.1.2 Вибір операційної системи реального часу.....	40
3.1.3 Інтегроване середовище розробки .....	41
3.1.4 Бібліотеки та фреймворки .....	42
3.1.5 Архітектура програмного забезпечення .....	43
3.2 Проектування алгоритмів роботи системи.....	44
3.2.1 Алгоритм основного циклу управління.....	44
3.2.2 Алгоритм регулювання навантаження .....	45
3.2.3 Алгоритм розпізнавання типу вправи.....	46
3.2.4 Алгоритм контролю безпеки .....	48
3.2.5 Алгоритм оптимізації тренувального процесу .....	49
3.3 Розробка інтерфейсу взаємодії користувача .....	52
3.3.1 Архітектура графічного інтерфейсу.....	52
3.3.2 Структура екранів та навігація .....	53
3.3.3 Система відображення даних у реальному часі.....	54
3.3.4 Обробка сенсорного вводу .....	55
3.3.5 Система звукової індикації .....	56
3.4 Інтеграція програмних модулів у єдину систему .....	57
3.4.1 Архітектура міжмодульної взаємодії.....	57
3.4.2 Система конфігурації та налаштувань .....	58
3.4.3 Система тестування та верифікації .....	59
3.4.4 Система діагностики та моніторингу.....	60
3.4.5 Система оновлення програмного забезпечення.....	61
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>63</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....</b>	<b>65</b>

ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	69
ДОДАТОК Б Алгоритм основного циклу управління .....	77
ДОДАТОК В Електричні схеми апаратної частини тренажера .....	78

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ОСРЧ – операційна ситсема реального часу

ADC – аналого-цифровий перетворювач (англ., Analog-to-Digital Converter)

BLE – енергоощадна передача даних через Bluetooth (англ., Bluetooth Low Energy)

ESP32 – мікроконтролерна платформа компанії Espressif Systems

FreeRTOS – операційна система реального часу з відкритим кодом

GUI – графічний інтерфейс користувача (англ., Graphical User Interface)

I<sup>2</sup>C – послідовний інтерфейс міжкомпонентної взаємодії (англ., Inter-Integrated Circuit)

IDE – інтегроване середовище розробки (англ., Integrated Development Environment)

IMU – інерційний вимірювальний блок (англ., Inertial Measurement Unit)

IoT – Інтернет речей (англ., Internet of Things)

RTOS – операційна система реального часу (англ., Real-Time Operating System)

SPI – послідовний периферійний інтерфейс (англ., Serial Peripheral Interface)

## ВСТУП

Сучасний світ характеризується стрімким розвитком технологій, які проникають у всі сфери людської діяльності, включаючи фізичну культуру та спорт. Дедалі більшої актуальності набуває розробка інтелектуальних систем для моніторингу та контролю фізичної активності, що дозволяє підвищити ефективність тренувального процесу та забезпечити персоналізований підхід до фізичного розвитку людини [1, 2].

Аналіз тенденцій у галузі фітнес-технологій свідчить про зростаючу популярність розумного спортивного обладнання. IoT-enabled обладнання часто включає інтерактивні екрани з керованими вправами та демонстраціями, що дозволяє користувачам приєднуватися до групових занять або слідувати за віртуальними тренерами. Попит на домашні тренування значно зріс в останні роки, що призвело до підйому розумного домашнього тренувального обладнання, яке пропонує інтерактивні функції, підключення до мереж та можливість тренувань на вимогу.

Традиційні тренажери, незважаючи на свою функціональність, мають обмежені можливості щодо адаптації до індивідуальних потреб користувачів та не забезпечують детального моніторингу тренувального процесу [2]. Це створює необхідність у розробці нових технічних рішень, які б поєднували переваги класичних тренажерів з можливостями сучасних інформаційних технологій.

Використання мікроконтролерів у конструкції тренажерів дозволяє реалізувати широкий спектр функцій, включаючи вимірювання біометричних параметрів, контроль навантаження, збереження статистики тренувань та забезпечення зворотного зв'язку з користувачем. Такий підхід відкриває перспективи для створення персоналізованих тренувальних програм, які автоматично адаптуються до фізичного стану та цілей конкретного користувача.

Мета роботи полягає у розробці та дослідженні багатофункціонального тренажера на базі мікроконтролера, який забезпечить комплексний контроль параметрів тренувального процесу та надасть користувачам можливість ефективного моніторингу їх фізичної активності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: провести аналіз існуючих технічних рішень у галузі спортивного обладнання з мікроконтролерним управлінням; розробити архітектуру системи багатофункціонального тренажера; здійснити вибір та обґрунтування апаратної платформи; розробити програмне забезпечення для управління тренажером та обробки даних.

Новизна роботи полягає в розробці комплексного підходу до створення багатофункціонального тренажера, який інтегрує сучасні мікроконтролерні технології з методами моніторингу фізичної активності та забезпечує персоналізований підхід до тренувального процесу.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання розробленого тренажера в спортивно-оздоровчих закладах, домашніх умовах та реабілітаційних центрах для підвищення ефективності фізичних тренувань та контролю стану здоров'я користувачів.

Результати роботи можуть бути впроваджені у виробництво спортивного обладнання, використані в освітньому процесі при підготовці фахівців з біомедичної інженерії та спортивних технологій, а також стати основою для подальших досліджень у галузі розумних фітнес-систем.

## 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

### 1.1 Огляд мікроконтролерних застосувань в тренажерах

Сучасні тренажерні системи являють собою складні технічні комплекси, призначені для розвитку фізичних якостей людини, реабілітації та підтримання здоров'я [3–6]. Інтеграція мікроконтролерних технологій у фітнес-обладнання є ключовим фактором розвитку розумних тренажерних систем. Мікроконтролери забезпечують можливість створення інтелектуальних пристроїв, здатних збирати, обробляти та передавати дані про тренувальний процес у реальному часі. Сучасні тенденції показують стрімкий розвиток IoT-технологій у сфері фітнесу, що відкриває нові перспективи для створення персоналізованих тренувальних систем.

#### 1.1.1 Основні типи мікроконтролерів для фітнес-застосунків

Arduino залишається однією з найпопулярніших платформ для розробки IoT-пристроїв завдяки низькому порогу входження і широкій підтримці спільноти [7]. Платформа Arduino зробила важливий внесок у Open Source Hardware-спільноту і дозволила примкнути до неї величезному числу радіоаматорів [8]. Хоча Arduino та має очевидні обмеження порівняно з професійним середовищем розробки, Arduino IDE покриває 90% з того, що потрібно досягти для аматорських проєктів [8].

Для проєктів тренажерів Arduino може використовуватися як базова платформа для збору даних з датчиків та управління простими актуаторами. Основними перевагами Arduino є простота програмування та широка бібліотека готових рішень.

ESP32 являє собою сімейство недорогих, енергоефективних мікроконтролерів, що інтегрують можливості Wi-Fi та Bluetooth [9]. ESP32 є

системою на чіпі з інтегрованим дворежимним Wi-Fi і Bluetooth [10]. Мікроконтролер ESP32, розроблений компанією Espressif Systems, представляє собою чудову еволюцію від відомого ESP8266 SoC, доповнений можливостями як Wi-Fi, так і Bluetooth [11].

ESP32 знаходить своє місце як автономний пристрій та допоміжний модуль для основних мікроконтролерів, розширюючи можливості Wi-Fi та Bluetooth через інтерфейси, такі як SPI, SDIO або I2C/UART [11]. Ця універсальність ефективно застосовується в розумних технологіях, від домашньої автоматизації до складних IoT-систем [11].

STMicroelectronics (ST) є одним з найпопулярніших і добре відомих виробників мікроконтролерів [12]. Лінійка мікроконтролерів STM32 базується на процесорних ядрах ARM Cortex. ST надає багато попередньо написаних драйверів, а також апаратний рівень абстракції (HAL) для своїх частин [12].

Мікроконтролери STM32 утворюють різні сімейства мікроконтролерів: від простих STM32F0, які можуть бути корисними для простої «клейової логіки», до дуже потужних STM32H7, які можуть виконувати алгоритми цифрової обробки сигналів у реальному часі [12].

Порівняно новим мікроконтролером є RP2040 від Raspberry Pi [12]. Цей мікроконтролер має двоядерний процесор ARM Cortex-M0+, численні периферійні пристрої, а також секцію Programmable I/O. Основними перевагами RP2040 є низька ціна (менше 1 долара США в невеликих кількостях), гнучкість та доступність [12].

Порівняння показує відмінності в можливостях процесора серед RP2040, ATMEGA328, ESP32 та STM32 [13]. ATmega328P, 8-бітний одноядерний процесор, що використовується в Arduino Uno Rev3, працює на частоті 16 МГц і включає 2 кБ SRAM та 28 кБ флеш-пам'яті. На противагу йому, RP2040 у Raspberry Pi Pico має більш розвинений 32-бітний процесор ARM Cortex-M0+, який може працювати на конфігурованих швидкостях до 133 МГц. ESP32 може похвалитися 32-бітним процесором XTENSA, який

працює між 80 МГц та 240 МГц і має 520 кілобайт оперативної пам'яті. Подібно, STM32 використовує 32-бітні процесори ARM Cortex M3/M4 зі швидкістю до 72 МГц і включає 20 кілобайт оперативної пам'яті [13].

### 1.1.2 Застосування в розумних тренажерах

Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) у фітнес-обладнання позначає трансформаційну еру в індустрії фізичних вправ, революціонізуючи те, як люди взаємодіють зі своїми тренувальними режимами [14]. Ця технологічна революція включає складні сенсорні мережі, системи прогнозованого обслуговування та можливості моніторингу продуктивності в реальному часі, які покращують як користувацький досвід, так і операції об'єктів [14].

Розумне спортивне обладнання тепер включає розширений біомеханічний аналіз, автоматизовані протоколи безпеки та персоналізовані функції оцінки ризику, що дозволяє точно відстеження рухів та запобігання травмам [14]. Прикладом є система IoT спортивного обладнання [15], в якій пропонується набір з 12 різних машин зі спеціальними датчиками, блоком обробки даних з підтримкою штучного інтелекту, мобільними додатками для тренерів і клієнтів та іншими компонентами. Така система представляє інноваційний підхід до персональних тренувань.

Цікавим прикладом є мікроконтролер Arduino Yun з Bluetooth-модулем у поєднанні з датчиком тиску та триосьовим акселерометром [16]. Апаратне забезпечення було поміщено в 3D-друкований корпус, додано RGB світлодіод і кнопку запуску для цілей тестування.

Основною функцією Smart Weight Pin від компанії Smart Health Clubs є збір даних з селективних і пластинчастих обладнань та їх відправка в хмару для зберігання [17]. В основному ідея полягає у відстеженні активності відвідувачів спортзалу на більшості обладнання для підйому ваги – сама вага, кількість повторень, темп тощо.

Сучасні велотренажери обладнані 2 датчиками для збору даних. Ці дані потрапляють на дисплеї користувачів і показують їм вимірювання (оберти за хвилину, темп, опір тощо) [17].

### 1.1.3 Програмне забезпечення та середовища розробки

Arduino IDE є інтегрованим середовищем розробки з відкритим вихідним кодом, яке підтримує програмування на C++. Воно відоме своїм зручним інтерфейсом, що робить його легко доступним навіть для новачків у програмуванні [10]. Розробники можуть скористатися офіційними ресурсами Arduino та безліччю існуючих бібліотек і прикладів коду, наданих різними сторонніми учасниками, щоб швидко розпочати роботу.

PlatformIO – це екосистема для розробки вбудованих пристроїв, що підтримує безліч платформ, включаючи Arduino та ESP32 [8]. В якості IDE використовується Visual Studio Code або Atom. Установка та налаштування досить прості – після встановлення редактора коду слід вибрати PlatformIO зі списку плагінів і встановити [8].

Мікроконтролери STM32 можна налагоджувати та програмувати, використовуючи, наприклад, безкоштовне середовище розробки STM32CubeIDE від ST [12]. Їх STM32 лінійка мікроконтролерів базується на процесорних ядрах ARM Cortex. Крім того, ST надає багато попередньо написаних драйверів, а також апаратний рівень абстракції (HAL) для своїх частин, які інтегровані в STM32CubeIDE.

## 1.2 Аналіз сенсорних пристроїв та датчиків для контролю параметрів тренувань

Сучасні тренажери потребують широкого спектру сенсорних пристроїв для забезпечення точного контролю та моніторингу параметрів тренувального процесу. Вибір відповідних датчиків є критично важливим

для створення ефективної системи збору та обробки даних про фізичну активність користувача.

### 1.2.1 Датчики руху та положення

Акселерометри стали фундаментальною основою сучасних фітнес-пристроїв. Практично в будь-якому фітнес-трекері є акселерометр [20]. Цей модуль може використовуватися для виконання різних завдань, але основна функція акселерометра полягає у підрахунку кількості зроблених кроків [20]. Принцип роботи акселерометра базується на вимірюванні прискорення об'єкта відносно вільного падіння, що дозволяє визначати рух та орієнтацію пристрою в просторі.

Акселерометр також надає гаджету інформацію про положення в просторі та швидкість пересування [20]. Таким чином, трекер або годинник «розуміють», в якому положенні зараз знаходяться, «знаючи» про те, рухається власник чи ні. Ця функціональність особливо важлива для тренажерів, оскільки дозволяє визначати характер виконуваних вправ, контролювати правильність техніки та аналізувати інтенсивність тренування.

Не всі акселерометри мають однакові характеристики та функціональні можливості – існують як аналогові, так і цифрові моделі, з різним рівнем чутливості [20]. Одним із поширених рішень є модуль MPU-6050 GY-521, який об'єднує в собі тривісний акселерометр та тривісний гіроскоп і забезпечує взаємодію з мікроконтролером за допомогою інтерфейсу I2C [21]. Завдяки своїм компактним розмірам і малій вазі, цей модуль є ефективним інструментом для визначення положення об'єкта в просторі. У контексті застосування в тренажерному обладнанні особливу цінність мають акселерометри з високою чутливістю, здатні точно фіксувати навіть незначні переміщення чи вібрації, що є критичним для забезпечення точного моніторингу фізичної активності.

Гіроскопи широко застосовуються у поєднанні з акселерометрами для

підвищення точності визначення орієнтації та руху пристроїв. У сучасних фітнес-браслетах апаратна конфігурація зазвичай включає акселерометр, гіроскоп, вібромотор, крокомір, пульсометр та інші сенсори [22]. Комбіноване використання акселерометра й гіроскопа дає змогу реалізувати широкий спектр функцій – від моніторингу сну та підрахунку спалених калорій до визначення типу фізичної активності та обчислення пройденої дистанції [22].

Інтеграція цих сенсорів у єдину систему формує інерційний вимірювальний блок (IMU), який забезпечує високоточний аналіз динаміки руху. Такий підхід є особливо актуальним для фітнес-обладнання, де необхідно детально відстежувати складні моторні патерни, аналізувати техніку виконання вправ, а також надавати користувачеві зворотний зв'язок щодо правильності та ефективності виконання рухів.

### 1.2.2 Датчики фізіологічних параметрів

Моніторинг частоти серцевих скорочень (ЧСС) є одним із ключових елементів ефективного контролю за тренувальним процесом. Сучасні пульсометри використовують різноманітні технології для забезпечення точного вимірювання серцевого ритму. Зокрема, оптичні датчики функціонують на основі методу фотоплетизмографії – технології, яка фіксує зміни кровотоку в шкірі шляхом аналізу відбиття світла, що випромінюється світлодіодами та реєструється фотодіодами.

Фітнес-пристрої нового покоління оснащуються широким спектром сенсорів, серед яких GPS, акселерометр, тонометр, вібромотор, гіроскоп, компас, пульсометр і крокомір [22]. Це дозволяє здійснювати всебічний моніторинг показників фізичної активності: розрахунок кількості спалених калорій, вимірювання пройденої відстані, аналіз інтенсивності та типу навантаження. Водночас пульсометри не є сертифікованими медичними засобами, тому отримані дані слід трактувати виключно як орієнтовну

інформацію [23].

Для професійного використання, зокрема у тренажерних системах, перевага надається нагрудним пульсометрам, які демонструють вищу точність вимірювання порівняно з оптичними сенсорами, що носяться на зап'ясті. Наприклад, датчики серцевого ритму компанії Garmin інтегрують у свою конструкцію акселерометр, який дозволяє фіксувати такі параметри, як прискорення, максимальна, мінімальна та середня швидкість [24]. Крім того, пристрій забезпечує детальний аналіз бігових характеристик, включаючи час контакту стопи з поверхнею, висоту підскоку та інші ключові біомеханічні показники.

Сучасні фітнес-пристрої дедалі частіше оснащуються пульсоксиметрами – сенсорами, що здійснюють вимірювання рівня насичення крові киснем ( $SpO_2$ ). У поєднанні з іншими компонентами, такими як акселерометр, вібромотор, вбудований мікрофон, пульсометр і крокомір, ці сенсори дозволяють реалізувати повноцінний моніторинг фізичної активності, включно з оцінкою витрати калорій, відстеженням сну та пройденої відстані [22].

Використання пульсоксиметрії є особливо важливим для контролю інтенсивності фізичних навантажень, оцінки відновлення організму після тренувань, а також виявлення можливих ознак гіпоксії. Принцип дії цих сенсорів ґрунтується на фотометричному методі: два світлодіоди випромінюють світло з різними довжинами хвиль, яке проходить через тканини. Поглинання світла залежить від ступеня насичення гемоглобіну киснем, що дозволяє розрахувати відсоткове співвідношення оксигенованої та деоксигенованої крові.

### 1.2.3 Датчики навантаження та сили

Тензометричні сенсори є ключовим елементом у системах вимірювання механічного навантаження на елементи тренажерного обладнання.

Тензодатчик являє собою електричний резистивний елемент, опір якого змінюється під впливом механічної деформації [25]. Конструктивно це тонка підкладка, на яку нанесено металеву решітку з фольги або дроту. Коли на елемент прикладається сила, решітка деформується, що викликає зміну електричного опору. Різниця між початковим і деформованим станами дозволяє обчислити величину прикладеного зусилля.

З технічної точки зору, тензометричні сенсори виконують функцію перетворення механічної сили на електричний сигнал [26]. Найпоширенішим є застосування тензодатчиків у системах вимірювання маси великих об'єктів, зокрема в конструкції тензометричних ваг, де використовуються тензорезистори – елементи, що чутливо реагують на тиск шляхом зміни свого опору [26].

Датчики сили, побудовані на основі тензометричної технології, здатні точно вимірювати як статичні, так і квазістатичні сили розтягування та стиснення [27]. Зміна електричного опору відбувається навіть при незначних деформаціях у поздовжньому напрямку, що забезпечує високу точність та стабільність вимірювання. Для підвищення надійності і точності сигналу зазвичай використовується мостикова схема Уїтстона, яка дозволяє компенсувати зовнішні впливи та мінімізувати похибки [27].

Базова конструкція тензометричного датчика сили передбачає наявність вимірювального елемента (пружного тіла), зазвичай виготовленого з металу з високою пружністю. До його поверхні приклеюються чотири тензорезистивні елементи, які формують вимірювальну схему. Два з них розміщуються паралельно напрямку прикладеної сили для фіксації подовження або стиснення матеріалу, тоді як ще два розташовуються поперек вектора сили, забезпечуючи фіксацію супутніх змін геометрії тіла, таких як звуження чи потовщення [27]. Така конфігурація дає змогу точно виявляти навіть незначні механічні деформації.

Серед різновидів тензометричних сенсорів, що використовуються у ваговимірювальних системах, вирізняються такі:

- мембранні тензометричні датчики – характеризуються малою товщиною та високою стійкістю до поперечних навантажень, що робить їх придатними для компактних систем вимірювання маси та сили [26];

- консольні тензометричні датчики – є найбільш універсальними і здатні працювати незалежно від змін лінії дії сили. Завдяки своїй гнучкості встановлюються в найрізноманітніших конструкціях – від лабораторних до промислових ваг [26];

- колонні тензометричні датчики – призначені для вимірювання великих навантажень. Їх застосовують у таких системах, як бункерні, автомобільні та вагонні ваги, де потрібна висока міцність і стабільність вимірювань при тривалому впливі значних сил [26].

#### 1.2.4 Датчики температури

Контроль температури є важливою складовою як забезпечення комфортних умов для користувача, так і моніторингу теплового стану обладнання, зокрема в розумних тренажерах з електронним та механічним навантаженням. Перегрів електронних компонентів може призвести до зниження точності вимірювань, прискореного зносу або виходу з ладу системи, тому надійне температурне спостереження є критично важливим.

Одним з найбільш поширених сенсорів температури є терморезистор (термістор) — напівпровідниковий резистивний елемент, активний опір якого змінюється залежно від температури [28]. Ці елементи випускаються у різних форм-факторах: стрижні, трубки, диски, шайби, намистинки, а їх розміри можуть коливатися від кількох мікрометрів до кількох сантиметрів.

Залежно від температурної характеристики розрізняють два основні типи терморезисторів:

- з негативним температурним коефіцієнтом опору (NTC) – опір зменшується зі зростанням температури. Такі датчики зазвичай виготовляють із сумішей полікристалічних оксидів перехідних металів, легованих

германієм, кремнієм та іншими напівпровідниковими матеріалами [28]. Найбільш поширеними є середньотемпературні моделі з температурним коефіцієнтом у межах  $-2,4 \dots -8,4$  %/К та номінальним опором від 1 до  $10^6$  Ом;

- з позитивним температурним коефіцієнтом опору (РТС) – опір зростає із підвищенням температури. Такі сенсори використовуються переважно для захисту схем від перегріву та в ланцюгах саморегульованого нагрівання.

У системах контролю температури також застосовується широкий спектр інших сенсорів і приладів, серед яких:

термопари (у тому числі для генерації та поглинання тепла за ефектом Пельтьє) [30];

- інфрачервоні сенсори;
- біметалеві термометри;
- резистивні температурні детектори (RTD);
- пірометри, тепловізори, електронні термометри тощо [29].

Залежно від призначення тренажера (силові вправи, кардіо або реабілітаційні комплекси), обирається відповідний тип сенсора для контролю температури корпусу, двигуна, електроніки або поверхонь дотику користувача.

У сучасних тренажерних системах температурні сенсори відіграють важливу роль у моніторингу теплового стану критично важливих компонентів, зокрема електродвигунів, електронних модулів, блоків живлення тощо. Своєчасне виявлення перегріву дає змогу запобігти пошкодженню обладнання, забезпечити стабільну роботу системи й подовжити термін її експлуатації.

Крім технічного моніторингу, температурні датчики також використовуються для контролю фізіологічних параметрів користувача. Деякі фітнес-пристрої, зокрема розумні браслети та спортивні трекери, оснащуються вбудованими термометрами, які дозволяють відстежувати температуру тіла в режимі реального часу [22]. Така функція є особливо

актуальною під час інтенсивних тренувань, коли підвищення температури може свідчити про теплове перевантаження, зневоднення або ризик перегріву організму.

Враховання температурного стану користувача в поєднанні з іншими біометричними показниками (серцевий ритм, насичення крові киснем тощо) дозволяє створювати інтелектуальні системи адаптивного тренування, які автоматично регулюють інтенсивність навантаження відповідно до фізіологічного стану спортсмена.

### 1.2.5 Оптичні та ультразвукові датчики

У сучасних тренажерах дедалі ширше застосовуються оптичні датчики відстані, які забезпечують точний контроль положення користувача, відстеження амплітуди рухів та моніторинг правильності виконання вправ. Принцип їхньої дії ґрунтується на аналізі часу проходження світлового імпульсу до об'єкта та назад (ToF – Time of Flight), або на оцінці інтенсивності та кута відбитого світла, що дозволяє з високою точністю визначати положення тіла в просторі.

Поряд з оптичними сенсорами активно використовуються ультразвукові датчики, які забезпечують вимірювання відстані до об'єктів та виявлення перешкод у зоні тренування. Вони є особливо ефективними в пристроях, де необхідно контролювати амплітуду рухів користувача або відстань між тілом і обладнанням, зокрема у функціональних тренажерах або системах реабілітації.

Окрему категорію становлять датчики присутності, що інтегруються у тренажерне обладнання з метою автоматичного керування живленням (увімкнення/вимкнення при наближенні чи віддаленні користувача), а також забезпечення безпеки. Розміщення таких сенсорів на кожному тренажері дає змогу відслідковувати його використання в реальному часі [31]. Це відкриває додаткові можливості для адміністраторів і власників спортивних закладів:

на основі статистики використання можна визначити найбільш популярне обладнання та ухвалювати рішення щодо інвестування у модернізацію чи оновлення тренажерного парку.

### 1.2.6 Інтеграція та обробка сигналів

Для забезпечення ефективної взаємодії з численними сенсорами, що використовуються в сучасних тренажерах, необхідна наявність високоякісних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Саме вони відповідають за перетворення аналогових сигналів, які надходять від датчиків (температури, сили, тиску, руху тощо), у цифровий формат, придатний для подальшої обробки мікроконтролером.

У фітнес-пристроях, таких як треки, смарт-годинники або тренажерні контролери, може бути інтегровано велику кількість сенсорних елементів. Проте без належного аналізу зібраних даних така інформація не має прикладної цінності [20]. Тому важливу роль відіграє програмне забезпечення, яке забезпечує обробку, фільтрацію, зберігання та візуалізацію результатів вимірювань.

У складі сучасних тренажерів використовуються складні алгоритми цифрової обробки сигналів, які дозволяють:

- фільтрувати високочастотні шуми;
- компенсувати похибки вимірювань;
- інтегрувати дані з кількох джерел (сенсорне злиття);
- формувати цілісну аналітичну модель тренувального процесу.

Особливе значення мають алгоритми машинного навчання, що забезпечують:

- адаптацію системи до індивідуальних характеристик користувача;
- розпізнавання патернів рухів (наприклад, техніки виконання вправ);
- формування персоналізованих тренувальних рекомендацій у режимі реального часу.

Отже, вибір, точне калібрування та правильна інтеграція сенсорних пристроїв є критично важливими для створення ефективної багатофункціональної тренажерної системи. Комбінування різних типів сенсорів (механічних, оптичних, термічних, біометричних тощо) дозволяє отримати багатовимірне представлення фізичної активності користувача та забезпечити високий рівень функціональності й адаптивності системи.

### 1.3 Постановка завдання проєктування

Ураховуючи виявлені проблеми, було сформульовано завдання розробки багатофункціонального тренажера нового покоління на основі мікроконтролерної архітектури. Такий пристрій має поєднувати високу точність сенсорних вимірювань, адаптивність до користувача, уніфіковану платформу для інтеграції даних та підвищену надійність у реальних умовах експлуатації.

Постановка даного завдання передбачає системний підхід до проєктування тренажера – від вибору оптимальної мікроконтролерної платформи та сенсорної бази до розробки алгоритмів збору, фільтрації та інтерпретації даних.

На основі сформульованого завдання, розроблюваний тренажер має забезпечувати виконання п'яти ключових функціональних підсистем, кожна з яких охоплює окремі аспекти взаємодії з користувачем, збору та обробки даних.

1. Моніторинг фізичних параметрів. Система повинна забезпечувати високоточний збір даних про фізичні характеристики тренувального процесу.

2. Фізіологічний моніторинг. Інтегровані сенсори мають забезпечити безперервне відстеження фізіологічних показників користувача.

3. Адаптивне управління. Тренажер повинен володіти інтелектуальними можливостями для адаптації тренувального процесу відповідно до стану користувача.

4. Комунікаційні можливості. Тренажер має бути відкритою платформою для обміну даними та зовнішньої інтеграції.

5. Користувацький інтерфейс. Інтерфейс системи має бути зручним, інтуїтивним та мультисенсорним.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТРЕНАЖЕРА

### 2.1 Загальна концепція

Проєктування багатофункціонального тренажера з інтелектуальною системою керування навантаженням ґрунтується на результатах аналітичного дослідження, проведеного у першому розділі. Сформульовані функціональні та технічні вимоги визначають архітектуру майбутньої системи, яка має забезпечувати комплексний, адаптивний і безпечний тренувальний процес з використанням сучасних технологій автоматизації, сенсорного моніторингу та машинного навчання.

Ключовим функціональним елементом тренажера виступає система створення регульованого навантаження, яка забезпечує робочий діапазон від 1 до 200 кг із точністю не гірше  $\pm 0,5$  кг. Такий рівень точності досягається за рахунок використання високоточних тензометричних датчиків, підключених до системи цифрової обробки сигналів, що дозволяє компенсувати вплив температури, вібрацій та інших зовнішніх факторів.

Виконання базових силових вправ (таких як жим лежачи, тяга до грудей, присідання) реалізується через універсальну механічну конструкцію з можливістю програмування траєкторій руху. Автоматичне регулювання навантаження в реальному часі здійснюється за допомогою швидкодіючого мікроконтролера, який обробляє дані з сенсорів і адаптує параметри тренування відповідно до поточного фізіологічного стану користувача.

Система моніторингу забезпечує вимірювання основних параметрів тренування, включаючи:

- кількість повторень;
- швидкість виконання вправи;
- потужність навантаження.

Ці дані збираються комплексом сенсорів (тензометричні, інерційні,

пульсометри тощо) та обробляються алгоритмами фільтрації й статистичного аналізу, що дозволяє оцінити ефективність тренувального процесу в динаміці.

Система підтримує індивідуальні профілі користувачів та зберігає історію тренувань у енергонезалежній пам'яті, з можливістю експорту даних на зовнішні носії або у хмарні сервіси.

Особливу інноваційність системи становить реалізація програмованих режимів тренування з адаптацією до рівня фізичної підготовки користувача. На основі алгоритмів машинного навчання здійснюється аналіз історичних даних, виявлення трендів та автоматична корекція навантаження, що дозволяє оптимізувати результативність занять.

Безпека експлуатації забезпечується за рахунок багаторівневої системи контролю критичних параметрів, яка має час реакції менше 50 мс та здатна негайно припинити виконання вправи у разі виявлення перевантаження, порушення техніки або відхилень у фізіологічних показниках.

Електричні параметри системи розраховані на використання стандартної мережі змінного струму напругою 220 В частотою 50 Гц. Максимальна споживана потужність 3 кВт забезпечує роботу всіх підсистем при повному навантаженні. Клас електробезпеки IP21 гарантує захист від твердих частинок розміром більше 12 мм та вертикальних крапель води. Час безперервної роботи 8 годин відповідає типовому режиму експлуатації в комерційних фітнес-центрах.

## 2.2 Архітектура та структурна організація системи

### 2.2.1 Багаторівнева архітектура системи

Апаратна частина тренажера (рисунок 2.1) організована за принципом багаторівневої архітектури, що забезпечує ефективну взаємодію між компонентами та можливість масштабування функціональності.

Центральний рівень управління координує роботу всіх підсистем через стандартизовані інтерфейси та протоколи зв'язку.

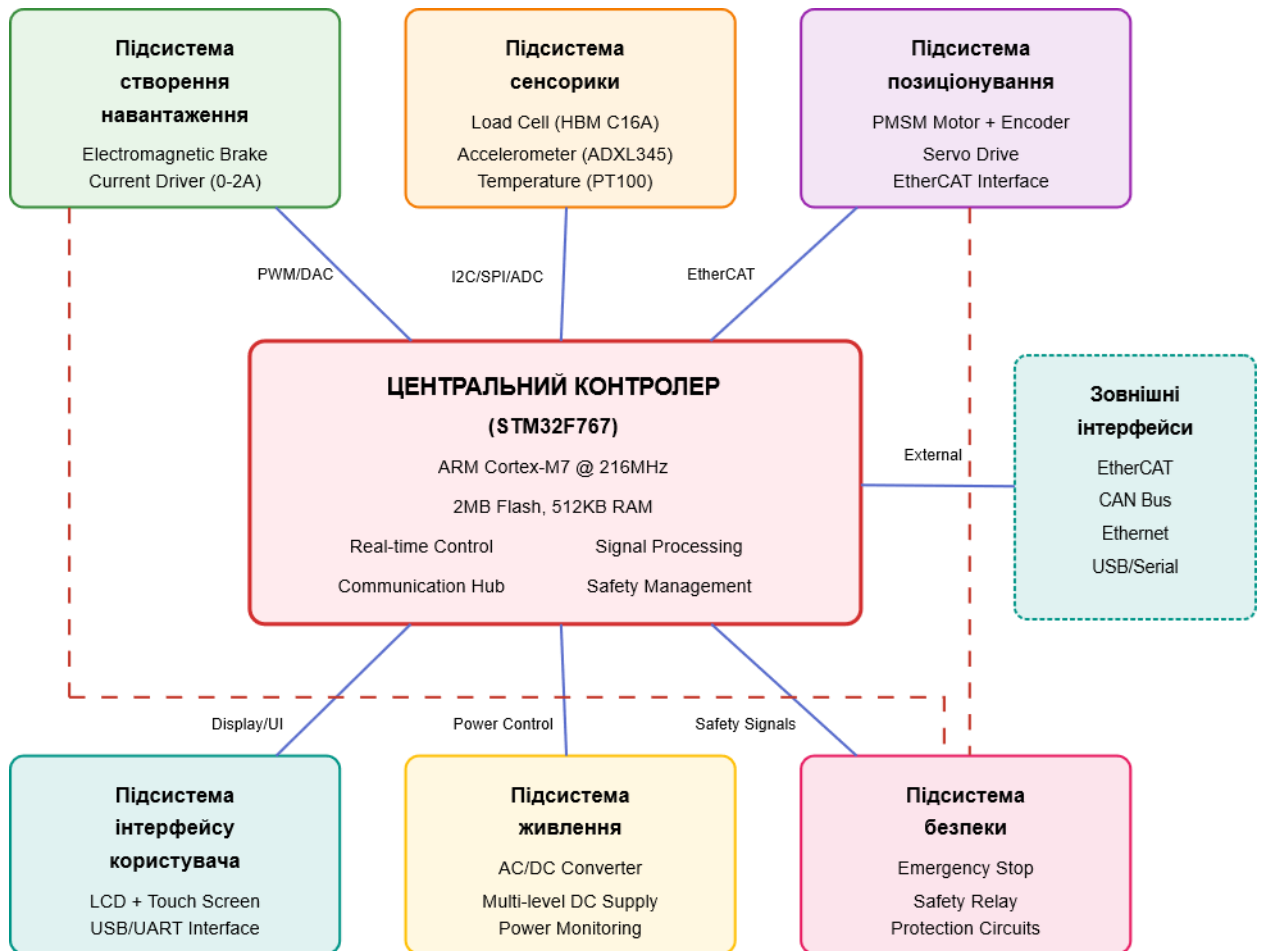


Рисунок 2.1 – Апаратна частина тренажера

Підсистема керування виконує функції центрального координатора, забезпечуючи синхронізацію роботи всіх компонентів системи. Вона реалізує основні алгоритми управління навантаженням, обробляє сигнали від датчиків та формує керуючі впливи для виконавчих механізмів. Архітектура підсистеми базується на принципах реального часу, що гарантує детермінований відгук на зміну параметрів тренування.

Підсистема створення навантаження генерує регульований опір через комбінацію електромагнітних гальм та механічних передач. Використання електромагнітних принципів дозволяє забезпечити плавне та точне регулювання навантаження без механічного зносу. Підсистема

позиціонування забезпечує точне переміщення робочих органів за заданими траєкторіями з використанням сервоприводів та високоточних датчиків зворотного зв'язку.

Підсистема сенсорики здійснює комплексний моніторинг параметрів тренування через мережу спеціалізованих датчиків. Вона включає тензOMETричні датчики для вимірювання сил, енкодери для контролю положення, акселерометри для аналізу динаміки рухів та інші сенсори для всебічного контролю процесу тренування.

Підсистема інтерфейсу користувача забезпечує зручну взаємодію між людиною та технічною системою через сенсорний дисплей, кнопки управління та аудіовізуальну сигналізацію. Підсистема живлення перетворює мережеву напругу в стабілізовані напруги для живлення різних компонентів системи. Підсистема безпеки забезпечує захист користувача через багаторівневу систему моніторингу критичних параметрів та аварійного відключення.

### 2.2.2 Інформаційні потоки та взаємодія підсистем

Організація інформаційних потоків між підсистемами базується на принципах ієрархічного управління з розподіленою обробкою даних. Центральний контролер на базі STM32F767 забезпечує координацію високого рівня, тоді як локальні контролери підсистем виконують специфічні функції обробки та управління.

Сигнали від датчиків надходять до центрального контролера через аналогові та цифрові інтерфейси з високою частотою дискретизації. Обробка включає цифрову фільтрацію, калібровку та перетворення у фізичні величини. Алгоритми управління аналізують отримані дані та формують керуючі сигнали для виконавчих механізмів.

Взаємодія з користувачем здійснюється через графічний інтерфейс сенсорного дисплея, що відображає поточні параметри тренування,

налаштування системи та історичні дані. Система підтримує збереження профілів користувачів з індивідуальними налаштуваннями та програмами тренувань.

## 2.3 Вибір та обґрунтування ключових компонентів

### 2.3.1 Центральний контролер системи

Для реалізації центрального контролера обрано мікроконтролер STM32F767VIT6, який належить до високопродуктивної серії STM32F7 компанії STMicroelectronics [36]. Такий вибір обґрунтований комплексом технічних характеристик, що оптимально відповідають вимогам розроблюваної системи.

Процесорне ядро ARM Cortex-M7 з тактовою частотою 216 МГц забезпечує високу обчислювальну потужність, необхідну для реалізації складних алгоритмів управління в режимі реального часу. Архітектура Cortex-M7 включає суперскалярну конвеєрну структуру, здатну виконувати дві інструкції за один такт, що суттєво підвищує продуктивність у порівнянні з попередніми поколіннями мікроконтролерів.

Обсяг флеш-пам'яті 2 МБ дозволяє розміщувати повнофункціональне програмне забезпечення, яке включає графічний інтерфейс користувача, алгоритми цифрової обробки сигналів та підсистему збереження і журналювання даних. Оперативна пам'ять обсягом 512 КБ (SRAM) забезпечує ефективну роботу з великими масивами даних та дозволяє реалізувати буферизацію сигналів від численних сенсорів.

Інтегровані периферійні модулі включають високоточні аналого-цифрові перетворювачі (ADC) з роздільною здатністю до 12 біт і частотою дискретизації до 5 МГц. Цифро-аналогові перетворювачі (DAC) забезпечують формування прецизійних керуючих сигналів, необхідних для керування зовнішніми виконавчими механізмами. Модулі широтно-

імпульсної модуляції (ШІМ) з програмованими параметрами частоти та коефіцієнта заповнення реалізують управління електромагнітними гальмами та сервоприводами.

Апаратна підтримка операцій з плаваючою точкою реалізується через вбудований математичний співпроцесор FPU, що суттєво прискорює виконання обчислень у задачах цифрової обробки сигналів та керування. Це має особливе значення для реалізації адаптивних ПД-регуляторів та алгоритмів прогнозування динаміки навантаження.

Енергоефективність системи досягається завдяки використанню механізмів динамічного управління частотою та напругою, що дозволяє оптимізувати споживання енергії відповідно до поточного рівня обчислювального навантаження. Такий підхід забезпечує стабільну роботу пристрою навіть при живленні від резервних джерел.

### 2.3.2 Система створення навантаження

Основу системи створення навантаження складають електромагнітні гальма Magtrol серії HB-140-2, які забезпечують високоточне та швидкодієне регулювання опору без механічного зносу [37]. Принцип їхньої роботи ґрунтується на індукції вихрових струмів у провідному диску при зміні магнітного поля, що створює момент опору, пропорційний величині керуючого струму.

Максимальний гальмівний момент – 140 Н·м при швидкості до 10 000 об/хв, що забезпечує широкий діапазон навантажень, придатний для реалізації вправ з різною інтенсивністю. Лінійна залежність моменту від керуючого сигналу в діапазонах 0–10 В або 4–20 мА спрощує побудову системи управління та реалізацію алгоритмів точного навантаження.

Час відгуку менше 10 мс дає змогу реалізовувати динамічне регулювання опору в реальному часі, синхронно з рухами користувача. Це критично важливо для формування реалістичних сенсорних відчуттів і

забезпечення безпеки при раптових змінних навантаженнях.

Сервоприводи Panasonic MSMA022A1A використовуються для високоточного позиціонування виконавчих механізмів тренажера [38]. Їх номінальна потужність становить 200 Вт, а номінальний момент – 0,64 Н·м, що є достатнім для переміщення робочих вузлів з урахуванням інерційних навантажень. Максимальна швидкість обертання – 3000 об/хв, що дозволяє реалізовувати динамічні переміщення в рамках широкого спектра тренувальних сценаріїв.

Вбудований 17-розрядний абсолютний енкодер забезпечує роздільну здатність позиціонування краще за  $0,003^\circ$ , що відповідає лінійній точності менше 0,02 мм при роботі у парі з кулько-гвинтовими передачами. Абсолютна природа енкодера дозволяє уникнути потреби у процедурі ініціалізації положення після ввімкнення системи, що покращує зручність та надійність експлуатації.

Передавальні механізми включають кулько-гвинтові пари, що виконують перетворення обертального руху в лінійний з високою точністю та енергоефективністю. Їх коефіцієнт корисної дії (ККД) становить 92%, що мінімізує втрати енергії та забезпечує ефективну роботу приводу. Для адаптації до вимог по моменту і швидкості застосовуються планетарні редуктори з передавальним числом 10:1, які дозволяють збільшити вихідний момент та знизити швидкість обертання, узгоджуючи її з характеристиками навантаження.

### 2.3.3 Сенсорна підсистема

Тензометричні датчики НВМ С16А забезпечують високоточне вимірювання зусиль у конструкції тренажера [39]. При номінальному навантаженні 2000 Н датчик має похибку не більше 0,02%, що відповідає максимальній абсолютній похибці 0,4 Н.

Конструкція датчика базується на тензорезисторах, з'єднаних за

схемою мостика Уїтстона, що забезпечує лінійну залежність вихідного сигналу від прикладеної сили. Завдяки температурній компенсації (через узгоджені тензорезистори), вплив температурних деформацій на результат вимірювання мінімізується. Ступінь захисту IP65 гарантує надійну роботу сенсора в умовах підвищеної вологості та запиленості, що є типовими для спортивного середовища.

Енкодери положення Heidenhain ERN 1387 забезпечують високоточний контроль кутового положення обертових елементів системи [40]. При роздільній здатності 2048 імпульсів на оберт та використанні квадратурного декодування досягається кутова точність  $0,044^\circ$  на відлік.

Максимальна швидкість обертання – 12 000 об/хв, що істотно перевищує робочі значення системи, створюючи запас надійності та точності. Диференційний інтерфейс TTL/RS422 забезпечує високу завадостійкість при передаванні сигналів на відстань до декількох десятків метрів, що є критично важливим у системах з рознесеними електронними модулями.

Акселерометри ADXL345 використовуються для моніторингу динамічних характеристик рухів користувача [41]. Датчик має діапазон вимірювання  $\pm 16$  g та роздільну здатність 13 біт, що забезпечує точність кращу за 0,008 g на відлік. Цифровий інтерфейс I<sup>2</sup>C/SPI дозволяє просту та гнучку інтеграцію з мікроконтролерною платформою.

Додаткові функції датчика включають детектування руху, вільного падіння та ударів, що дозволяє реалізовувати алгоритми безпеки, зокрема аварійне зупинення тренажера. Програмовані порогові значення та фільтри дають змогу адаптувати чутливість до конкретного сценарію застосування.

#### 2.3.4 Інтерфейс користувача

Сенсорний дисплей з діагоналлю 7 дюймів та роздільною здатністю 800×480 пікселів забезпечує зручне візуальне представлення інформації та інтерактивне керування системою [42]. Завдяки TFT-технології дисплей

відтворює яскраві кольори та забезпечує широкі кути огляду, що важливо для комфортного користування в різних положеннях.

Резистивна сенсорна панель підтримує керування як стилусом, так і дотиком пальця, при цьому точність позиціонування перевищує один піксель, що дозволяє реалізувати інтерфейс з високою деталізацією елементів керування.

RGB-інтерфейс дисплея забезпечує високу швидкість оновлення зображення без мерехтіння, що важливо для динамічного відображення параметрів тренування в реальному часі. Регульована LED-підсвітка автоматично адаптується до освітлення в приміщенні, покращуючи читаємість дисплея в різних умовах. Інтерфейс SPI, що використовується для передачі команд управління, дозволяє мінімізувати навантаження на основну шину даних мікроконтролера, підвищуючи стабільність системи.

Кнопки екстреної зупинки грибовидної форми червоного кольору реалізують миттєве апаратне відключення системи у випадках надзвичайних ситуацій. Використання нормально замкнутих (NC) контактів гарантує спрацювання навіть у разі обриву проводу чи механічного пошкодження кнопки, що відповідає вимогам функціональної безпеки. Ступінь захисту IP65 забезпечує надійну роботу кнопок у середовищі з підвищеною вологістю, що є типовим для тренажерних залів та фітнес-центрів.

## 2.4 Електричні схеми та силові компоненти

### 2.4.1 Система електроживлення

Первинний блок живлення реалізовано на основі імпульсного перетворювача з активною корекцією коефіцієнта потужності (PFC), що забезпечує ефективне споживання енергії та стабільність роботи під час змін мережевої напруги [43]. Вхідна напруга 220 В змінного струму перетворюється у стабілізовані вихідні канали живлення з наступними

параметрами:

- 24 В / 10 А – для силових виконавчих механізмів;
- 12 В / 3 А – для допоміжних підсистем;
- 5 В / 5 А – для цифрових логічних модулів;
- 3,3 В / 2 А – для живлення мікроконтролера та периферійних сенсорів.

Захист живлення реалізується за допомогою багаторівневої системи, яка включає:

- швидкодіючі запобіжники для обмеження струмів короткого замикання;
- варистори для придушення імпульсних перенапруг з боку мережі;
- електромагнітні фільтри для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та зниження рівня імпульсних завад.

ККД блоку живлення не нижче 85%, що мінімізує теплові втрати та знижує загальне енергоспоживання системи.

Система резервного живлення реалізована на базі герметичної свинцево-кислотної акумуляторної батареї з напругою 12 В та ємністю 7 А·год. Такий запас енергії забезпечує не менше 30 хвилин автономної роботи, що є достатнім для:

- безпечного завершення тренування,
- збереження критичних даних користувача,
- контрольованого завершення сеансу при відключенні електроживлення.

Автоматичне перемикання між основним та резервним джерелом живлення виконується за допомогою безконтактних реле на основі MOSFET-транзисторів, із часом перемикання менше 1 мс, що виключає порушення роботи системи та втрату даних у процесі переходу.

## 2.4.2 Силові драйвери виконавчих механізмів

Драйвер електромагнітного гальма призначений для перетворення цифрового керуючого сигналу, сформованого цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) мікроконтролера, у пропорційний струм навантаження [44]. Вхідний діапазон керуючої напруги від 0 до 10 В відповідає лінійній зміні вихідного струму в межах від 0 до 2 А, що забезпечує точне регулювання моменту опору.

Для гальванічного розділення між логічною та силовою частинами використано оптрони, які підвищують стійкість мікроконтролера до аварійних режимів у виконавчих колах.

Захист від перевантаження реалізований на основі датчиків струму з ефектом Холла, що мають швидкодію менше 1 мкс. При перевищенні номінального струму більше ніж на 20%, драйвер переходить у режим обмеження навантаження, плавно знижуючи керуючий сигнал до безпечного рівня.

Драйвери сервоприводів підтримують протокол EtherCAT, який забезпечує високошвидкісну синхронну комунікацію з центральним контролером [45]. Максимальний вихідний струм 15 А дозволяє підтримувати роботу електродвигунів у пікових режимах без втрати керованості.

Вбудований ПД-регулятор реалізує локальний контур управління положенням, працюючи з частотою оновлення 1 кГц, що забезпечує високу динаміку та стабільність регулювання.

Моніторинг параметрів електропривода охоплює:

- вимірювання фазних струмів;
- контроль температури обмоток;
- оцінку швидкості обертання;
- визначення абсолютного положення ротора.

Зібрана діагностична інформація передається до центрального

контролера для подальшого аналізу технічного стану сервоприводів та реалізації превентивного обслуговування.

### 2.4.3 Аналогова обробка сигналів датчиків

Підсилювач сигналів тензометричних датчиків реалізовано на базі спеціалізованої мікросхеми AD7192, яка інтегрує інструментальний підсилювач, програмований підсилювач та 24-розрядний  $\sigma$ - $\Delta$  АЦП [46]. Така архітектура забезпечує високу точність та стабільність вимірювань.

Вхідний діапазон  $\pm 2,5$  В дозволяє охопити повний динамічний діапазон аналогових сигналів, отриманих від тензодатчиків, підключених за мостовою схемою. Частота дискретизації 4,8 кГц є достатньою для точного відтворення динаміки силових навантажень під час виконання вправ.

Вбудований програмований підсилювач з коефіцієнтом підсилення від 1 до 128 дозволяє оптимізувати співвідношення сигнал/шум для тензометричних елементів з різною чутливістю та навантажувальною здатністю.

Цифрові фільтри нижніх частот, реалізовані у вигляді програмованого ФНЧ, ефективно придушують високочастотні шуми та вібраційні наводки від механічних конструкцій тренажера.

Синхронний демодулятор (детектор) періодично змінює полярність сигналу збудження мостика, що дозволяє компенсувати дрейф нуля та температурні похибки, властиві резистивним тензометричним елементам.

Обробка сигналів енкодерів виконується через приймачі диференційних сигналів AM26C32, які перетворюють сигнали стандарту RS422 у TTL-рівні для подальшої обробки [47]. Це дозволяє зберігати точність кодування навіть при значних довжинах з'єднувальних ліній.

Захист від перенапруги реалізований через швидкодіючі діоди Шоттки у поєднанні з обмежувальними резисторами, що запобігає пошкодженню входів контролера при сплесках напруги або імпульсних наводках.

Диференційні сигнальні лінії з характеристичним опором 120 Ом, виконані з екранованих кабелів, забезпечують стійкість до електромагнітних завад та мінімізують міжканальні перешкоди. Використання узгоджувальних опорів на кінцях ліній ефективно усуває відбиття сигналів, що особливо важливо при передачі даних на високих частотах.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРЕНАЖЕРА

### 3.1 Вибір середовища програмування та програмних інструментів

#### 3.1.1 Аналіз вимог до програмного забезпечення

Програмне забезпечення багатофункціонального тренажера має функціонувати в режимі реального часу з детермінованим часом реакції на критичні події. Основні вимоги включають обробку сигналів від численних датчиків з частотою дискретизації до 1 кГц, керування сервоприводами та електромагнітними гальмами з точністю позиціонування  $\pm 0,011$  мм, реалізацію адаптивних алгоритмів регулювання навантаження, а також забезпечення безпеки з часом відгуку менше 50 мс.

Складність алгоритмів обробки сигналів обумовлює необхідність ефективної реалізації операцій з плаваючою комою, оскільки цифрова фільтрація, ПД-регулювання, а також математичне моделювання процесів тренування становлять основу функціонування системи.

Графічний інтерфейс користувача, реалізований на базі 7-дюймового сенсорного дисплея, вимагає підтримки високорівневих графічних функцій, а також високої швидкості оновлення зображення для забезпечення комфортної взаємодії користувача з системою в реальному часі.

Модульна архітектура програмного забезпечення має забезпечити незалежну розробку, тестування та обслуговування окремих функціональних модулів, а також створити передумови для гнучкого розширення можливостей системи відповідно до змін вимог або умов експлуатації.

Підсистема діагностики та логування повинна надавати детальну інформацію про стан кожної підсистеми тренажера, підтримуючи аналіз роботи в реальному часі та післяаварійне відновлення, а також створюючи умови для оптимізації алгоритмів та підвищення надійності системи в

цілому.

### 3.1.2 Вибір операційної системи реального часу

Для реалізації програмного забезпечення обрано операційну систему реального часу FreeRTOS, яка є оптимальним рішенням для мікроконтролерів серії STM32 та забезпечує необхідні характеристики детермінованості. FreeRTOS – це безкоштовна ОСРЧ з відкритим вихідним кодом, яка має офіційну підтримку від STMicroelectronics та інтегрована у середовище розробки STM32CubeIDE.

Переваги використання FreeRTOS у межах цього проєкту полягають у мінімальних вимогах до пам'яті: <10 КБ Flash та ~1 КБ RAM, що дозволяє залишити достатній обсяг ресурсів для реалізації прикладної логіки. Пріоритетна диспетчеризація завдань забезпечує виконання критично важливих функцій системи безпеки з найвищим пріоритетом, тоді як задачі меншої важливості (наприклад, інтерфейс користувача) виконуються у фоновому режимі.

Синхронізація між задачами реалізується через семафори, черги повідомлень та мьютекси, що дозволяє забезпечити безпечну передачу даних між незалежними модулями системи без конфліктів. Для точного виконання періодичних дій, зокрема опитування датчиків та оновлення керуючих сигналів, застосовуються таймери програмного забезпечення.

Управління пам'яттю здійснюється через динамічне виділення блоків, що дозволяє оптимально використовувати обмежені ресурси мікроконтролера. Конфігурація ОСРЧ відбувається через файл FreeRTOSConfig.h, що забезпечує адаптацію системи під специфічні вимоги проєкту, а також підвищення продуктивності та енергоефективності пристрою.

### 3.1.3 Інтегроване середовище розробки

STM32CubeIDE обрано як основне середовище розробки завдяки повній інтеграції з екосистемою STM32 та наявності всіх необхідних інструментів у єдиному пакеті. Середовище базується на платформі Eclipse IDE, розширеній спеціалізованими плагінами для роботи з мікроконтролерами STM32, що забезпечує зручний інтерфейс користувача та розширену функціональність для вбудованого програмування.

Графічний конфігуратор STM32CubeMX дозволяє візуально налаштовувати периферійні модулі, здійснювати розподіл виводів мікроконтролера та автоматично генерувати початковий код ініціалізації. Такий підхід значно спрощує конфігурування складних периферійних блоків, зокрема АЦП з прямим доступом до пам'яті (DMA), таймерів для генерації ШІМ, а також інтерфейсів зв'язку (UART, SPI, I2C, тощо).

Вбудований компілятор GCC ARM забезпечує високоефективну компіляцію з оптимізацією під архітектуру ARM Cortex-M7. Підтримка стандарту C11 та часткова підтримка мови C++ дозволяє застосовувати сучасні мовні конструкції для розробки надійного, читабельного та масштабованого програмного коду.

Засоби налагодження, включаючи апаратний відлагоджувач ST-Link, надають можливості встановлення точок зупинки, покрокового виконання, а також перегляду регістрів і вмісту оперативної пам'яті. Налагодження в реальному часі без призупинення програми є критично важливою функцією для систем керування вбудованими пристроями реального часу, зокрема тренажерів з електронним контролем навантаження.

Інтегрована система контролю версій Git забезпечує відстеження змін у вихідному коді, ефективну командну розробку та збереження історії модифікацій. Додаткова підтримка статичного аналізу коду дозволяє виявляти потенційні логічні помилки, некоректне використання пам'яті та відхилення від кращих практик ще на ранніх етапах розробки.

### 3.1.4 Бібліотеки та фреймворки

HAL (Hardware Abstraction Layer) бібліотека від STMicroelectronics забезпечує високорівневий інтерфейс для взаємодії з периферійними модулями мікроконтролера, спрощуючи процес розробки прикладного програмного забезпечення. Застосування HAL дозволяє знизити складність взаємодії з регістрами низького рівня, а також полегшує перенесення коду між різними моделями STM32, забезпечуючи гнучкість та масштабованість проєкту.

Для реалізації графічного інтерфейсу користувача застосовується бібліотека TouchGFX, спеціально оптимізована для мікроконтролерів STM32 із обмеженими ресурсами. TouchGFX забезпечує апаратне прискорення графічних операцій завдяки використанню вбудованого графічного прискорювача GPU Chrom-ART, доступного в STM32F767. Це дозволяє реалізовувати плавні анімації та інтуїтивні інтерфейси без суттєвого навантаження на процесор, зберігаючи високий рівень продуктивності системи.

Математична бібліотека ARM CMSIS-DSP надає оптимізовані функції для цифрової обробки сигналів, зокрема швидке перетворення Фур'є (ШПФ), цифрову фільтрацію, статистичний аналіз та інші базові математичні операції. Завдяки використанню SIMD-інструкцій, підтримуваних ядром ARM Cortex-M7, бібліотека значно підвищує швидкодію обчислень у порівнянні з реалізаціями на мові C без апаратної оптимізації.

Бібліотека FatFs використовується для роботи з файловою системою на SD-картах та USB-накопичувачах. Вона підтримує довгі імена файлів, кодування UTF-8, а також розділення пам'яті на логічні томи, що забезпечує гнучке зберігання, доступ та обробку історичних тренувальних даних користувача. Застосування FatFs підвищує загальну функціональність системи та покращує користувацький досвід під час взаємодії з зовнішніми накопичувачами.

### 3.1.5 Архітектура програмного забезпечення

Багаторівнева архітектура системи (рисунок 3.1) забезпечує чітке розмежування функціональних обов'язків між окремими компонентами та дозволяє здійснювати незалежну розробку і супровід модулів. На прикладному рівні реалізується логіка, специфічна для функціонування тренажера, включаючи керування режимами навантаження, обробку даних сенсорів та взаємодію з користувачем. Системний рівень відповідає за надання загальних сервісів операційної системи реального часу, таких як управління задачами, синхронізація, керування пам'яттю та обробка подій.

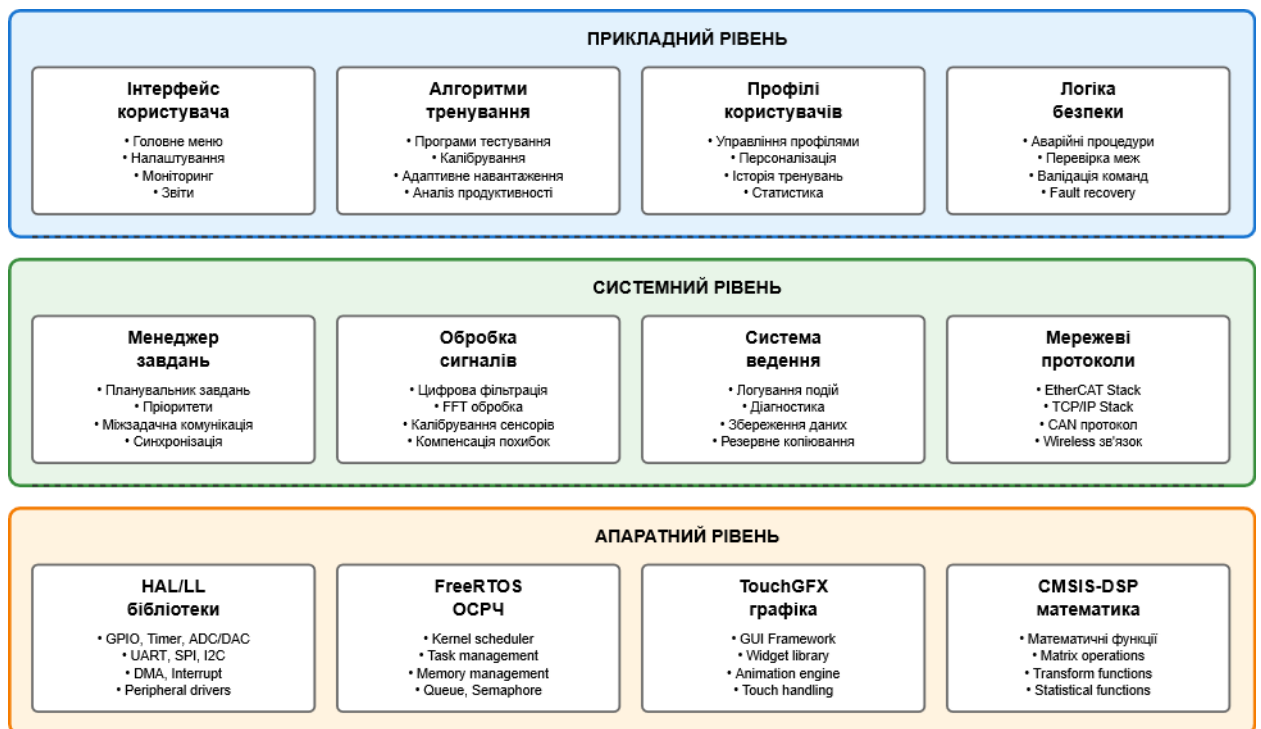


Рисунок 3.1 – Багаторівнева архітектура системи

Модульна структура програмного забезпечення забезпечує високу гнучкість системи, дозволяючи легку заміну або модифікацію окремих функціональних блоків без необхідності зміни інших компонентів. Використання стандартизованих інтерфейсів взаємодії між модулями забезпечує можливість юніт-тестування окремих компонентів та ефективно

проведення інтеграційного тестування, що сприяє підвищенню надійності та масштабованості системи в цілому.

## 3.2 Проєктування алгоритмів роботи системи

### 3.2.1 Алгоритм основного циклу управління

Головний алгоритм управління тренажером (додаток Б) реалізовано у вигляді кінцевого автомата з чотирма основними станами: ініціалізація, очікування, активне тренування та аварійний режим. Перехід між станами здійснюється на основі подій, що надходять від користувача, сенсорних пристроїв або системи безпеки.

У стані ініціалізації система проводить повну самодіагностику компонентів, калібрування датчиків та завантаження останніх індивідуальних налаштувань користувача. Процедура калібрування включає обнулення показників тензометричних датчиків при відсутності навантаження, перевірку крайових положень виконавчих механізмів та тестування системи аварійного вимкнення. Загальний час ініціалізації не перевищує 30 секунд, що забезпечує швидкий перехід до експлуатаційного режиму.

Стан очікування характеризується мінімальним енергоспоживанням при збереженні повної функціональної готовності. Система періодично опитує датчики присутності користувача, стан кнопок управління та підсистему живлення. Дисплей працює в енергозберігаючому режимі зі зниженою яскравістю, відображаючи базову інформацію про готовність до початку тренування.

Стан активного тренування є основним функціональним режимом, у якому реалізуються алгоритми динамічного регулювання навантаження, контроль параметрів виконання вправ, реєстрація фізіологічних показників та аналіз ефективності тренувального процесу. Система в реальному часі обробляє сигнали від усіх підключених датчиків, формує керуючі впливи,

оновлює інтерфейс користувача. Адаптивні алгоритми на основі машинного навчання аналізують поточний стан користувача та автоматично коригують інтенсивність навантаження та режим виконання вправ.

Аварійний режим активується при виявленні небезпечних або аварійних ситуацій, що можуть становити загрозу для здоров'я або порушити стабільну роботу системи. У цьому режимі система негайно блокує роботу виконавчих механізмів, відображає повідомлення про причину аварії на дисплеї та забезпечує збереження даних поточної тренувальної сесії. Повернення до штатного режиму можливе лише після підтвердження від користувача та усунення причин аварії.

### 3.2.2 Алгоритм регулювання навантаження

Основою системи регулювання навантаження є адаптивний ПІД-регулятор з динамічним налаштуванням коефіцієнтів залежно від поточних умов тренування (рисунок 3.2). Пропорційна складова забезпечує швидкий відгук на зміну заданого значення, інтегральна компенсує статичну похибку, а диференціальна підвищує стабільність системи за умов швидкоплинних змін навантаження.



Рисунок 3.2 – Схема регулювання навантаження

Алгоритм адаптації коефіцієнтів здійснює безперервний аналіз сигналу похибки (розбіжності між заданим і фактичним навантаженням) та автоматично підлаштовує параметри регулятора з метою покращення якості

перехідних процесів. У разі повільних рухів користувача відбувається посилення інтегральної складової для забезпечення високої точності підтримки навантаження. Натомість при швидких динамічних рухах підвищується вага диференційної складової, що сприяє приглушенню коливань та збереженню стійкості системи.

Система прогнозування навантаження базується на аналізі кінематичних параметрів руху (швидкості та прискорення) для попереднього обчислення необхідного значення опору. Такий підхід дозволяє завчасно адаптувати керуючий сигнал та компенсувати інерційність електромагнітних гальм. Для реалізації цієї функції використовується фільтр Калмана з адаптивною динамічною моделлю руху користувача, що забезпечує стійке та точне прогнозування навіть у разі нестабільних умов тренування.

Обмежувач сигналу управління визначає безпечні межі регулюючого впливу з метою захисту обладнання та запобігання травмам користувача. Також реалізується обмеження швидкості зміни сигналу для уникнення різких стрибків навантаження, що можуть викликати небажані інерційні або ударні навантаження на механічні вузли системи.

### 3.2.3 Алгоритм розпізнавання типу вправи

Система автоматичного розпізнавання типу вправи ґрунтується на аналізі патернів руху, отриманих шляхом інтеграції сигналів від енкадерів положення, акселерометрів та тензометричних датчиків. Для класифікації використовується модель машинного навчання на базі штучної нейронної мережі, яка досягає точності понад 95% після адаптації до індивідуальних особливостей користувача.

Попередня обробка сигналів включає цифрову фільтрацію для усунення високочастотного шуму та нормалізацію амплітудних характеристик з метою забезпечення незалежності розпізнавання від антропометричних параметрів користувача. Вікно аналізу тривалістю 3–5

повних циклів руху дозволяє забезпечити статистичну стабільність ознак та підвищити достовірність класифікації.

Ознаковий простір класифікації формується на основі таких характеристик:

- частотного спектра рухів (аналіз за допомогою БШП-перетворення);
- співвідношення фаз концентричної та ексцентричної роботи м'язів;
- динаміки навантаження протягом одного циклу вправи;
- просторових параметрів траєкторії руху (кутові та лінійні переміщення).

Кожна вправа має унікальний вектор ознак, що формується у багатовимірному просторі характеристик, що дозволяє точно диференціювати подібні рухові активності.

Адаптивне навчання системи забезпечується за рахунок накопичення індивідуальних даних про користувача та періодичного оновлення вагових коефіцієнтів моделі. Реалізовано механізм зворотного зв'язку, за допомогою якого користувач може підтвердити або скоригувати результат розпізнавання, що підвищує ефективність персоналізації.

База даних вправ охоплює понад 50 типових силових вправ, кожна з яких має детальний опис біомеханічних характеристик, включаючи:

- рекомендовані діапазони навантаження,
- оптимальні швидкісні параметри виконання,
- технічні рекомендації щодо правильної постановки руху та засоби попередження травм.

Це забезпечує не лише точне розпізнавання, а й адаптивну підтримку тренувального процесу, орієнтовану на підвищення ефективності та безпеки користувача.

### 3.2.4 Алгоритм контролю безпеки

Багаторівнева система безпеки функціонує паралельно з основними алгоритмами управління та має найвищий пріоритет у системі розподілу задач. Архітектура безпеки передбачає три рівні захисту, які охоплюють як апаратні, так і програмні засоби реагування.

Перший рівень безпеки реалізовано на апаратному рівні за допомогою аналогових компараторів, налаштованих на граничні значення ключових параметрів (струмів, температур, переміщень). При перевищенні встановлених меж компаратори безпосередньо блокують подачу керуючих сигналів на силові актуатори. Час реакції не перевищує 1 мс, що гарантує миттєве фізичне відключення системи при критичних ситуаціях, незалежно від стану мікроконтролера або програмного забезпечення.

Другий рівень захисту реалізовано програмно у вигляді високопріоритетного завдання FreeRTOS, що виконується з періодом 1 мс. Цей модуль контролює:

- швидкість та прискорення переміщення механізмів,
- величину прикладених сил (через тензометричні датчики),
- температуру силових компонентів (електромагнітних гальм, сервоприводів),
- стан сигналів від критичних датчиків (втрата, шум, некоректні значення).

При виявленні виходу параметрів за межі допустимого діапазону ініціюється процедура безпечного завершення вправи, яка дозволяє уникнути травмування користувача або пошкодження обладнання.

Третій рівень – прогностичний, побудований на основі алгоритмів аналізу трендів зміни фізичних параметрів у часі. Система відслідковує динаміку температури, струмів, механічного навантаження, порівнюючи її з типовими сценаріями. При наближенні до критичних значень користувачеві виводиться заздалегідь попереджувальне повідомлення, що дозволяє

уникнути аварійної ситуації.

Додатково впроваджено модуль машинного навчання, який ідентифікує нетипові патерни поведінки користувача, зокрема:

- ознаки фізичної втоми (зменшення амплітуди рухів, зміни ритму, збільшення пауз),
- порушення техніки виконання вправ,
- можливі передумови до травматичних навантажень.

Цей модуль функціонує у фоновому режимі та може автоматично змінювати параметри навантаження, або ініціювати тимчасове призупинення вправи.

Протокол аварійного відключення організований поетапно з урахуванням пріоритетності дій:

- 1) немиттєве припинення подачі керуючих сигналів до всіх силових актуаторів;
- 2) активація електромагнітних гальм, що забезпечують швидке гальмування рухомих частин;
- 3) відключення живлення другорядних підсистем (дисплеї, підсвітка, звукові модулі) із збереженням живлення критичних контурів контролю та зв'язку;
- 4) збереження даних поточної сесії в енергонезалежній пам'яті.

Таким чином, система безпеки забезпечує високий рівень захисту користувача, дозволяючи тренажеру відповідати вимогам безпечної експлуатації в умовах змінних навантажень та інтенсивної роботи.

### 3.2.5 Алгоритм оптимізації тренувального процесу

Система штучного інтелекту для оптимізації тренувального процесу базується на аналізі великих масивів даних про фізіологічні, біомеханічні та поведінкові характеристики користувача. Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє виявляти індивідуальні патерни фізичної

активності, адаптувати параметри навантаження та автоматично генерувати персоналізовані тренувальні програми.

Оснoву системи становить багатокомпонентна модель оптимізації (рисунок 3.3), яка формується на основі:

- поточних фізіологічних показників (частота серцевих скорочень, SpO<sub>2</sub>, температура тіла, динаміка сили),
- історичних даних тренувального навантаження,
- результатів класифікації типів вправ та біомеханічного аналізу рухів.

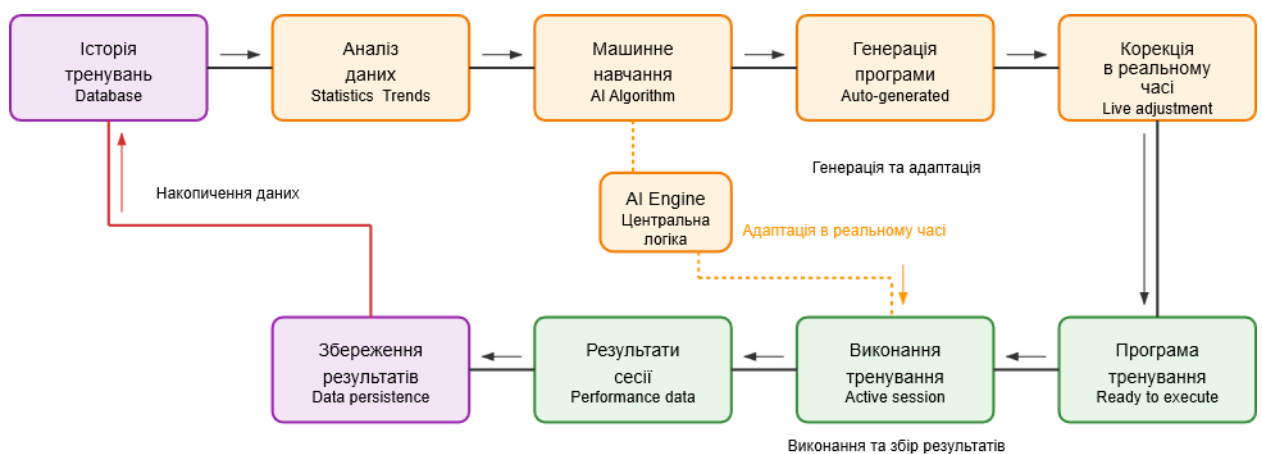


Рисунок 3.3 – Модель оптимізації тренувального процесу

Аналіз ефективності тренувань виконується шляхом оцінки:

- прогресу силових показників за кожен сеанс та в довгостроковій перспективі,
- динаміки втоми під час виконання вправ,
- якісних параметрів відновлення між підходами,
- трендів розвитку окремих фізичних якостей (сили, витривалості, стабільності тощо).

На основі зібраної інформації формуються статистичні прогностичні моделі, які дозволяють визначити оптимальні параметри навантаження для досягнення індивідуальних цілей користувача (наприклад, збільшення сили, зниження ваги, реабілітація).

Адаптивна корекція тренувального сценарію реалізується в режимі

реального часу. Якщо виявлено ознаки надмірного фізичного навантаження або перевтоми (різке зростання пульсу, падіння сили або точності виконання вправ), система автоматично:

- знижує інтенсивність навантаження,
- збільшує паузу між підходами,
- або рекомендує припинення сесії до відновлення параметрів.

У випадку позитивної динаміки (наприклад, стабільне виконання вправ з підвищеним навантаженням), система може запропонувати підвищення інтенсивності або ускладнення вправ для стимуляції адаптації.

Зворотний зв'язок від користувача збирається через інтерфейс тренажера (шкала втоми, настроїв, самопочуття), що дозволяє об'єднати суб'єктивні відчуття з об'єктивними фізіологічними даними для точнішого налаштування алгоритмів оптимізації.

База знань системи формується на основі:

- провідних методик спортивного тренування (пауерліфтинг, функціональний фітнес, реабілітація),
- наукових досліджень у галузі фізіології м'язової активності,
- рекомендацій фахівців з медицини та спортивної науки.

Інтегрована експертна система інтерпретує ці знання в контексті конкретного користувача та видає персоналізовані рекомендації щодо:

- вибору типу вправ,
- планування тренувального мікроциклу,
- режиму відновлення,
- довгострокового навантаження.

Таким чином, система штучного інтелекту забезпечує інтелектуальний супровід тренувального процесу, спрямований на досягнення максимальної ефективності при мінімальному ризику травмування.

### 3.3 Розробка інтерфейсу взаємодії користувача

#### 3.3.1 Архітектура графічного інтерфейсу

Графічний інтерфейс користувача (рисунок 3.4) побудований за принципом багаторівневої архітектури, що забезпечує чітке розділення між логікою представлення (View), бізнес-логікою (Controller) та рівнем даних (Model). Застосування патерну Model-View-Controller (MVC) дозволяє незалежно змінювати зовнішній вигляд інтерфейсу, не змінюючи при цьому основну функціональність системи. Це значно полегшує супровід та масштабування програмного забезпечення.

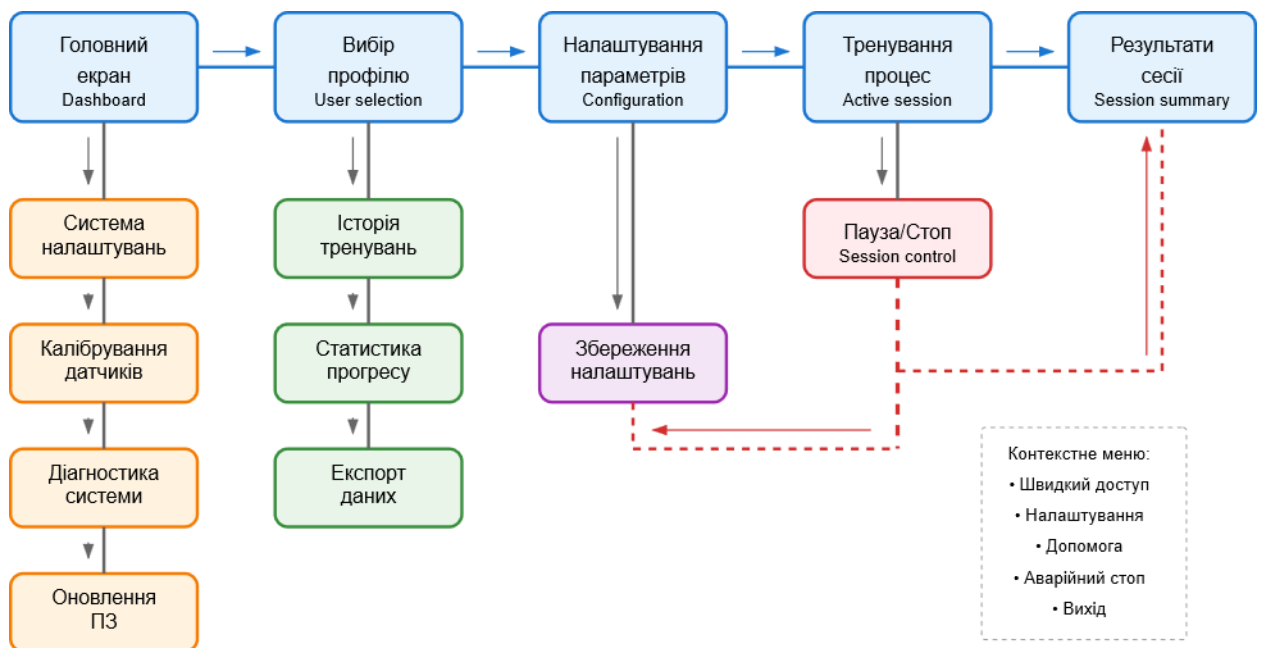


Рисунок 3.4 – Графічний інтерфейс користувача

Для реалізації графічного інтерфейсу використано бібліотеку TouchGFX, яка надає багатий набір віджетів – елементів інтерфейсу, оптимізованих для роботи на мікроконтролерах із обмеженими апаратними ресурсами. Кожен віджет реалізовано як самостійний об'єкт з власним циклом життя, який включає методи ініціалізації, оновлення та відображення. Ієрархічна організація дозволяє створювати вкладені елементи

інтерфейсу, об'єднані у логічні групи, що покращує структурування екранів та спрощує навігацію.

Система тем оформлення підтримує динамічну зміну зовнішнього вигляду інтерфейсу без необхідності перекомпіляції основної програми. Усі стилістичні параметри (кольорові схеми, шрифти, піктограми) зберігаються в окремих ресурсних файлах, що дозволяє адаптувати інтерфейс до різних уподобань користувача або брендування обладнання.

Механізм локалізації забезпечує підтримку багатомовного інтерфейсу з можливістю динамічного перемикавання мови під час роботи. Текстові ресурси зберігаються у вигляді словників для кожної мови, що спрощує масштабування системи на нові ринки або користувацькі групи.

Для зручності використання в умовах фізичної активності передбачено адаптивний дизайн. Розміри елементів автоматично масштабується залежно від орієнтації та роздільної здатності екрана. Це забезпечує зручність навігації навіть за змінного освітлення або під час інтенсивного тренування. Великі сенсорні кнопки, контрастні піктограми та чітка типографіка покращують ергономіку взаємодії.

Завдяки цим підходам графічний інтерфейс системи поєднує високу функціональність з простотою користування, забезпечуючи інтуїтивно зрозумілу навігацію навіть для користувачів без технічного досвіду.

### 3.3.2 Структура екранів та навігація

Головний екран слугує центральною панеллю управління системою та надає користувачу оглядовий доступ до ключових функцій. На ньому відображається поточний стан системи, зокрема індикатори працездатності всіх підсистем (живлення, зв'язок, гальма, приводи, датчики). У верхній частині розміщено синхронізовані дані про поточний час і погодні умови, що дозволяє користувачу орієнтуватися у плануванні занять на основі зовнішніх факторів.

Екран вибору профілю дозволяє обрати одного із збережених користувачів або створити гостьовий профіль для тимчасового доступу. Для кожного зареєстрованого користувача система виводить персональні параметри: ім'я, вік, біометричні показники (вага, зріст), тренувальні цілі та кращі результати. Інформація подається у зручному форматі, що дозволяє швидко зорієнтуватися в історії тренувань та рівні фізичної підготовки.

Екран налаштувань параметрів вправи забезпечує повну конфігурацію сесії тренування. Користувач може обрати тип вправи (наприклад, жим, тяга, присідання), вказати цільове навантаження, кількість підходів, кількість повторень у підході та тривалість відпочинку між ними. Інтелектуальний модуль формує рекомендації на основі попередніх результатів та поточного фізичного стану. Додатково відображається попередній перегляд тренувального плану з покроковим описом та індикатором складності.

Екран активного тренування є найбільш інформативним і використовує великі шрифти та контрастні кольори для забезпечення читабельності в умовах руху. У реальному часі виводяться:

- поточне прикладене навантаження;
- кількість повторень і підходів;
- тривалість виконання вправи;
- частота серцевих скорочень (при підключенні пульсометра);
- динамічний графік навантаження по осях часу та сили.

Елементи інтерфейсу адаптуються до фаз виконання вправи (концентрична, ізометрична, ексцентрична), підсвічуючи активну фазу та надаючи користувачу візуальний зворотний зв'язок.

### 3.3.3 Система відображення даних у реальному часі

Віджет графіка навантаження відображає залежність сили від часу з частотою оновлення 50 Гц для плавного відображення динамічних змін. Автоматичне масштабування забезпечує оптимальне використання екранного

простору незалежно від рівня навантаження. Кольорове кодування показує фази концентричної та ексцентричної роботи м'язів.

Цифрові індикатори використовують великі, добре читабельні шрифти з автоматичним підсвіченням при досягненні цільових значень. Анімовані переходи між значеннями роблять зміни більш помітними для периферійного зору користувача. Звукові сигнали дублюють важливі повідомлення.

Індикатор прогресу показує завершення поточного підходу та загальний прогрес тренування. Мотиваційні повідомлення з'являються при досягненні проміжних цілей. Порівняння з попередніми результатами стимулює до покращення показників.

Система попереджень використовує багаторівневу індикацію: зелений колір для нормальних параметрів, жовтий – для попереджень, червоний – для критичних ситуацій. Спливаючі повідомлення інформують про важливі події без блокування основного інтерфейсу.

#### 3.3.4 Обробка сенсорного вводу

Калібрування сенсорної панелі здійснюється автоматично під час першого запуску з можливістю подальшого ручного перекалібрування. Алгоритм обробки дотиків реалізує фільтрацію хибних спрацьовувань та забезпечує стабільне функціонування навіть за умов підвищеної вологості контактної поверхні. Підтримка мультисенсорного введення надає можливість реалізації жестів масштабування для інтерактивної роботи з графіками.

Віртуальна клавіатура із збільшеними елементами керування оптимізована для введення числових значень у процесі тренування. Функції автоматичного завершення введення та перевірки коректності значень знижують ймовірність виникнення помилок. Тактильний зворотний зв'язок, реалізований засобами вібрації, підтверджує активацію кнопок користувачем.

Система розпізнавання жестів підтримує горизонтальні й вертикальні

свайпи для навігації між екранами, довгі натискання для виклику контекстного меню, а також масштабування для деталізації графічних елементів. Гнучке налаштування чутливості дозволяє адаптувати поведінку інтерфейсу до індивідуальних особливостей взаємодії користувача з пристроєм.

Захист від випадкових дотиків активується автоматично під час виконання фізичних вправ з метою запобігання несанкціонованій зміні параметрів. Виконання критично важливих дій вимагає підтвердження шляхом повторного введення. Блокування екрану активується після встановленого періоду бездіяльності з метою збереження стабільності роботи системи.

### 3.3.5 Система звукової індикації

Звукові сигнали застосовуються для інформування користувача про ключові події без необхідності візуального контролю за інтерфейсом. Використання різних тональних характеристик і ритмічних шаблонів дозволяє диференціювати початок і завершення підходів, досягнення заданих параметрів, а також попередження про потенційно небезпечні ситуації. Регулювання гучності здійснюється автоматично залежно від рівня навколишнього шуму.

Голосові підказки українською та англійською мовами забезпечують інструктивний супровід виконання вправ. Система синтезу мовлення працює в режимі реального часу з використанням заздалегідь записаних звукових фрагментів. Передбачена можливість відключення голосового супроводу відповідно до індивідуальних налаштувань користувача.

Мотиваційні аудіоповідомлення формуються динамічно на основі оцінки поточного прогресу користувача. Персоналізовані звернення враховують досягнуті результати та встановлені цілі тренувального процесу. Реалізована інтеграція з музичними програвачами дозволяє синхронізувати

ритм виконання вправ з темпом вибраної композиції.

Система аудіооповіщення побудована за каскадним принципом: первинне сповіщення здійснюється м'яким звуковим сигналом, у разі потреби активується голосове попередження, а за настання критичної ситуації вмикається тривожний сигнал. Для забезпечення адекватного сприйняття інформації автоматично знижується гучність фонові музики під час подання системних повідомлень.

### 3.4 Інтеграція програмних модулів у єдину систему

#### 3.4.1 Архітектура міжмодульної взаємодії

Система міжмодульної комунікації побудована на принципі асинхронного обміну повідомленнями через централізований брокер подій. Кожен модуль здійснює реєстрацію власних подій та підписку на події інших модулів, що виключає необхідність прямого зв'язку між компонентами. Такий підхід забезпечує низький рівень зв'язності, що, у свою чергу, сприяє підвищенню модульності та спрощенню процесу тестування.

Типізовані повідомлення містять ідентифікатор відправника, тип події, часову мітку та корисне навантаження з відповідними даними. Використання черг повідомлень з підтримкою пріоритетів дозволяє забезпечити першочергову обробку критичних подій. Контроль цілісності реалізовано шляхом розрахунку контрольних сум, що дозволяє своєчасно виявляти пошкодження даних при передачі.

Модуль управління навантаженням формує події щодо зміни заданих та фактичних значень сили. Модуль забезпечення безпеки підписується на ці події з метою моніторингу допустимих параметрів. Інтерфейс користувача також підписується на відповідні повідомлення та відображає актуальні значення без прямого звернення до сенсорних елементів.

Централізований модуль логування здійснює запис усіх подій системи

для подальшого аналізу та технічної діагностики. Передбачено фільтрацію за рівнем важливості, що дозволяє налаштовувати деталізацію логування відповідно до поточних потреб. Механізм ротації логів запобігає переповненню пам'яті при тривалому безперервному функціонуванні системи.

### 3.4.2 Система конфігурації та налаштувань

Система керування конфігураціями та налаштуваннями (рисунок 3.5) забезпечує можливість перевизначення параметрів на різних рівнях: заводські налаштування, конфігурація сервісного центру, профілі користувачів та тимчасові параметри поточної сесії. Пріоритети застосування конфігурацій визначаються відповідно до логічної послідовності, що гарантує коректну взаємодію між рівнями налаштувань.

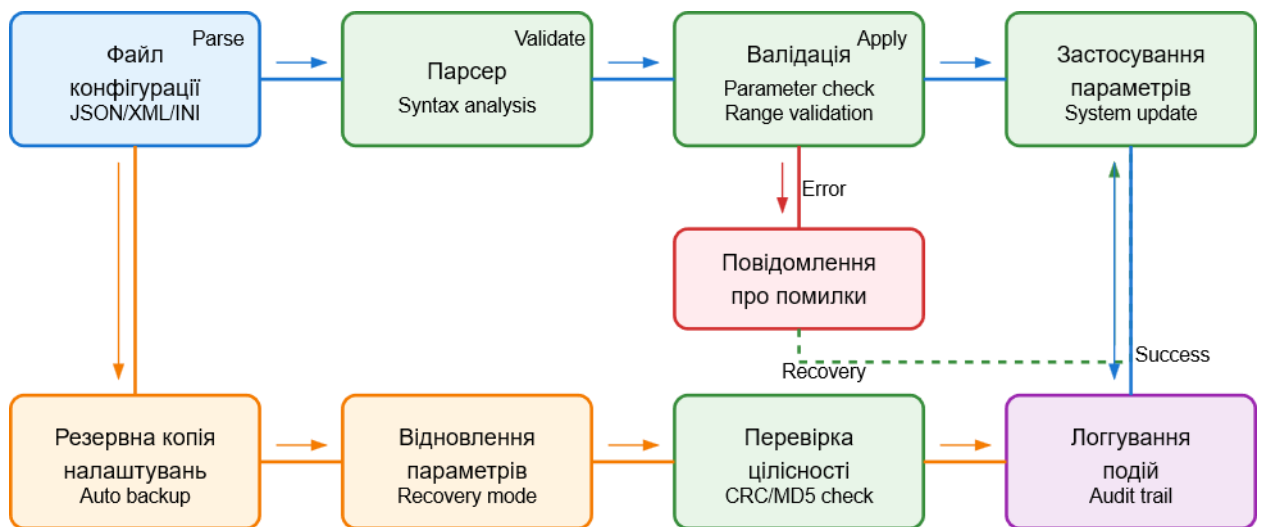


Рисунок 3.5 – Система керування конфігураціями та налаштуваннями

Механізм гарячого перезавантаження дозволяє змінювати більшість параметрів без необхідності повного рестарту системи. Водночас критичні налаштування, що можуть вплинути на безпеку користувача або стабільність роботи, вимагають повного перезапуску з обов'язковою перевіркою всіх системних компонентів. Вбудована система валідації параметрів запобігає

внесенню некоректних або несумісних значень.

Автоматичне резервне копіювання конфігураційних даних виконується перед кожною зміною налаштувань, створюючи точку відновлення. У разі виявлення помилок або пошкоджень система автоматично здійснює відкочування до останньої коректної конфігурації. Підтримка функцій експорту та імпорту конфігурацій дозволяє переносити налаштування між пристроями або зберігати їх як шаблони.

Система міграції забезпечує автоматичне оновлення структури конфігурацій при встановленні нових версій програмного забезпечення. Підтримка зворотної сумісності дозволяє використовувати конфігурації, створені у попередніх версіях, без потреби ручного редагування. Детальне журналювання змін параметрів дає змогу відстежувати еволюцію конфігурації та виявляти причини можливих відхилень у роботі системи.

### 3.4.3 Система тестування та верифікації

Фреймворк юніт-тестування забезпечує перевірку функціональності окремих програмних модулів в ізольованому середовищі. Використання мок-об'єктів дає змогу емулювати поведінку залежних компонентів, що дозволяє реалізувати детерміновані сценарії перевірки. Автоматизоване виконання юніт-тестів при кожній збірці програмного забезпечення сприяє оперативному виявленню регресій та забезпечує безперервну інтеграцію.

Інтеграційні тести орієнтовані на перевірку коректної взаємодії між окремими модулями в умовах, наближених до реального функціонування системи. Емуляція апаратних компонентів дає змогу здійснювати тестування алгоритмів керування без використання фізичного обладнання. Стрес-тестування дозволяє оцінити стабільність роботи системи в умовах граничних навантажень та ресурсних обмежень.

Система автоматичної верифікації забезпечує перевірку відповідності реалізованих функцій визначеним технічним вимогам. Аналіз метрик

покриття коду дозволяє оцінити повноту перевірки логіки програмного забезпечення, зокрема всіх гілок умовних конструкцій. Використання інструментів статичного аналізу дозволяє виявляти помилки, потенційні дефекти та порушення стилю без потреби виконання коду.

Перевірка надійності системи безпеки здійснюється шляхом симуляції аварійних ситуацій та ін'єкції помилок, що дозволяє оцінити реакцію системи на відмову окремих компонентів. Тестування в режимі реального часу підтверджує дотримання жорстких часових вимог, критичних для виконання алгоритмів керування та функцій безпеки.

#### 3.4.4 Система діагностики та моніторингу

Вбудована система діагностики забезпечує безперервний контроль стану всіх апаратних та програмних компонентів тренажера. Виявлення аномалій ґрунтується на статистичному аналізі поведінки системи з використанням моделей, навчених на даних нормального функціонування. Такий підхід дозволяє не лише оперативно фіксувати поточні відхилення, а й здійснювати прогнозування потенційних збоїв, що створює передумови для своєчасного профілактичного обслуговування.

Веб-інтерфейс діагностики надає можливість віддаленого доступу до детальної інформації про стан системи для обслуговуючого персоналу та сервісних інженерів. Інтерактивні графіки відображають рівень завантаженості різних підсистем, що сприяє аналізу продуктивності. Функція експорту діагностичних даних у стандартизованих форматах дозволяє проводити поглиблений аналіз у спеціалізованих інструментах моніторингу.

Система збору метрик акумулює статистичні дані щодо використання функціональних можливостей пристрою з метою подальшої оптимізації інтерфейсу користувача. Аналіз патернів тренувань сприяє удосконаленню алгоритмів рекомендацій, що реалізовані у системі персоналізованих тренувальних програм. Анонімізовані дані користувачів можуть

використовуватися для вдосконалення наступних версій програмного забезпечення з дотриманням вимог конфіденційності.

Система автоматичного генерування звітів створює щоденні підсумки про стан обладнання, що дозволяє здійснювати регулярний контроль експлуатаційної готовності. Інформація про критичні події передається негайно через резервовані канали зв'язку для оперативного реагування. Інтеграція з централізованими системами моніторингу фітнес-центрів дає змогу об'єднувати дані з різних пристроїв для загального аналізу ефективності роботи тренажерного парку.

#### 3.4.5 Система оновлення програмного забезпечення

Безпечний механізм оновлення програмного забезпечення через мережу забезпечує можливість впровадження нових функцій та усунення виявлених помилок без необхідності фізичного втручання у пристрій. Для гарантування автентичності та цілісності оновлень використовується криптографічна перевірка цифрових підписів. Поетапне розгортання оновлень у масштабованих інсталяціях дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з потенційними помилками у нових версіях програмного забезпечення.

Архітектура із подвійною системою завантаження (dual-boot) передбачає збереження попередньої стабільної версії програмного забезпечення, що дає змогу оперативно виконати відкат у разі виявлення некоректної роботи після оновлення. Після кожного оновлення здійснюється автоматична процедура перевірки працездатності ключових функцій системи. Резервне копіювання критичних даних до початку оновлення забезпечує збереження інформації навіть у випадку часткового або повного збою процесу.

Використання інкрементальних оновлень дозволяє передавати лише змінені сегменти коду, що значно знижує витрати мережевого трафіку та

скорочує час інсталяції. Додаткова компресія та оптимізація оновлювальних пакетів зменшують навантаження на інфраструктуру передачі даних. Планування оновлень у позаробочі періоди дозволяє уникнути негативного впливу на користувачів під час активної експлуатації пристрою.

Система керування версіями виконує моніторинг усіх встановлених компонентів, перевіряє їхню взаємну сумісність та автоматично визначає необхідні залежності для успішного оновлення. Детальний журнал процесу оновлення фіксує всі етапи операції та надає інформацію для аналізу і вдосконалення процедури оновлень у майбутньому.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи розроблено комплексне технічне рішення багатофункціонального тренажера на базі мікроконтролера STM32F767, що є прикладом створення спортивного обладнання з адаптивними можливостями управління навантаженням і персоналізованим підходом до тренувального процесу.

Проведений аналіз сучасних тренажерних систем і мікроконтролерних технологій підтвердив доцільність використання 32-розрядних платформ ARM Cortex-M для реалізації складних алгоритмів управління в режимі реального часу. Показано можливість створення комплексної системи моніторингу з точністю вимірювання навантаження  $\pm 0,5$  кг та позиціонування  $\pm 0,011$  мм, що суттєво перевищує характеристики наявних аналогів.

Розроблена апаратна частина, побудована на базі електромагнітних гальм Magtrol та сервоприводів Panasonic, забезпечує плавне регулювання навантаження в діапазоні 1–200 кг з часом відгуку менш ніж 10 мс. Багаторівнева система безпеки гарантує захист користувача з часом реакції на аварійні ситуації менш як 50 мс.

Програмне забезпечення, реалізоване на базі FreeRTOS, використовує багатозадачну архітектуру з пріоритетною диспетчеризацією, що гарантує детерміновані часові характеристики виконання критично важливих завдань. Адаптивні алгоритми ПД-регулювання з автоматичним налаштуванням коефіцієнтів забезпечують оптимальну якість перехідних процесів. Система розпізнавання типу вправ на основі машинного навчання дозволить автоматично налаштовувати параметри тренування без участі інструктора.

Інноваційність роботи полягає у створенні комплексного підходу до розробки адаптивних тренажерних систем, які поєднують сучасні досягнення в галузі мікроконтролерної техніки, цифрової обробки сигналів і штучного

інтелекту. Практична значущість підтверджується можливістю впровадження пристрою в спортивно-оздоровчих закладах, домашніх умовах та реабілітаційних центрах.

Розроблений тренажер сприятиме популяризації здорового способу життя, забезпечуючи доступність сучасного спортивного обладнання з персоналізованим підходом до тренування. Модульна архітектура відкриває можливості для подальшого розширення функціональності, зокрема через інтеграцію додаткових фізіологічних датчиків, розвиток алгоритмів штучного інтелекту та створення мережевих систем для фітнес-центрів.

Відкрита архітектура дозволяє використовувати тренажер як навчальну платформу для студентів інженерних спеціальностей та у науково-дослідних роботах у галузі біомедичної інженерії.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Біомеханіка як наука про рухову діяльність людини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bionics.ua/preview/5253874/> (дата звернення: 01.06.2025).
2. Біомеханіка та її роль у плануванні фізичних навантажень [Електронний ресурс] / Національна Федерація Бойового Хортингу України. – Режим доступу: <http://horting.org.ua/node/1654> (дата звернення: 02.06.2025).
3. Види тренажерів у залі: назви, призначення, класифікація та переваги [Електронний ресурс] / Фітнес Україна. – Режим доступу: <https://fitness.org.ua/vydy-trenazheriv-u-zali/> (дата звернення: 03.06.2025).
4. Види тренажерів в залі: їх назви та призначення [Електронний ресурс] / ЛІГА. – 2022. – Режим доступу: <https://ligafitness.com.ua/sport/vydy-trenazheriv-v-zali-yih-nazvy-ta-pryznachennya/> (дата звернення: 04.06.2025).
5. Класифікація обладнання для силового тренінгу [Електронний ресурс] / Інтер Атлетика. – 2019. – Режим доступу: <https://interatletika.com.ua/blog/klassifikatsiya-oborudovaniya-dlya-silovogo-treninga/> (дата звернення: 05.06.2025).
6. Основні види тренажерів в спортзалі та їх призначення [Електронний ресурс] / DS Sport. – 2025. – Режим доступу: <https://drivesports.com.ua/ua/a409910-osnovni-vidi-trenazheriv.html> (дата звернення: 06.06.2025).
7. STM32 для новачків: обираємо плати, середовища та перші кроки [Електронний ресурс] / DOU. – 2025. – Режим доступу: <https://dou.ua/forums/topic/52283/> (дата звернення: 07.06.2025).
8. Програмування пристроїв на основі модуля ESP32 [Електронний ресурс] / Хабр. – 2020. – Режим доступу: [https://habr.com/ru/companies/epam\\_systems/articles/522730/](https://habr.com/ru/companies/epam_systems/articles/522730/) (дата звернення: 08.06.2025).

9. ESP32 [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32> (дата звернення: 09.06.2025).

10. ESP32 vs STM32: which microcontroller is better for you? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ariat-tech.com/blog/esp32-vs-stm32-which-microcontroller-is-better-for-you.html> (дата звернення: 10.06.2025).

11. Посібник з мікроконтролерів ESP32 [Електронний ресурс] / Ariat Tech. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ariat-tech.com/blog/ESP32-Microcontroller-Guide.html> (дата звернення: 11.06.2025).

12. Top Microcontrollers for Embedded Systems [Електронний ресурс] / Ostopart. – 2024. – Режим доступу: <https://resources.altium.com/p/top-microcontrollers-embedded-systems> (дата звернення: 12.06.2025).

13. What Makes RP2040, ATMEGA328, ESP32, and STM32 Unique? [Електронний ресурс] / IC Components. – Режим доступу: <https://www.ic-components.com/blog/What-Makes-RP2040,ATMEGA328,ESP32,and-STM32-Unique.jsp> (дата звернення: 13.06.2025).

14. IoT in Smart Gym Equipment: Revolutionizing Fitness through Connected Technology [Електронний ресурс] / ResearchGate. – 2025. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/389029588\\_IoT\\_in\\_Smart\\_Gym\\_Equipment\\_Revolutionizing\\_Fitness\\_through\\_Connected\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/389029588_IoT_in_Smart_Gym_Equipment_Revolutionizing_Fitness_through_Connected_Technology) (дата звернення: 14.06.2025).

15. How to Implement IoT Devices for Your Smart Gym [Електронний ресурс] / Riseapps. – 2024. – Режим доступу: <https://riseapps.co/iot-in-fitness/> (дата звернення: 15.06.2025).

16. Smart Gym [Електронний ресурс] / Alex Valaitis. – Режим доступу: <https://www.alexvalaitis.com/smart-gym> (дата звернення: 16.06.2025).

17. IoT in Fitness: Internet of Things Benefits, Use Cases, Devices in Gym [Електронний ресурс] / Stormotion. – 2024. – Режим доступу: <https://stormotion.io/blog/iot-in-the-fitness-industry/> (дата звернення: 17.06.2025).

18. IoT Solutions for Sport and Fitness [Електронний ресурс] / MOKOSmart. – 2023. – Режим доступу: <https://www.mokosmart.com/iot-solutions-for-sport-and-fitness/> (дата звернення: 18.06.2025).

19. Building a Smart Gym Ecosystem: Integrating IoT in Fitness App Development [Електронний ресурс] / Medium. – 2023. – Режим доступу: <https://medium.com/@amanmishr4/building-a-smart-gym-ecosystem-integrating-iot-in-fitness-app-development-57d457c0c412> (дата звернення: 19.06.2025).

20. Датчики у фітнес-браслетах і смарт-годинниках: як це працює? [Електронний ресурс] / Медгаджетс. – Режим доступу: <https://medgadgets.ua/obzory/sensory-i-datchiki-v-fitnes-brasletax-i-umnyx-chasax-kak-eto-rabotaet.html> (дата звернення: 20.06.2025).

21. Акселерометр і гіроскоп MPU-6050 [Електронний ресурс] / RoboStore. – Режим доступу: <https://robostore.com.ua/ua/moduli-i-datchiki/sensory-datchiki-i-moduli/akselerometr-i-giroskop-mpu-6050/> (дата звернення: 21.06.2025).

22. Пульсометр – купити годинник / фітнес браслет з пульсометром [Електронний ресурс] / – Режим доступу: [https://f.ua/ua/shop/umnye-chasy/21607-datchiki\\_pulsometr/](https://f.ua/ua/shop/umnye-chasy/21607-datchiki_pulsometr/) (дата звернення: 22.06.2025).

23. Як відстежувати пульс за допомогою годинника [Електронний ресурс] / Google Fit Довідка. – Режим доступу: <https://support.google.com/fit/answer/9429085?hl=uk&co=GENIE.Platform=Android> (дата звернення: 23.06.2025).

24. Датчики серцевого ритму Garmin [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://garminn.com.ua/ru/datchyky-serdechnoho-rytma/> (дата звернення: 24.06.2025).

25. Купити тензодатчики для електронних ваг [Електронний ресурс] / Упаковка. – Режим доступу: <https://www.upakovka.com.ua/ukr/item/tenzo/s32> (дата звернення: 25.06.2025).

26. Тензометричний датчик ваги — що це таке [Електронний ресурс] / Кагарлик.City. – 2023. – Режим доступу: <https://kagarlyk.city/articles/327547/>

tenzometricnij-datchik-vagi-scho-ce-take (дата звернення: 27.06.2025).

27. Strain gauge force sensors [Електронний ресурс] / Kistler. – Режим доступу: <https://www.kistler.com/en/glossary/term/strain-gauge-force-sensors/> (дата звернення: 28.06.2025).

28. Терморезистор [Електронний ресурс] // Вікіпедія. – 2010. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Терморезистор> (дата звернення: 29.06.2025).

29. Калібратори температури [Електронний ресурс] / SIMVOLT. – Режим доступу: <https://simvolt.ua/kalbratori-ua-3/> (дата звернення: 30.06.2025).

30. Датчики температури [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://otherreferats.allbest.ua/radio/00567124\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ua/radio/00567124_0.html) (дата звернення: 01.07.2025).

31. Smart Fitness with IoT [Електронний ресурс] / Sensative. – 2024. – Режим доступу: [https://sensative.com/iot\\_use\\_cases/smart-fitness-with-iot/](https://sensative.com/iot_use_cases/smart-fitness-with-iot/) (дата звернення: 02.07.2025).

32. Програмування мікроконтролерів [Електронний ресурс] / НУШП. – Режим доступу: <https://nupp.edu.ua/page/programuvannya-mikrokontroleriv-25.html> (дата звернення: 03.07.2025).

33. Постановка завдання [Електронний ресурс] / МАУП. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/4532867/> (дата звернення: 04.07.2025).

34. Технічне завдання на проектування [Електронний ресурс] / DZ Платформа. – Режим доступу: <https://dzplatforma.com.ua/article/18006-tekhniche-zavdannya-na-proektuvannia> (дата звернення: 05.07.2025).

35. Основи мікропроцесорної техніки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vozoм.ho.ua/MP/page61.html> (дата звернення: 06.07.2025).