

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ М. І. Сідєлєв

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

на тему **«Стенд для автоматизованих досліджень гідродинамічних
характеристик пропелерів дронів.»**

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

Здобувач

А.П. Малько

«__» _____ 20__р.

Керівник роботи

д-р техн. наук,
професор

О.М. Трунов

«__» _____ 20__р.

Консультант

А.О. Алексєєва

«__» _____ 20__р.

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили

Інститут, факультет, відділення:

Комп'ютерних наук

Освітньо-кваліфікаційний рівень: рівень вищої освіти перший (бакалавр)

Напрямок підготовки 15 Автоматизація та приладобудування

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

Сідєлєв М. І.

“ ____ ” _____ 2024 р

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

1. Малько Артем

(прізвище, ім'я, по батькові)

2. Стенд для автоматизованих досліджень гідродинамічних характеристик пропелерів дронів.

3. Керівник проекту (роботи) доктор техн. наук, професор, О. М. Трунов

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ____ ” _____ 2024 р.

№ ____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 17.06. 2025

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Виробничі ділянки промислових підприємств, а також сільськогосподарські і переробні підприємства, до складу яких входять автоматизовані системи транспорту сировини, деталей та контролю все більше використовують для розв'язку таких задач індивідуальні не стандартні безпілотні апарати. Одним із вузьких місць проектування і виготовлення таких апаратів є проектування і випробування рушіїв для них. Експериментальне автоматизоване устаткування придатне для виміру і будови бази даних гідро аеродинамічних характеристик серій форм лопатевих конструкцій рушіїв різного кроку, відносного діаметру, кількості лопатей та їх форм. Вихідними даними для дослідження і проектування системи є: корпус електродвигуна із гвинтом, що кріпиться на підвісці, у вигляді вимірювальних тензобалок, які дозволяють вимірювати три компоненти вектора сили і момент сили опору навколо вісі обертання двигуна; вісьвала вертикальна; тензобалки взаємозамінні для ряду сил 0-100Н, 0-200Н, 0-1000Н; частота обертання двигуна регулюється у

діапазоні від 30 до 60 об./с; пульт керування виносний захищений; додаткове устаткування імітації вітрових потоків.

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

1) огляд сучасних підходів та автоматизованих систем просторового виміру та контролю гідро аеродинамічних характеристик серій форм лопатевих конструкцій рушіїв;_

2) обґрунтування вибору методів, моделей, апаратного забезпечення та програмного середовища розв'язку задач виміру та контролю характеристик рушіїв;

3) розробка автоматизованої системи виміру та контролю характеристик рушіїв, розробка програм виміру сил та частоти обертання;

4) моделювання динаміки елементів системи та синтез систем керування структурними елементами. Синтез ПІД регулятора СК двигуном. Перехідні процеси виходу на режим випробування рушія.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Блок-схеми систем, рисунки загальних видів елементів конструкцій, схематичні зображення, блок схеми алгоритмів програм, екранні відображення фрагментів ПЗ (скрін-шоти), осцилограми процесів результатів моделювання роботи елементів. Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завданн я прийняв
1	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	12.10.2023	
2	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.01.2025	
3	Трунов О. М., д. т. н. професор каф. АКІТ	03.04.2025	
4	Алексєєва	19.04. 2025	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної роботи

Тема: Стенд для автоматизованих досліджень гідродинамічних характеристик пропелерів дронів

№	Найменування роботи	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КДР	23.09.2024	
2.	Огляд літератури за темою роботи	01.10.2024	
3.	Складання календарного плану КДР	30.10.2024	
4.	Аналіз предметної області	01.11.2024	
5.	Розробка проєктних рішень	15.11.2024	
6.	Моделювання, конструювання та програмування СА та РТС	02.12.2024	
7.	Дослідження СА та РТС, аналіз результатів	27.12.2024	
8.	Відгук керівника КДР	14.03.2025	
9.	Оформлення КДР та презентації	18.04. 2025	
10.	Попередній захист	20.05. 2025	
11.	Рецензування	27.05. 2025	
12.	Завершення оформлення КДР та презентації	19.06.2025	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	20.06. 2025	

Здобувач _____

Малько Артем Павлович

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи

д-р техн. наук,

професор _____

**Трунов Олександр
Миколайович**

«__» _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної бакалаврської роботи

«Стенд для автоматизованих досліджень гідродинамічних
характеристик пропелерів дронів»

студента гр. 471 Малько Артема Павловича

Керівник: д-р техн. наук, професор Трунов Олександр Миколайович

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена потребою у зменшенні вартості та витрат часу, підвищенні точності, швидкості виконання та автоматизації процесів дослідження аеро- гідродинамічних характеристик пропелерів і гвинтів дронів, що є критично важливими елементами безпілотних літальних апаратів. Традиційні методи є малоефективними в умовах сучасного виробництва і не відповідають вимогам до точності, надійності та інтеграції з цифровими системами.

Метою роботи є підвищення ефективності стендів автоматизованого дослідження аеро- гідродинамічних характеристик пропелерів та гвинтів дронів шляхом застосування мобільної платформи для вимірювання осьової тяги, крутного моменту, частоти обертання та інших параметрів у режимі реального часу з використанням сучасних сенсорних і програмно-керованих засобів.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизації експериментального вимірювання та аналізу динамічних характеристик пропелерів та гвинтів у лабораторних умовах.

Предметом дослідження є моделі, методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого вимірювання параметрів пропелерів та гвинтів дронів, зокрема вимірювальні та керуючі компоненти, програмне забезпечення та синтез ПД-регуляторів.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести огляд сучасних стендів, методів та підходів до автоматизованого вимірювання гідродинамічних характеристик.

2. Обґрунтувати вибір методів, моделей, сенсорів, виконавчих пристроїв та апаратної платформи.
3. Розробити структурну і функціональну схеми системи, створити програмне забезпечення для вимірювання тяги та частоти обертання.
4. Побудувати математичну модель пропелера, виконати моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.
5. Синтезувати ПІД-регулятор для стабілізації частоти обертання двигуна.
6. Провести тестування та верифікацію роботи стенду з аналізом точності результатів.
7. Розробити рекомендації для подальшої оптимізації і удосконалення системи.

Кваліфікаційна робота містить перелік скорочень, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки.

У вступі наведено обґрунтування актуальності, визначено мету, об'єкт, предмет та завдання дослідження.

У першому розділі розглянуто сучасні підходи до автоматизованого дослідження пропелерів, класифікацію їх типів, методи вимірювання та приклади існуючих стендів.

У другому розділі обґрунтовано вибір датчиків, апаратної платформи, математичних моделей та вимог до конструкції.

У третьому розділі розроблено структуру автоматизованої системи вимірювання та керування, наведено схеми, алгоритми та програмні реалізації.

Четвертий розділ присвячено моделюванню та синтезу ПІД-регулятора, аналізу перехідних процесів і роботи системи в середовищі MATLAB/Simulink.

П'ятий розділ містить аналіз з охорони праці при роботі з електричними та обертовими елементами.

У висновках наведено результати виконання роботи, сформульовано основні досягнення та запропоновано напрями подальших досліджень.

Наукова новизна полягає у створенні універсального лабораторного стенду для дослідження гідродинамічних характеристик з цифровим збором і обробкою даних, можливістю адаптації до різних типів пропелерів та інтеграції з системами автоматичного регулювання.

Практична значимість розробленого стенду полягає у можливості його використання в навчальних лабораторіях, наукових дослідженнях і R&D-центрах для вдосконалення конструкцій пропелерів та розробки систем керування.

1. Публікація: Трунов О., Малько А., Хейна М. «Автоматизовані системи випробувань на базі мобільних робототехнічних платформ», XXI міжнародна конференція «Ольвійський форум-2025», Миколаїв, 2025 р.

Ключові слова: автоматизована система, пропелер, стенд, гідродинаміка, тяга, ПД-регулятор, моделювання, дрон, сенсори, MATLAB, керування.

Структура і обсяг роботи. Робота містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг становить 106 сторінка, містить 55 рисунків, 4 таблиці та 1 публікацію. 1. Публікація.

ANNOTATION

to the bachelor's qualification thesis

“Test Stand for Automated Research of Drone Propeller Hydrodynamic Characteristics”

by student of group 471 Artem Pavlovych Malko

Supervisor: Doctor of Technical Sciences, Professor Oleksandr Mykolaiovych Trunov

The relevance of the topic of the qualification work is due to the need to reduce the cost and time, increase the accuracy, speed of execution and automation of the processes of studying the aero-hydrodynamic characteristics of propellers and drone propellers, which are critically important elements of unmanned aerial vehicles. Traditional methods are ineffective in modern production conditions and

do not meet the requirements for accuracy, reliability and integration with digital systems.

The purpose of the work is to increase the efficiency of stands for automated research of the aero-hydrodynamic characteristics of propellers and drone propellers by using a mobile platform for measuring axial thrust, torque, rotation frequency and other parameters in real time using modern sensor and software-controlled means.

The object of the study is the processes of automation of experimental measurement and analysis of dynamic characteristics of propellers and propellers in laboratory conditions.

The subject of the study is models, methods, algorithms and technical means of automated measurement of parameters of propellers and drone screws, in particular measuring and control components, software and synthesis of PID controllers.

To achieve the goal, it is necessary to perform the following tasks:

1. Conduct a review of modern stands, methods and approaches to automated measurement of hydrodynamic characteristics.
2. Substantiate the choice of methods, models, sensors, actuators and hardware platform.
3. Develop a structural and functional diagram of the system, create software for measuring thrust and rotational speed.
4. Build a mathematical model of the propeller, perform simulation in the MATLAB/Simulink environment.
5. Synthesize a PID controller to stabilize the engine rotational speed.
6. Conduct testing and verification of the stand operation with analysis of the accuracy of the results.
7. Develop recommendations for further optimization and improvement of the system.

The thesis includes a list of abbreviations, introduction, five chapters, conclusions, references, and appendices.

The introduction presents the relevance of the topic, defines the goal, object, subject, and research tasks.

Chapter 1 reviews existing approaches, classifications of propellers, measurement methods, and examples of current test stands.

Chapter 2 substantiates the choice of sensors, hardware platform, mathematical models, and design requirements.

Chapter 3 describes the structure of the automated measurement and control system, providing diagrams, algorithms, and software implementation.

Chapter 4 focuses on modeling and PID control design, including transient analysis in MATLAB/Simulink.

Chapter 5 addresses occupational safety aspects when working with electrical and rotating components.

The conclusions summarize the work and outline the main results and directions for future improvements.

Scientific novelty lies in the development of a universal laboratory test stand with digital data acquisition and processing capabilities, adaptable to various propeller types and integrated with automatic control systems.

Practical significance of the developed system consists in its potential use in educational labs, research studies, and R&D centers for improving propeller designs and developing drone control algorithms.

1. Publications:

Trunov O., Malko A., Heina M. “Automated Testing Systems Based on Mobile Robotic Platforms”, XXI International Conference “Olbian Forum-2025”, Mykolaiv, 2025.

Keywords: automated system, propeller, test stand, hydrodynamics, thrust, PID controller, modeling, UAV, sensors, MATLAB, control.

Structure and scope: The thesis includes an introduction, five chapters, conclusions, references, and appendices. Total volume: 106 pages, 55 figure, 4 tables, and 1 publication.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРУ ГІДРО ТА АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІВ	8
1.1. Класифікація пропелерів та їх конструктивні особливості	8
1.1.1. Класифікація пропелерів за типом конструкції	8
1.1.1.1. Пропелери з однією лопаттю	8
1.1.1.2. Пропелери з двома лопатями	9
1.1.1.3. Пропелери з трьома та більше лопатями	10
1.1.2. Класифікація пропелерів за матеріалом виготовлення	10
1.1.2.1. Пропелери з пластика	10
1.1.2.2. Пропелери з карбону	10
1.1.2.3. Пропелери з композитних матеріалів	11
1.1.3. Класифікація пропелерів за принципом роботи	11
1.1.3.1. Пропелери з фіксованим кутом роботи	12
1.1.3.2. Пропелери зі змінним кутом роботи	12
1.1.4. Конструктивні особливості пропелерів	12
1.2. Методи вимірювання гідро- та аеродинамічних характеристик	13
1.2.1. Механічні методи вимірювання тяги та моменту	13
1.2.1.1. Статичне вимірювання тяги	13
1.2.1.2. Вимірювання крутного моменту	14
1.2.2. Вимірювання динамічних характеристик потоку	15
1.2.2.1. Гарячодротяна анеометрія	15
1.2.2.2. Піто-трубка	15
1.2.3. Оптичні методи	16
1.2.3.1. Метод візуалізації потоку (дим, лазер)	16
1.2.3.2. Метод PIV (Particle Image Velocimetry)	17
1.2.4. Імітаційне моделювання як доповнення до вимірювань	18
1.3. Сучасні автоматизовані стенди для дослідження пропелерів	19
1.3.1. Загальна структура автоматизованих стендів	20
1.3.2. Типи вимірювань, які реалізуються на стендах	21
1.3.3. Приклади сучасних стендів	22
1.3.4. Системи збору та обробки даних	23

1.4. Порівняльний аналіз існуючих підходів.....	24
1.4.1 Традиційні механічні стенди.....	25
1.4.2 Цифрові лабораторні системи з частковою автоматизацією.....	25
1.4.3 Повністю автоматизовані дослідницькі стенди (напр., RCbenchmark, TestStand, OpenProp)	26
1.4.4 CFD-симуляції (обчислювальна гідродинаміка)	27
1.4.5 PIV (Particle Image Velocimetry)	28
1.5. Постановка задачі розробки власного стенду	30
1.5.1. Визначення об'єкта дослідження.....	30
1.5.2. Загальна мета створення стенду.....	30
1.5.3. Вимоги до конструкції стенду.....	31
1.5.4. Пропонована архітектура стенду	32
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ, АПАРАТНОГО.....	35
2.1. Вибір принципів вимірювання тяги та частоти обертання.....	35
2.2. Вибір математичних моделей рушіїв	37
2.2.1 Емпіричні моделі	37
2.2.2 Аналітико-механістичні моделі	37
2.3 Обґрунтування вибору датчиків та мікроконтролера	41
2.3.1 Датчики вимірювання осьової тяги та моменту обертання.....	41
2.3.2 Датчик частоти обертання.....	42
2.3.3 Датчики температури (додатково)	43
2.3.4 Вибір мікроконтролера.....	44
2.4 Вибір програмного середовища для реалізації системи	45
2.5 Технічні вимоги до стенду	48
2.5.1 Вимоги до механічної частини.....	49
2.5.2 Вимоги до сенсорної системи	49
2.5.3 Вимоги до керуючої та обчислювальної системи	49
2.5.4 Вимоги до програмного забезпечення.....	49
2.5.5 Вимоги до точності.....	50
2.5.6 Ергономічні та безпекові вимоги	50
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	51
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРУ ТА КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІЇВ.....	53

3.1. Структурна схема системи виміру і контролю.....	53
3.2. Розробка апаратної частини стенду	55
3.2.1 Механічна основа стенду.....	55
3.2.2 Сенсорний модуль	56
3.2.3 Електронна частина	57
3.2.4 Двигун і рушій	58
3.3. Розробка програмного забезпечення для вимірювання тяги та частоти обертання.....	58
3.4. Візуалізація результатів досліджень	61
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3.....	63
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	65
4.1. Математичне моделювання об'єкта вимірювання.....	65
4.1.1 Загальні положення.....	65
4.1.2 Спрощена модель рушія	65
4.1.3 Модель системи вимірювання.....	66
4.1.4 Моделювання у середовищі MATLAB/Simulink.....	68
4.2 Побудова моделі системи у середовищі MATLAB/Simulink	68
4.2.1 Складові моделі системи	69
4.2.2 Реалізація моделі в Simulink.....	69
4.3.4 Аналіз результатів моделювання	70
4.4 Синтез ПД-регулятора для стабілізації обертів двигуна	71
4.4.1 Вибір методу керування	71
4.4.2 Математична модель для синтезу ПД	71
4.4.3 Реалізація у Simulink.....	72
4.4.4 Аналіз результатів симуляції	73
4.5 Аналіз перехідних процесів системи	73
4.6 Моделювання виходу системи на робочий режим.....	76
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4.....	77
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ ТА ОБЕРТОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	79
5.1.1 Електробезпека при роботі зі стендом.....	80
5.1.2 Небезпека обертових елементів	81
5.1.3 Комплексна оцінка ризиків	83

5.2	Вимоги до електробезпеки та вологозахисту	83
5.2.1	Основні нормативи електробезпеки	83
5.2.2.	Захист електрообладнання від вологи	84
5.2.3.	Мінімальні конструктивні заходи	84
5.3	Вибір засобів захисту.....	87
5.3.1	Захисний кожух пропелера.....	87
5.3.2	Захист резервуару	88
5.3.3	Електрична безпека.....	88
5.3.4	Герметизація електроніки.....	88
5.3.5	Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)	89
5.3.6	Вибір класу електрозахисту	89
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5.....		90
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК		93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		95

ВСТУП

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема дрони, стрімко набувають популярності та широко застосовуються в різних галузях – від сільського господарства й картографії до рятувальних операцій. Ефективність їх функціонування значною мірою залежить від технічних характеристик рушійної системи, зокрема пропелерів, які забезпечують створення тяги, стабілізацію та маневрування в повітрі чи воді.

Пропелери як ключовий елемент аеродинамічної (чи гідродинамічної) системи дрона визначають його вантажопідйомність, енергоефективність, стабільність польоту та здатність до маневрування. У зв'язку з цим виникає нагальна потреба в точному й надійному вимірюванні їх характеристик для вдосконалення конструкцій, оптимізації алгоритмів керування та забезпечення максимальної ефективності використання дронів у різних умовах.

Традиційні лабораторні методи дослідження тяги, моменту, частоти обертання та інших параметрів часто не відповідають сучасним вимогам щодо швидкості, точності та об'єму обробки даних. З розвитком мікропроцесорної техніки, цифрових сенсорів, комп'ютерного моделювання та засобів автоматичного регулювання стало можливим створення автоматизованих вимірювальних систем, які дозволяють досліджувати характеристики пропелерів у реальному часі з високою точністю та надійністю.

Особливої актуальності набуває розробка спеціалізованого стенду для автоматизованого вимірювання гідродинамічних (чи аеродинамічних) характеристик пропелерів дронів. Такий стенд має забезпечити точне вимірювання основних динамічних параметрів, автоматичний збір і обробку даних, а також моделювання і тестування систем керування. Інтеграція системи з засобами візуалізації, цифрової фільтрації сигналів та математичного моделювання дозволяє не лише отримувати надійні

експериментальні результати, а й адаптувати систему до різних конфігурацій пропелерів і навантажень.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРУ ГІДРО ТА АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІВ

1.1. Класифікація пропелерів та їх конструктивні особливості

Пропелери є важливими елементами безпілотних літальних апаратів (дронів), відповідальними за створення тяги, стабільність і маневреність під час польоту [1]. Для забезпечення ефективної роботи дронів необхідно ретельно вивчити характеристики пропелерів, включаючи їх конструктивні особливості та класифікацію. Пропелери можуть сильно відрізнятися за конструкцією, матеріалами, розмірами та принципами роботи, що обумовлює різноманіття в їх застосуванні [2].

У цьому підрозділі розглянуто класифікацію пропелерів за різними критеріями, зокрема за типом конструкції, матеріалом виготовлення та принципом роботи, а також їх конструктивні особливості, що впливають на ефективність роботи дронів.

1.1.1. Класифікація пропелерів за типом конструкції

Пропелери для дронів можуть бути класифіковані за кількістю лопатей, розмірами, формою та іншими конструктивними ознаками. Розглянемо основні типи пропелерів.

1.1.1.1. Пропелери з однією лопаттю

Пропелери з однією лопаттю, хоча й рідше використовуються у практиці дронів, можуть бути застосовані в спеціалізованих системах, де важливо мінімізувати обсяг та масу конструкції. Такі пропелери, як правило, мають невелику тягу і застосовуються в легких моделях дронів [1].

Приклад: Пропелер з однією лопаттю може бути застосований в дронах для зйомки відео в обмежених просторах, де необхідна висока маневреність.

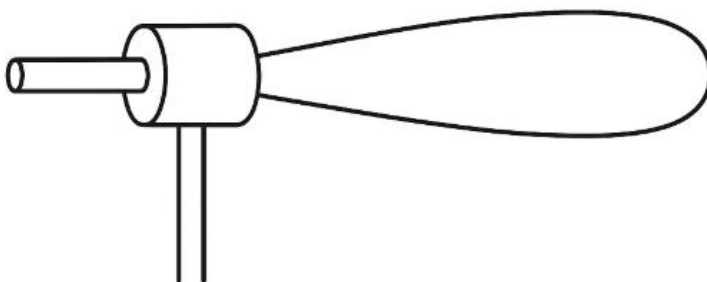


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення пропелера з однією лопаттю

1.1.1.2. Пропелери з двома лопатями

Цей тип пропелерів є одним з найбільш поширених у сучасних дронах. Пропелери з двома лопатями забезпечують більш ефективне генерування тяги при відносно невеликих розмірах і масі [2]. Вони використовуються в більшості комерційних дронів середнього класу, а також у дронів для фільмування і доставки вантажів.

Приклад: Пропелер дрону DJI Phantom 4, що використовується для аерофотозйомки.

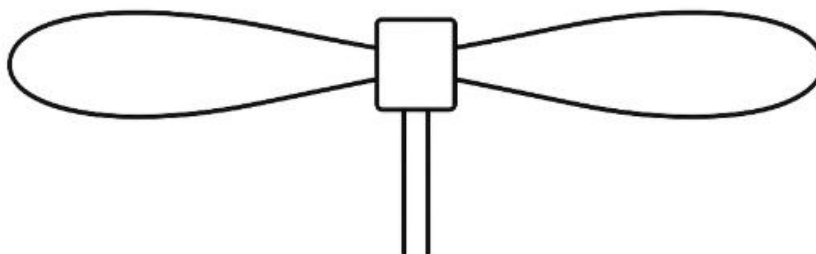


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення пропелера з двома лопатями

1.1.1.3. Пропелери з трьома та більше лопатями

Ці пропелери використовуються в більш потужних і важких дронах, де потрібна висока тяга. Збільшення кількості лопатей дозволяє зменшити навантаження на кожну лопать і поліпшити аеродинамічні характеристики пропелера. Вони також забезпечують стабільнішу роботу в умовах змінного навантаження [3].

Приклад: Пропелери для професійних дронів, таких як дрони для обробки сільськогосподарських угідь або дрони для доставки вантажів.

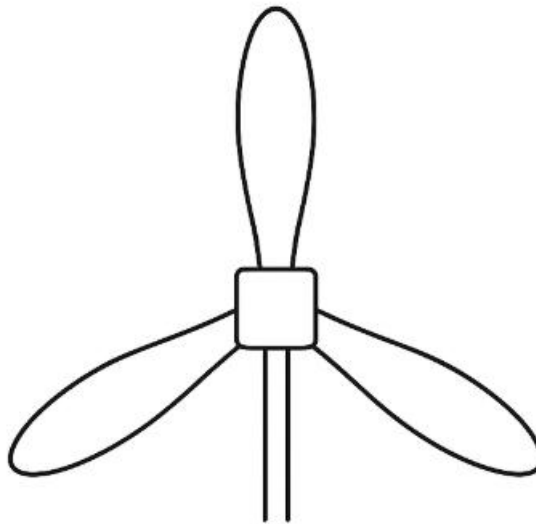


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення пропелера з трьома лопаттями

1.1.2. Класифікація пропелерів за матеріалом виготовлення

Пропелери виготовляються з різних матеріалів, що впливає на їх вагу, міцність, аеродинамічні характеристики та витривалість.

1.1.2.1. Пропелери з пластика

Пластикові пропелери є найбільш економічним варіантом і широко використовуються в моделях дронів середнього та початкового рівня. Вони легкі, але можуть бути менш стійкими до механічних пошкоджень.

Приклад: Пропелери для моделей дронів, таких як DJI Mavic Air [2].

1.1.2.2. Пропелери з карбону

Карбонові пропелери відзначаються високою міцністю при низькій масі. Вони мають високу стійкість до механічних пошкоджень і перепадів температур. Завдяки своїм властивостям вони використовуються в більш потужних та професійних дронах.

Приклад: Пропелери для дронів, які використовуються в агрономії або наукових дослідженнях [3].

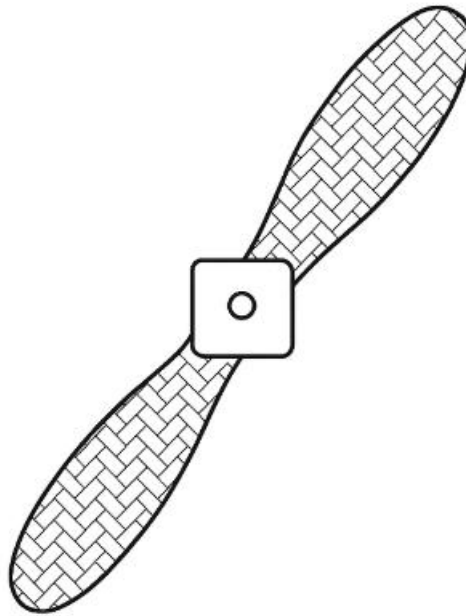


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення пропелера з карбону

1.1.2.3. Пропелери з композитних матеріалів

Комбінація матеріалів, таких як пластик з карбоном або іншими волокнами, дозволяє отримати пропелери, що поєднують легкість і високу міцність. Ці пропелери часто використовуються для дронів, які потребують високої точності та стійкості при роботі в складних умовах [3].

Приклад: Пропелери для квадрокоптерів, що використовуються для аерофотозйомки у професійних умовах.

1.1.3. Класифікація пропелерів за принципом роботи

Пропелери можуть відрізнятися за принципом своєї роботи і конфігурацією лопатей. Цей поділ важливий для оптимізації роботи дронів в різних умовах.

1.1.3.1. Пропелери з фіксованим кутом роботи

Пропелери з фіксованим кутом роботи мають постійний кут нахилу лопатей. Вони використовуються в тих випадках, коли дрон не вимагає змінного кута атаки для зміни швидкості чи тяги, і застосовуються переважно для простих моделей [2].

1.1.3.2. Пропелери зі змінним кутом роботи

Ці пропелери мають механізм, що дозволяє змінювати кут роботи лопатей під час роботи. Вони використовуються в висококласних дронах для підвищення ефективності та зменшення витрат енергії в різних умовах роботи [3].

Приклад: Пропелери для дронів, які використовуються в аерозйомці на великих висотах або в складних погодних умовах.

1.1.4. Конструктивні особливості пропелерів

Конструкція пропелерів має велике значення для забезпечення високих аеродинамічних характеристик і ефективної роботи дронів. Ось деякі важливі конструктивні особливості:

- **Форма лопатей:** Форма лопатей впливає на аеродинамічні характеристики пропелера. Для більшої тяги часто використовуються лопаті з об'ємною формою і великими кутами нахилу [1] [3].
- **Технологія виготовлення:** Виготовлення лопатей за допомогою 3D-друку або інших сучасних технологій дозволяє створювати більш ефективні конструкції з меншими витратами на матеріали.
- **Балансування:** Правильне балансування лопатей пропелера є критично важливим для стабільної роботи дрону. Невірно збалансовані лопаті можуть призводити до вібрацій і пошкоджень мотора.

1.2. Методи вимірювання гідро- та аеродинамічних характеристик

Гідродинамічні та аеродинамічні характеристики пропелерів – це ключові параметри, що визначають ефективність їхньої роботи в повітряному або рідинному середовищі. Сюди відносять зокрема силу тяги, обертовий момент, коефіцієнти підйому та опору, ефективність перетворення енергії, турбулентність потоку та інші параметри. Для вивчення цих характеристик застосовуються різноманітні експериментальні методи, які поділяються на прямі (механічні) та непрямі (оптичні, гідродинамічні тощо).

Цей підрозділ присвячено огляду сучасних методів вимірювання аеро- та гідродинамічних характеристик, що застосовуються при дослідженнях лопатевих рушіїв, з акцентом на безпілотні літальні апарати.

1.2.1. Механічні методи вимірювання тяги та моменту

1.2.1.1. Статичне вимірювання тяги

Одним із найпоширеніших способів є використання тензометричних або вагових датчиків для прямого вимірювання тяги, яку створює пропелер під час обертання в нерухомому середовищі. Такий метод дозволяє з високою точністю визначити статичну силу тяги, яка діє уздовж осі обертання.

Переваги:

- Простота реалізації
- Висока точність
- Можливість безперервного запису результатів

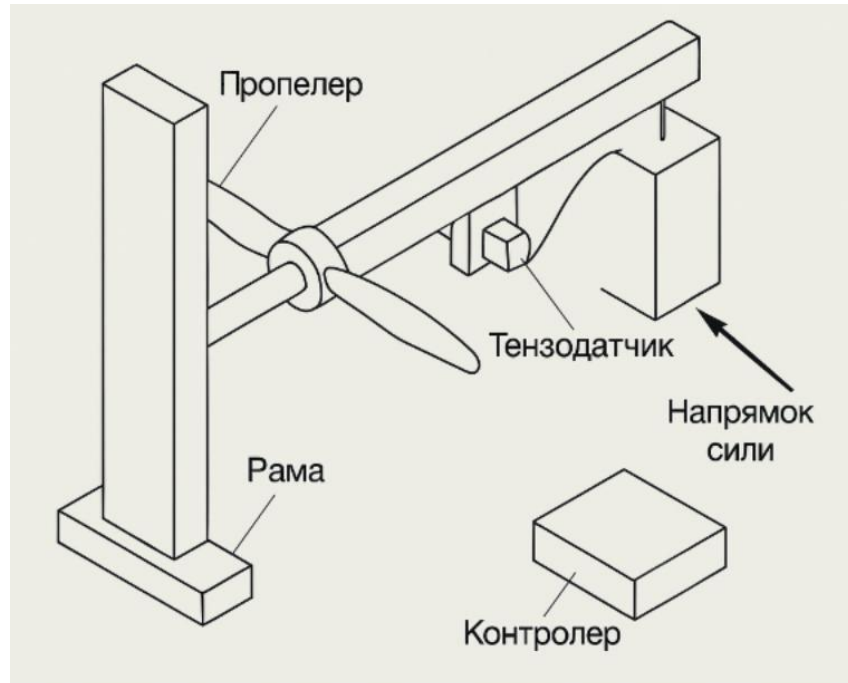


Рисунок. 1.5 – Схема встановлення тензометричного датчика на експериментальному стенді.

1.2.1.2. Вимірювання крутного моменту

Для визначення енерговитрат пропелера вимірюється обертовий момент на валу двигуна. Це зазвичай реалізується за допомогою тензометричних муфт або спеціальних динамометрів, які інтегруються у конструкцію вала.

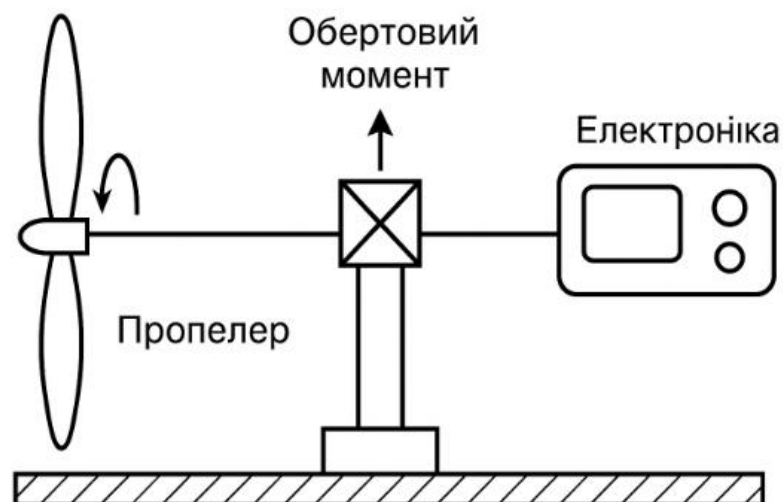


Рисунок 1.6 - Схема вимірювання крутного моменту.

1.2.2. Вимірювання динамічних характеристик потоку

1.2.2.1. Гарячодротяна анемометрія

Метод гарячодротяної анемометрії застосовується для вимірювання швидкості повітряного потоку за пропелером. Тонкий провід нагрівається і охолоджується повітряним потоком. За зміною опору провідника визначається швидкість потоку.

Переваги:

- Висока чутливість
- Вимірювання мікротурбулентностей
- Підходить для малих масштабів (безпілотники)

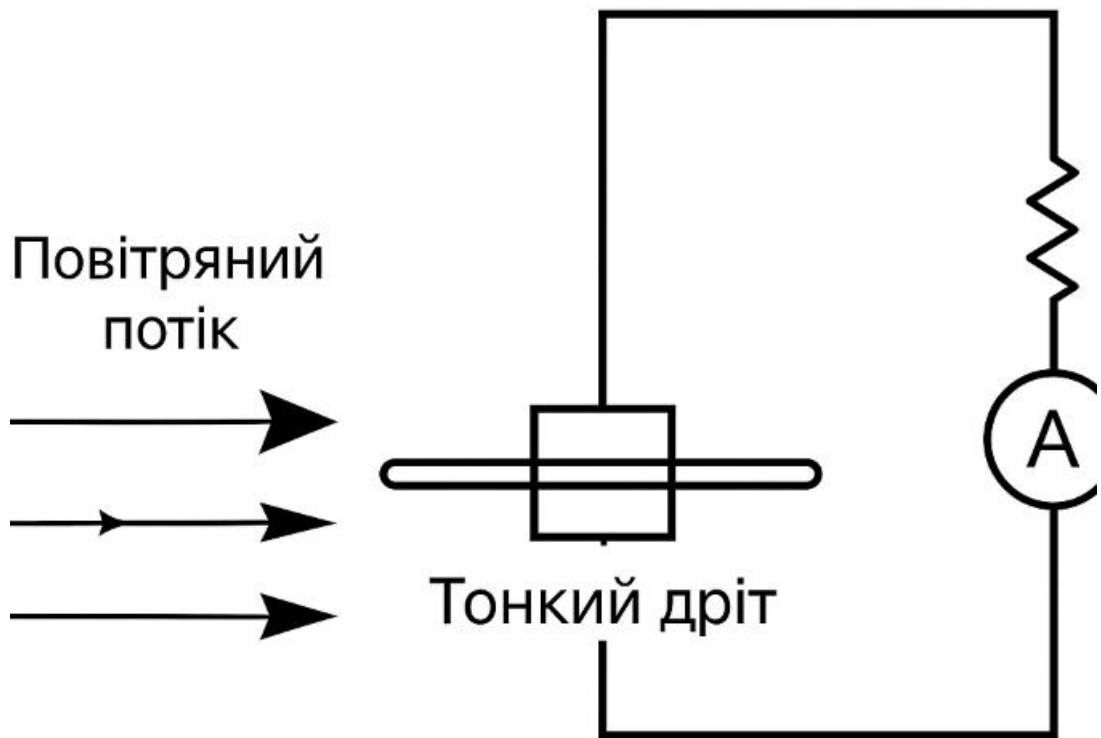


Рисунок 1.7 - Принцип роботи гарячодротяного анемометра.

1.2.2.2. Піто-трубка

Піто-трубка дозволяє вимірювати динамічний тиск у повітряному або водному потоці. Порівнюючи динамічний та статичний тиск, можна

розрахувати швидкість потоку. Цей метод широко використовується в аеродинамічних тунелях, а також на дронах для оцінки швидкості польоту.

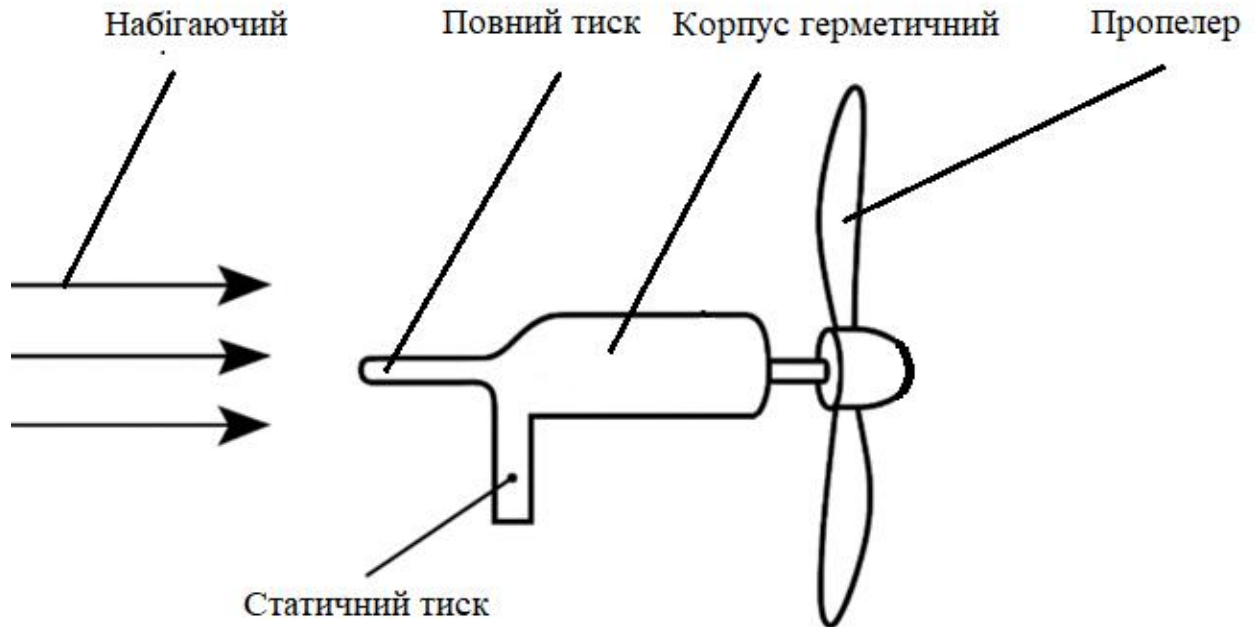


Рисунок 1.8 - Піто-трубка на моделі пропелерного стенду.

1.2.3. Оптичні методи

1.2.3.1. Метод візуалізації потоку (дим, лазер)

Оптична візуалізація потоків за допомогою диму або аерозольних частинок дає змогу якісно оцінити напрямок, симетрію та турбулентність потоку. Часто поєднується з лазерним підсвічуванням для кращої контрастності.

Переваги:

- Наочність
- Можна використати для відеозйомки та аналізу



Рисунок 1.9 – Візуалізація повітряного потоку за пропелером дрона з лазерною підсвіткою.

1.2.3.2. Метод PIV (Particle Image Velocimetry)

PIV – метод, що дозволяє визначати швидкісні поля потоку шляхом зйомки з високою частотою розпилених частинок у потоці. Потім за допомогою програмного забезпечення аналізується переміщення частинок між кадрами.

Переваги:

- Висока точність

- Просторове охоплення потоку

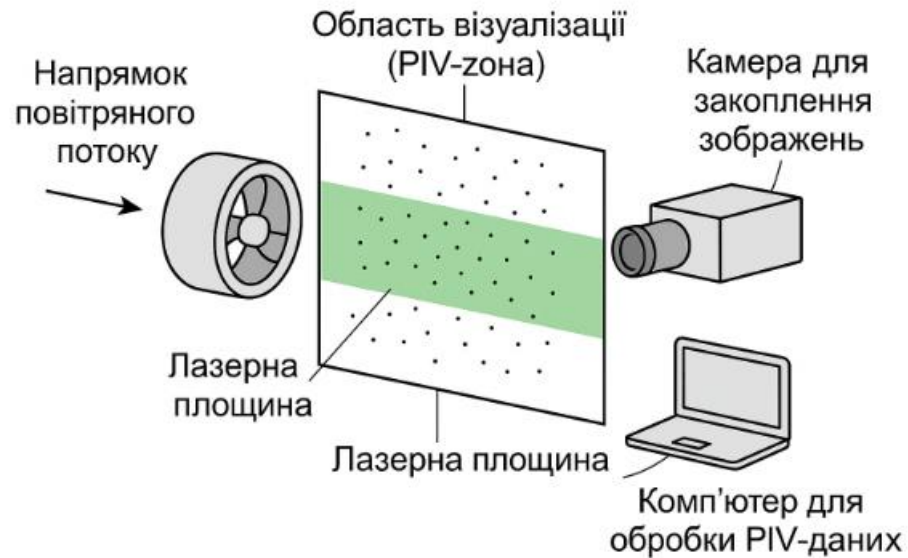


Рисунок 1.10 - Схема експериментального PIV-вимірювання.

1.2.4. Імітаційне моделювання як доповнення до вимірювань

Комп'ютерне моделювання потоків за допомогою CFD (Computational Fluid Dynamics) – це незамінний інструмент, що дозволяє на етапі проєктування оцінити гідро- чи аеродинамічну ефективність конструкції без фізичних випробувань.

Програмне забезпечення:

- ANSYS Fluent
- SolidWorks Flow Simulation
- OpenFOAM

CFD-моделювання дозволяє візуалізувати потоки, оцінити розподіл тиску, виявити області турбулентності та оптимізувати геометрію пропелера до виготовлення.

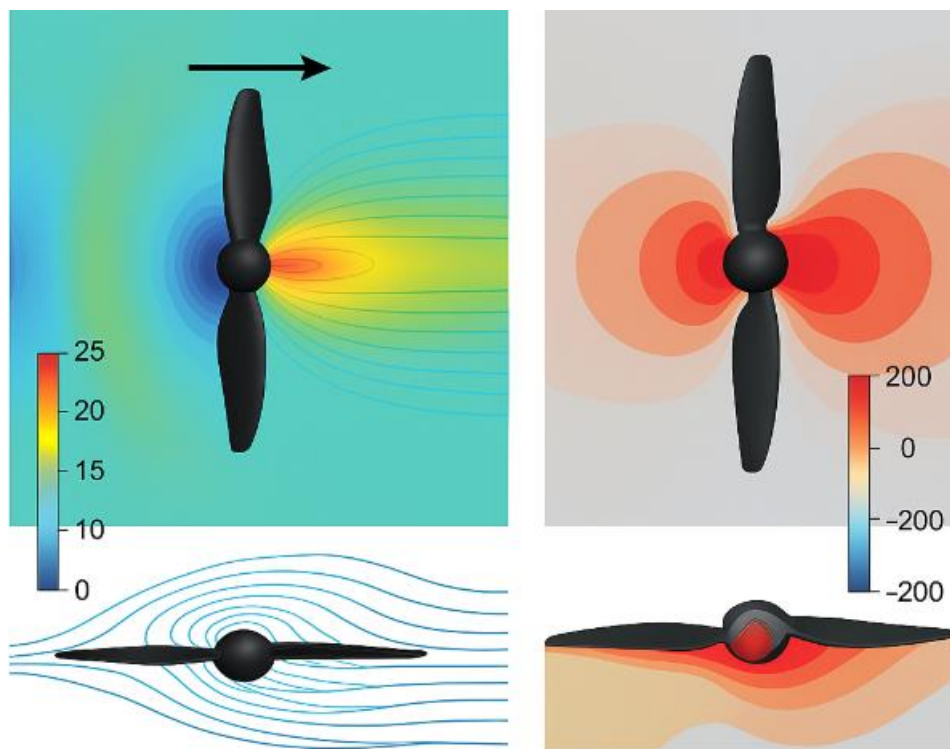


Рисунок 1.11 - CFD моделювання потоку повітря навколо пропелера дрона

На рисунку 1.11 представлено CFD-симуляцію повітряного потоку навколо пропелера дрона. Зона з підвищеною швидкістю спостерігається за лопатями пропелера, що відповідає формуванню тягової сили. Спостерігається поява вторинних виртуальних структур, характерних для турбулентного режиму потоку.

1.3. Сучасні автоматизовані стенди для дослідження пропелерів

З розвитком безпілотної авіації та підвищенням вимог до енергоефективності, надійності та точності керування БПЛА (безпілотними літальними апаратами), виникає потреба у вдосконаленні методів дослідження їхніх рушіїв, зокрема пропелерів. Одним з ключових інструментів для такого дослідження є автоматизовані стенди, які дозволяють не лише вимірювати основні аерогідродинамічні параметри, а й автоматично аналізувати поведінку рушія за різних режимів роботи. У цьому

підрозділі розглянуто сучасні типи експериментальних стендів, їхню структуру, функціональні можливості та приклади застосування.

1.3.1. Загальна структура автоматизованих стендів

Сучасні стенди для дослідження пропелерів, як правило, складаються з наступних основних блоків:

- Механічна платформа з кріпленням для пропелера;
- Датчики сили тяги та обертового моменту (тензодатчики, тензомуфти);
- Датчики швидкості обертання (оптичні або магнітні енкодери);
- Система керування двигуном (частотні перетворювачі, драйвери з PID-регуляцією);
- Комп'ютерна система збору та обробки даних з ПЗ (LabVIEW, MATLAB, Arduino IDE тощо).

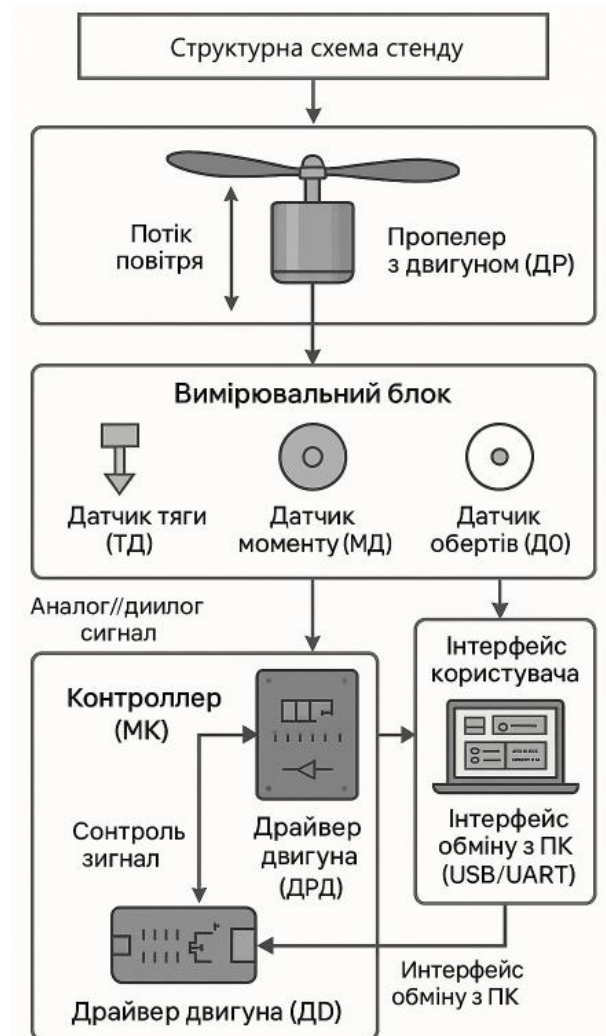


Рисунок 1.12 – Структурна схема сучасного автоматизованого стенду для дослідження пропелерів.

1.3.2. Типи вимірювань, які реалізуються на стендах

Автоматизовані стенди дозволяють проводити наступні типи вимірювань: Статичні вимірювання: тяга, крутний момент, швидкість обертання при фіксованих навантаженнях.

Динамічні вимірювання: аналіз поведінки рушія при зміні вхідного сигналу (наприклад, перехідний процес під час запуску).

Вимірювання ефективності: розрахунок ККД пропелера на основі отриманих даних.

Аеродинамічні параметри: шляхом додаткових методів, таких як анемометрія або PIV-аналіз.

1.3.3. Приклади сучасних стендів

1. Propeller Test Stand v2 (Open Source UAV project):

Використовує тензодатчики для вимірювання тяги та моменту, Arduino для збору даних та графічне середовище для відображення.

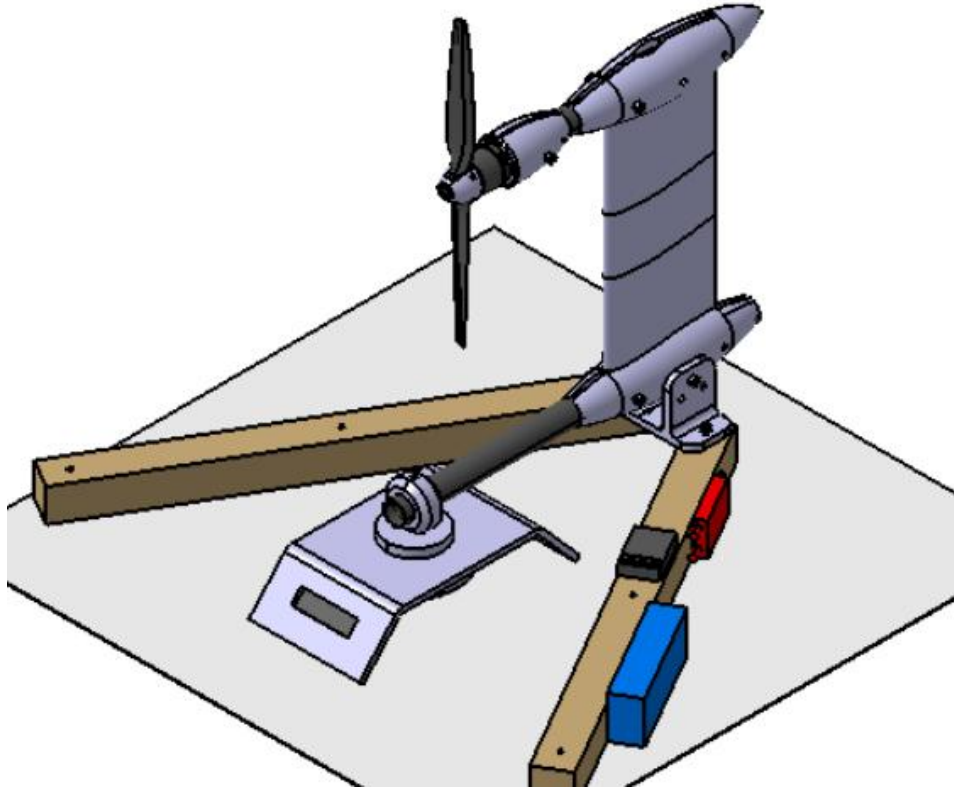


Рисунок 1.13 – Приклад стенду Propeller Test Stand v2.

2. Stuttgart Propeller Test Bench (Університет Штутгарта):

Оснащений системою PIV-аналізу, камерою високої швидкості та комп'ютеризованим приводом. Застосовується для тестування мікропропелерів у воді та повітрі.

3. Thrust Stand X from RCbenchmark:

Комерційний стенд для тестування малих пропелерів (до 5 кг тяги), має інтерфейс USB, ПЗ для аналізу, відкритий API.

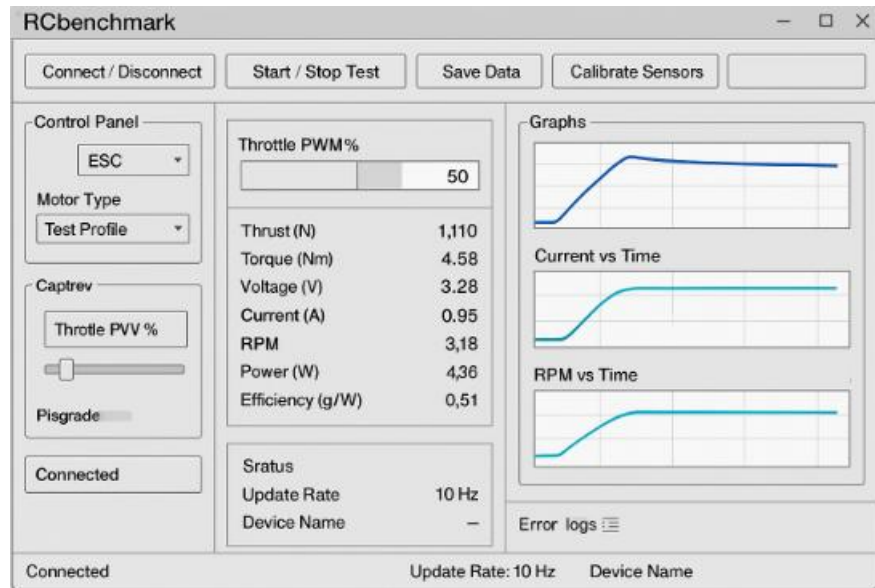


Рисунок 1.14 – Інтерфейс ПЗ RCbenchmark.

1.3.4. Системи збору та обробки даних

ПЗ відіграє ключову роль у функціонуванні стендів. В сучасних системах використовуються:

- LabVIEW – для інтерактивного візуального контролю та управління;
- MATLAB/Simulink – для моделювання та обробки сигналів;
- Python – у DIY-системах із використанням бібліотек для збору даних з UART/USB-портів;
- Arduino IDE або STM32Cube – при побудові власного мікроконтролерного рішення.

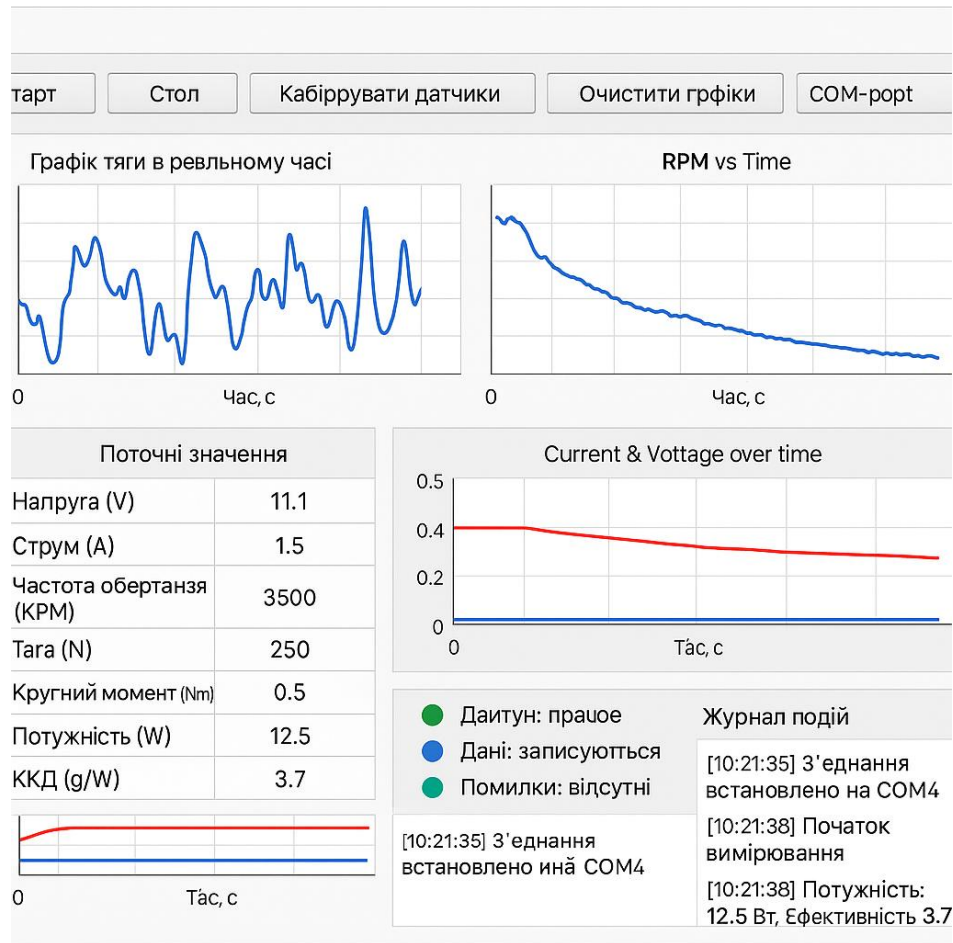


Рисунок 1.15 – Приклад інтерфейсу системи збору та обробки даних.

1.4. Порівняльний аналіз існуючих підходів

Сучасна інженерна практика дослідження гідро- та аеродинамічних характеристик пропелерів базується на низці методів, що відрізняються за точністю, складністю, вартістю та рівнем автоматизації. У зв'язку з розвитком безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зростає потреба у швидких, гнучких і високоточних системах вимірювання, що забезпечують достовірну оцінку ефективності пропелерів у різних умовах. У цьому підрозділі виконується порівняльний аналіз основних підходів, що застосовуються у сучасних автоматизованих системах для дослідження тягових та обертальних характеристик пропелерних рушіїв.

Основна частина

Серед актуальних підходів до вимірювання аеро- та гідродинамічних характеристик виділяють наступні:

1.4.1 Традиційні механічні стенди

Ці стенди використовують механічні важелі, динамометри, тахометри та аналогові прилади. Переваги – простота конструкції та низька вартість. Недоліки – низька точність, відсутність автоматизації, складність у зберіганні та обробці результатів.

Приклад: стенд з ручним зчитуванням сили тяги за допомогою пружинного динамометра.

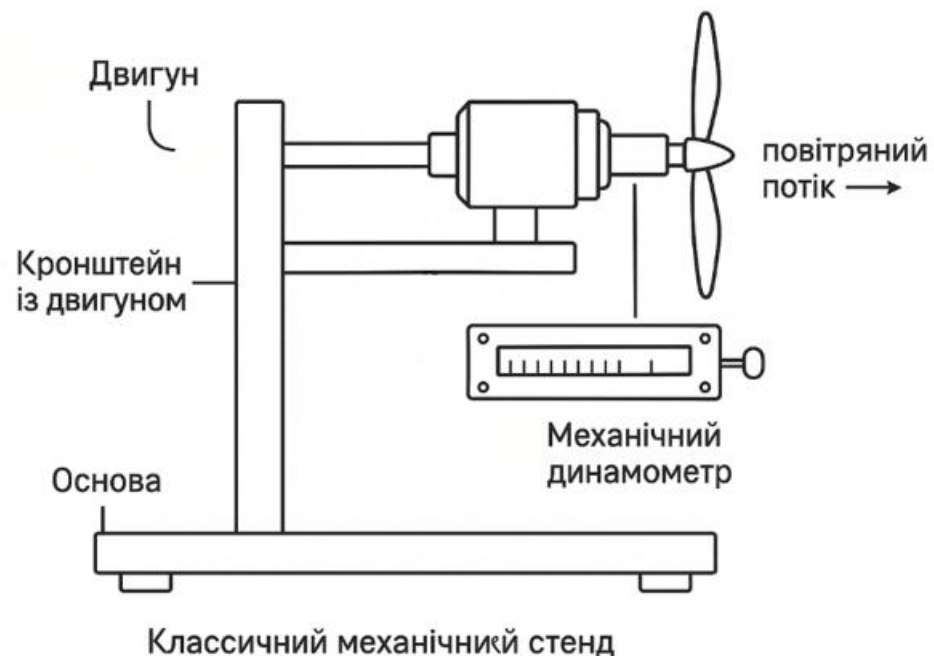


Рисунок 1.16 – Класичний механічний стенд з динамометром пружинного типу.

1.4.2 Цифрові лабораторні системи з частковою автоматизацією

Ці системи передбачають використання тензодатчиків, датчиків RPM, плати Arduino або STM32, з подальшою передачею даних до ПК. Дані виводяться через COM-порт у вигляді числових значень або у вигляді простих графіків (наприклад, у Serial Plotter).

- Часто застосовуються в навчальних лабораторіях технічних ЗВО.

- Доступна реалізація, висока адаптивність, але потребує ручного налаштування ПЗ.

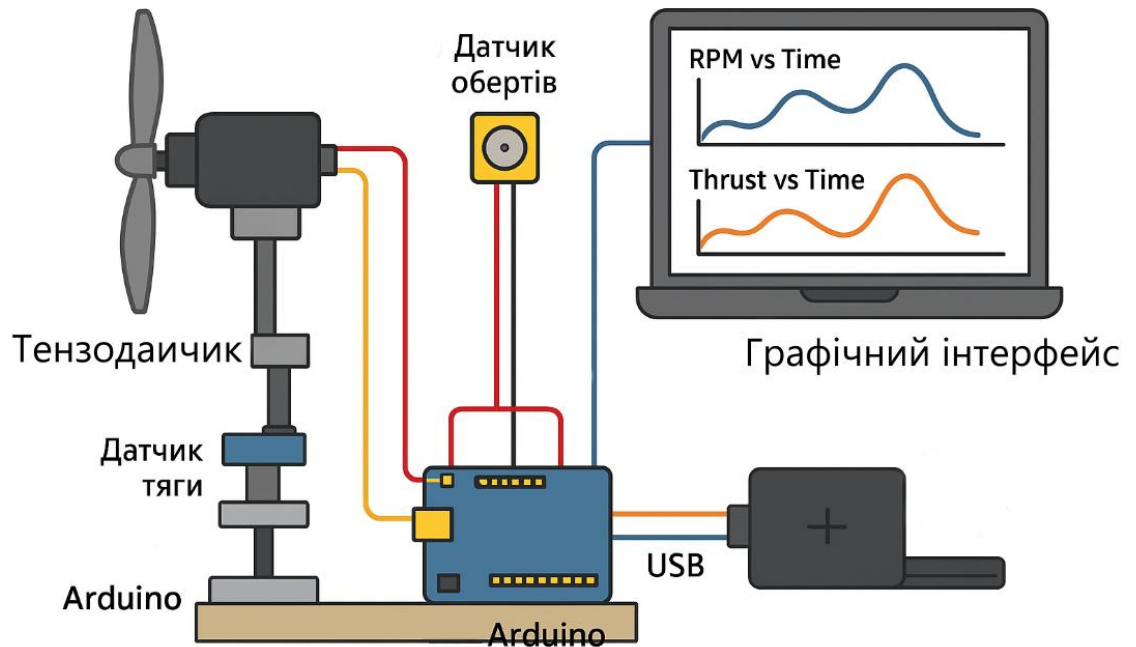


Рисунок 1.17 – Напівавтоматизований стенд на базі Arduino з базовим графічним інтерфейсом.

1.4.3 Повністю автоматизовані дослідницькі стенди (напр., RCbenchmark, TestStand, OpenProp)

Це сучасні рішення, які забезпечують високоточне зчитування тяги, обертового моменту, струму, напруги та обертів. Системи включають інтерфейси збору, збереження, візуалізації та обробки даних, автоматичну калібровку та PID-регулювання швидкості двигуна.

- Застосовуються в промислових лабораторіях, R&D-відділах.
- Мінуси: висока вартість та залежність від комерційного ПЗ.

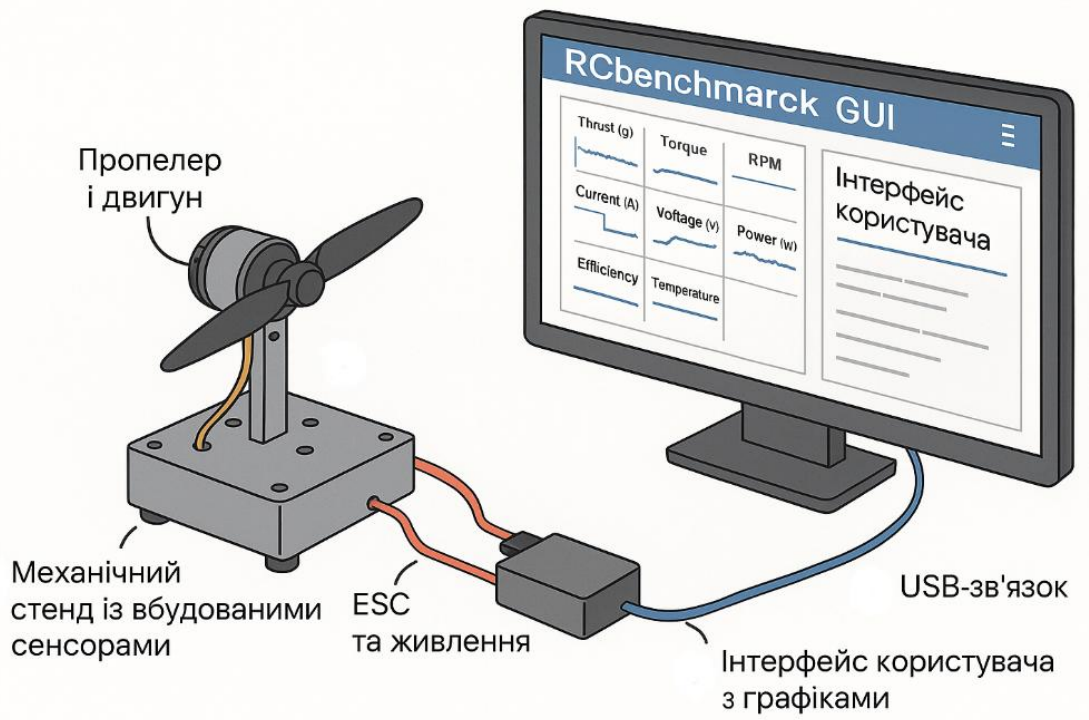


Рисунок 1.18 – Стенд RCbenchmark Series 1580 з графічним інтерфейсом.

1.4.4 CFD-симуляції (обчислювальна гідродинаміка)

CFD-моделювання дає змогу попередньо оцінити характеристики пропелерів без фізичних вимірювань, з використанням ANSYS Fluent, SolidWorks Flow Simulation, SimScale тощо. Метод дозволяє побачити ізолінії швидкості, розподіл тиску, турбулентні зони, однак потребує високої обчислювальної потужності та кваліфікації користувача.

- Ідеально підходить для етапу проєктування або попередньої оптимізації.

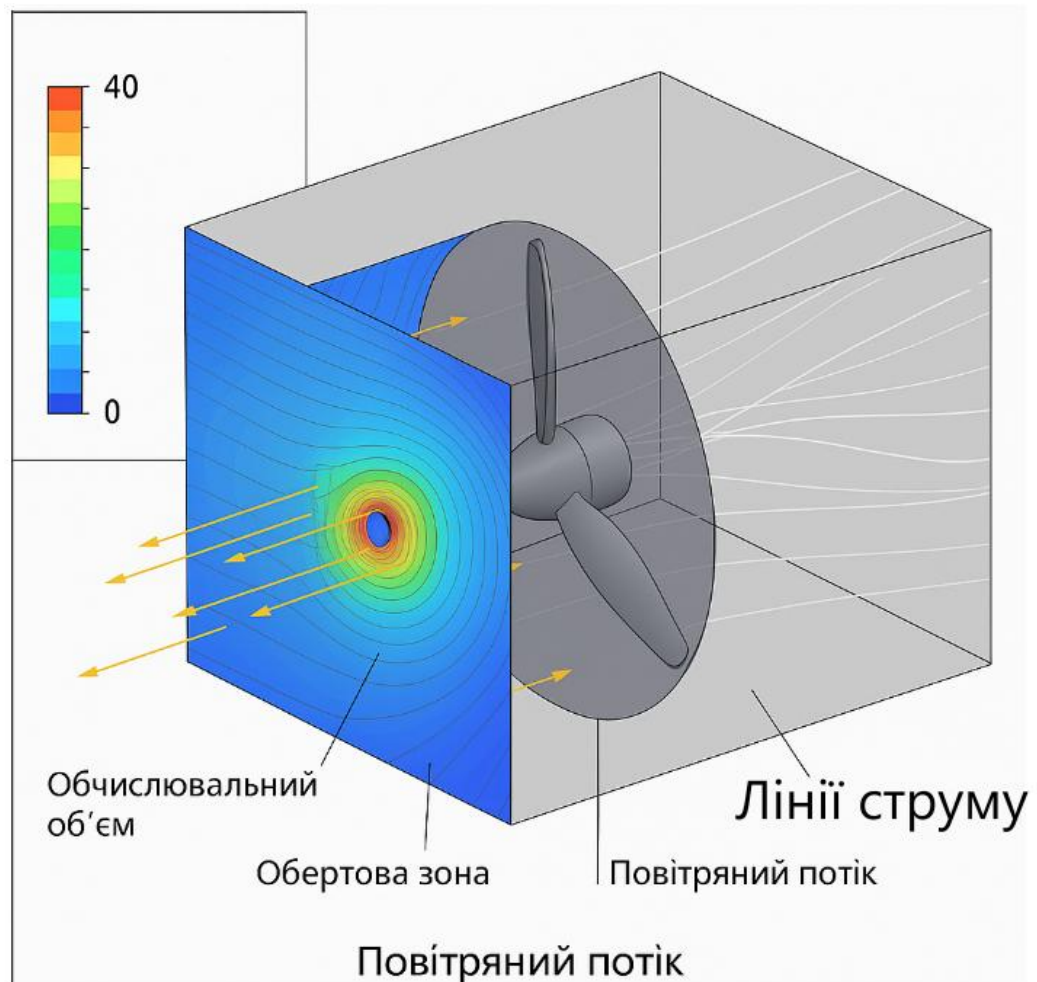


Рисунок 1.19 – CFD-аналіз повітряного потоку навколо пропелера у SolidWorks Flow Simulation.

1.4.5 PIV (Particle Image Velocimetry)

Метод дозволяє оптично вимірювати швидкість повітря або рідини, розпорошуючи у середовищі мікрочастинки та використовуючи камеру з лазерною підсвіткою. Висока точність, але дорога апаратура і складність в налаштуванні.

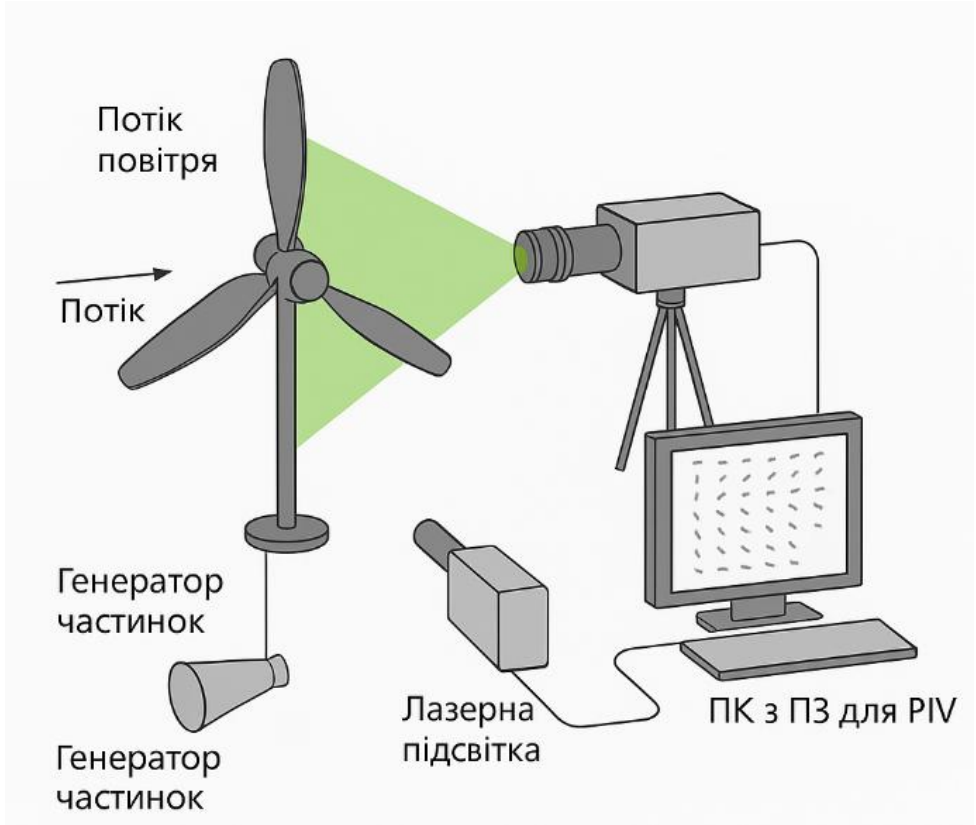


Рисунок 1.20 – Схема вимірювання швидкостей методом PIV.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика підходів

Підхід	Точність	Вартість	Автоматизація	Складність	Призначення
Механічний стенд	Низька	Низька	Відсутня	Низька	Навчання, базові стенди
Arduino-система	Середня	Низька	Часткова	Середня	Лабораторні дослідження
RCbenchmark/TestStand	Висока	Висока	Повна	Середня	R&D, тестування серій

CFD-симуляція	Висока	Середня	Повна (віртуаль- на)	Висока	Проектува ння, аналіз
PIV	Дуже висока	Дуже висока	Повна	Дуже висока	Академічні досліджен ня

1.5. Постановка задачі розробки власного стенду

Сучасні технології створення безпілотних апаратів дедалі частіше вимагають проведення експериментальних досліджень не лише в умовах повітряного середовища, а й у водному або змішаному середовищі, зокрема для дронів амфібійного або підводного призначення. У цьому контексті дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів набуває критичного значення.

Більшість існуючих стендів та методик вимірювання орієнтовані на аеродинамічні показники – тягу, момент, ефективність у повітрі, тощо. Однак вимірювання гідродинамічної сили, крутного моменту, частоти обертання, ефективності гвинта у воді вимагає принципово іншого підходу до побудови експериментального обладнання. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці автоматизованого стенду, призначеного спеціально для дослідження гідродинаміки пропелерів у лабораторних умовах.

1.5.1. Визначення об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є пропелерні гвинти, що працюють у воді – типові для підводних БПЛА або гібридних дронів. Особливості роботи у воді вимагають врахування таких параметрів:

- Щільність і в'язкість рідини;
- Кавітаційні явища;
- Лінійна та турбулентна поведінка потоку;
- Взаємодія гвинта з опорами та корпусом.

1.5.2. Загальна мета створення стенду

Мета – розробити універсальний автоматизований стенд, здатний виконувати дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів у рідинному середовищі, із наступними функціями:

- Вимірювання осьової тяги та обертового моменту;
- Вимірювання частоти обертання та електричних параметрів;
- Автоматичний збір та обробка даних;
- Побудова характеристичних кривих: тяга-швидкість, момент-швидкість, ККД тощо.

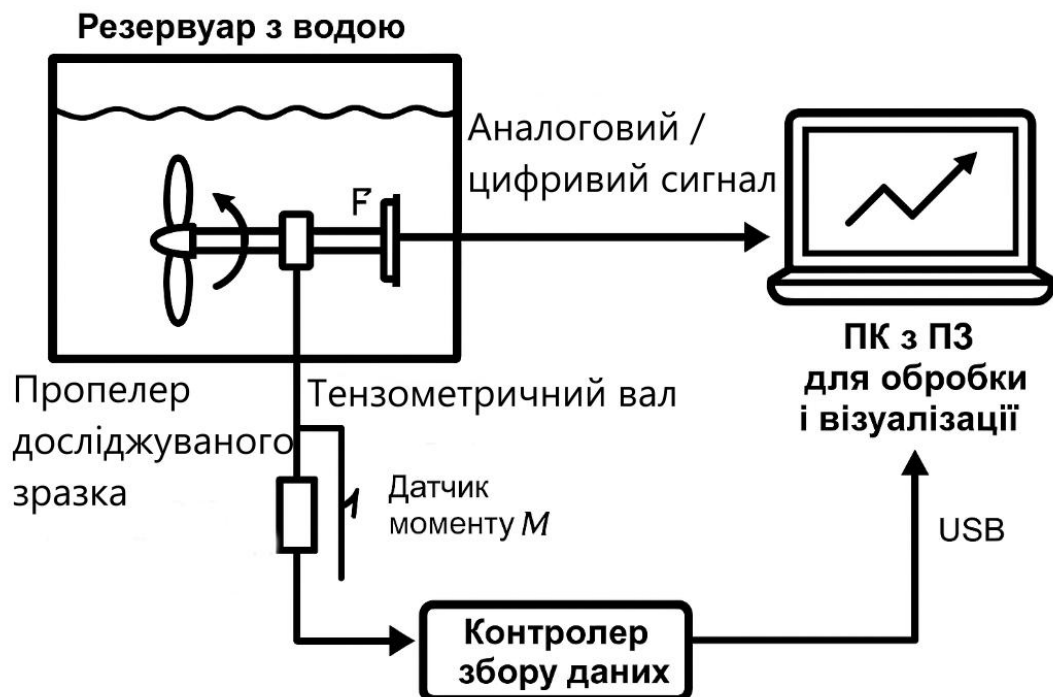


Рисунок 1.21 – Узагальнена схема функціонального призначення стенду для вимірювання гідродинамічних параметрів

1.5.3. Вимоги до конструкції стенду

При проектуванні необхідно враховувати такі вимоги:

- Герметичність та захист від корозії (електроніка має бути ізольована);
- Механічна стабільність платформи, щоб мінімізувати похибки вимірювання;

- Універсальність для встановлення різних типів пропелерів (з різною кількістю лопатей, діаметрами тощо);
- Можливість занурення у воду або роботи в проточній гідродинамічній трубі (опційно);
- Інтеграція з ПЗ для виводу даних у режимі реального часу.

1.5.4. Пропонована архітектура стенду

Основні компоненти:

- Механічний модуль: з тензомуфтою та динамометричними датчиками;
- Електронна система: мікроконтролер, аналого-цифрові перетворювачі, блок живлення;
- Програмна частина: GUI на основі, наприклад, Python (PyQt) або LabVIEW;
- Рідинний резервуар або гідроканал, де створюється контрольований потік.

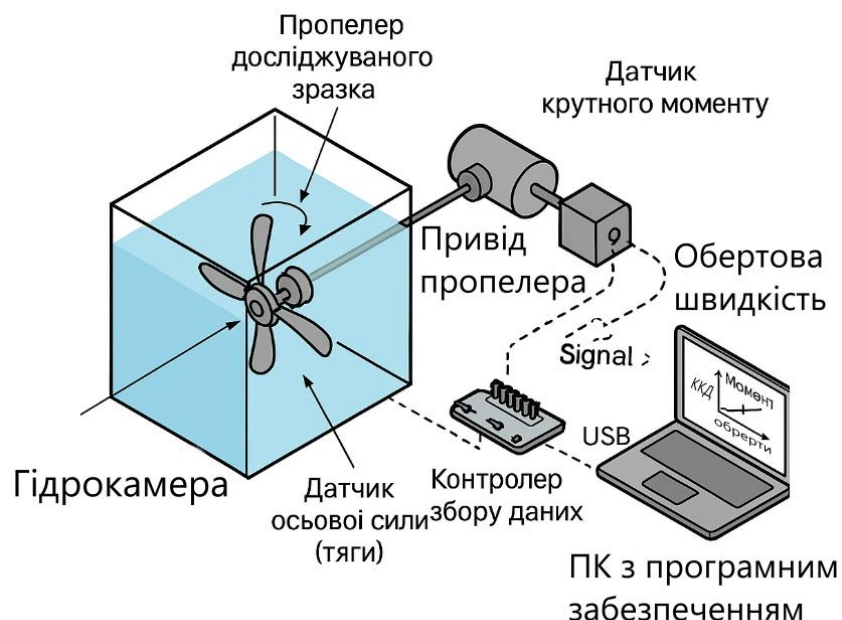


Рисунок 1.22 – Концепція стенду з гідрокамерою, пропелером і датчиками

Таким чином, на підставі проведеного аналізу встановлено, що широкий перелік типів пропелерів і методів їх дослідження потребує виміру і експериментального уточнення їх характеристик. Вибір конкретного типу геометричних форм залежить не лише від тяги чи матеріалу, а й від того, де і як саме буде використовуватись дрон. Наприклад, якщо ми проєктуємо легку модель для навчання – пластиковий дволопатевий пропелер буде і дешевим, і простим у заміні. У зв'язку з цим для професійного агродрона виникає задача підсилювати лопаті за допомогою карбону та вводити трилопатевий варіант, що буде потребувати експериментальних випробувань.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

1. Наявність стенду експериментального виміру характеристик пропелеру або гвинта відкриває можливості для дослідження та порівняння, оскільки дрібні зміни у геометрії можуть суттєво впливати на їх ефективність. Існуючі автоматизовані дослідницькі стенди RCbenchmark, TestStand, OpenProp та RCbenchmark Series 1580 з графічним інтерфейсом демонструють як зміна довжини, ширини лопаті або її нахилу суттєво змінює розподіл потоку та інтегральні характеристики пропелеру.
2. За даними аналізу найзручнішими визначаються статичні вимірювання тяги. Просте підключення у мостову схему чотирьох тензодатчиків, що встановлено на тензобалці, дозволяє проводити вимір сили. Крім того, їх спеціальне розташування на визначеній відстані від вісі дозволяє вимірювати момент сили відносно цієї вісі. Означене демонструє переваги тензометричного виміру сил і моментів сил у порівнянні із оптичними методи, типу PIV або візуалізація димом, які виглядають ефектно, але для практичної реалізації потребуватимуть спеціальної підготовки персоналу та більше обладнання і досвіду.
3. Візуальне CFD-моделювання – дозволяє одразу побачити, лінії току і зони завихрень, які необхідно усувати. Це економить час стендових випробуваннях,

при необхідності тестувати кілька форм пропелерів, коли кожна з них виготовляється вручну.

4. Відкриті рішення типу Propeller Test Stand v2 – є не дорогим рішенням з широкими функціями для автоматизованих досліджень на базі Arduino для налаштувань зчитування і навіть реалізувати просту систему входу.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ, АПАРАТНОГО

2.1. Вибір принципів вимірювання тяги та частоти обертання

У системах дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів, особливо для дронів цивільного призначення, точне вимірювання осьової тяги та частоти обертання є критично важливим [5]. Ці параметри безпосередньо визначають ефективність рушія в середовищі та дозволяють оцінити його продуктивність і гідродинамічний ККД. У цьому підрозділі обґрунтовано вибір фізичних принципів, за якими вимірюються зазначені величини, а також наведено переваги застосування відповідних сенсорних систем у контексті автоматизованих досліджень.

Вимірювання осьової тяги

Осьова тяга, що генерується пропелером у рідинному середовищі, зазвичай вимірюється за допомогою тензометричних датчиків сили [6], які мають достатню чутливість і стійкість до впливу вологості.

Обраний принцип: деформація еластичного елемента під дією сили тяги з подальшою реєстрацією зміни електричного опору тензорезисторів. Це дозволяє зчитувати осьову силу в реальному часі.

- Приклад реалізації: тензодатчик, вмонтований у монтажний вузол пропелера, калібрується на відомих навантаженнях і підключається до аналогово-цифрового перетворювача на контролері.

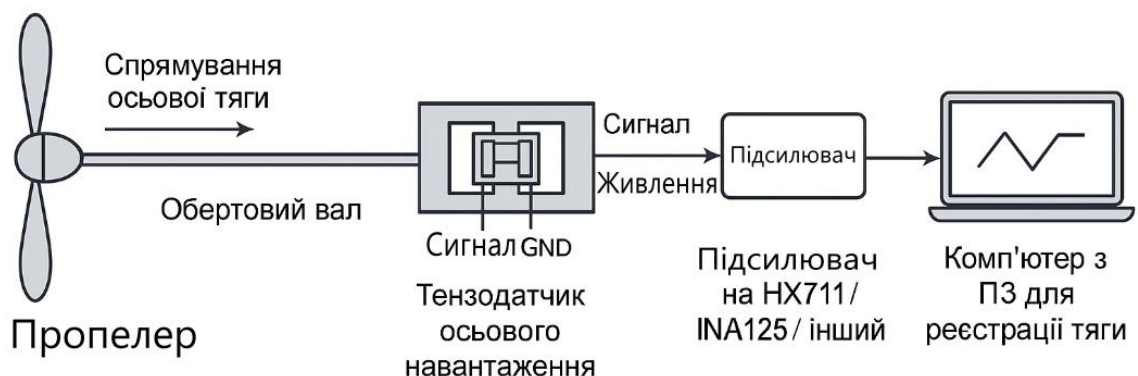


Рисунок 2.1 – Принципова схема вимірювання осьової тяги за допомогою тензодатчика

- Точність вимірювання: 1–3% від номіналу [2].

Вимірювання частоти обертання

Частота обертання вала пропелера є ключовим динамічним параметром. У випадку малогабаритних систем доцільно застосовувати оптичні або магнітні сенсори [6], що забезпечують високу точність без прямого контакту з валом.

Обраний принцип: підрахунок імпульсів від інфрачервоного оптичного датчика або датчика Холла з магнітним тригером на валу.

- Приклад реалізації: диск з прорізами або магніт встановлюється на обертовому елементі; датчик реєструє імпульси і передає їх на мікроконтролер, який розраховує частоту обертання.

- Точність: $\pm 1\%$ при частоті до 10 000 об/хв. [2].

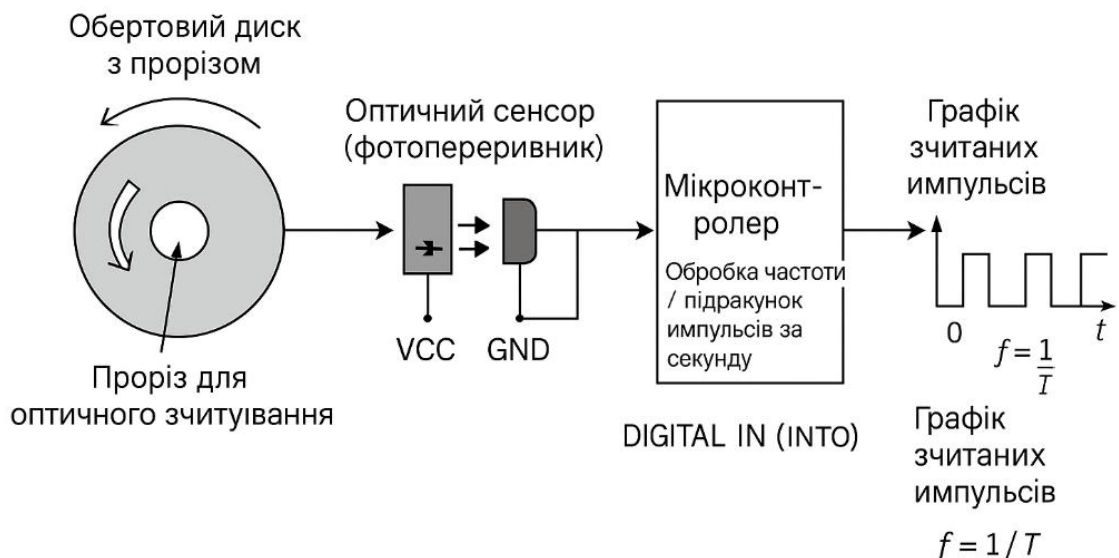


Рисунок 2.2 – Схема зчитування частоти обертання з використанням оптичного сенсора

2.2. Вибір математичних моделей рушіїв

У контексті розробки експериментального стенду для дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів дронів, математичне моделювання є необхідною складовою для аналізу, прогнозування та оптимізації поведінки гвинтових рушіїв у водному середовищі. Використання коректних математичних моделей дозволяє не лише зменшити обсяг фізичних експериментів, а й підвищити точність вимірювань та ефективність аналізу експериментальних даних [3][4]. У цивільному секторі (наприклад, для підводних роботів, дронів-спостерігачів, дронів для інспекції водойм тощо) правильне описання взаємодії гвинта з водою має ключове значення для проектування економічних і стабільних систем.

Класифікація моделей

Математичні моделі рушіїв поділяються на дві основні групи:

2.2.1 Емпіричні моделі

Створюються на основі обробки результатів натурних або стендових випробувань. Вони простіші у реалізації, але менш універсальні.

Приклад: використання коефіцієнтів тяги K_T , моменту K_Q і ефективності η [4], що визначаються експериментально в залежності від режиму обертання і швидкості потоку.

2.2.2 Аналітико-механістичні моделі

Ґрунтуються на законах механіки рідини. Вони дозволяють враховувати вплив форми лопатей, кута атаки, в'язкості, турбулентності та інших факторів.

Модель лінійного диску рушія (Actuator Disk Model)

Ця модель широко використовується для первинної оцінки характеристик гвинтових рушіїв. Вона ідеалізує пропелер як тонкий диск, який створює рівномірний тиск на потік.

Основне рівняння тяги:

$$T = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

Де $\dot{m}$ – масова витрата рідини, V_1 і V_2 – швидкості потоку до і після диска [3].

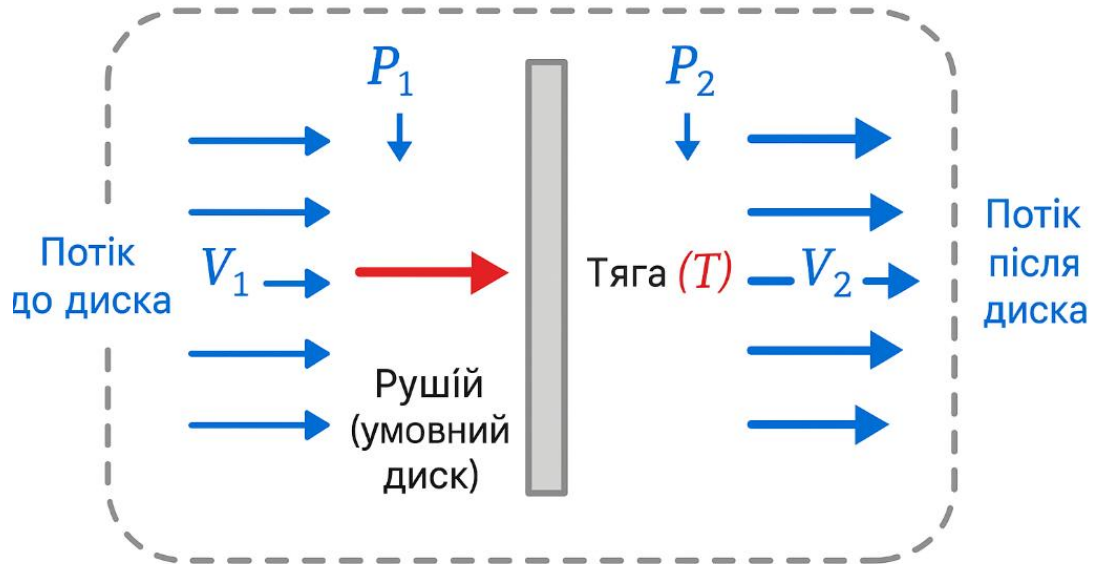


Рисунок 2.3 – Модель рушія у вигляді діючого диска (Actuator Disk Model)

Модель Blade Element Theory (BET)

Ця модель розбиває лопать пропелера на невеликі елементи вздовж радіуса і обчислює сили для кожного з них з подальшою інтеграцією по довжині лопаті.

Основні параметри:

- Кут атаки
- Локальна швидкість потоку
- Коефіцієнти підйомної та лобової сили (C_l , C_d)

Дає можливість змоделювати пропелер з індивідуальними геометричними параметрами [3].

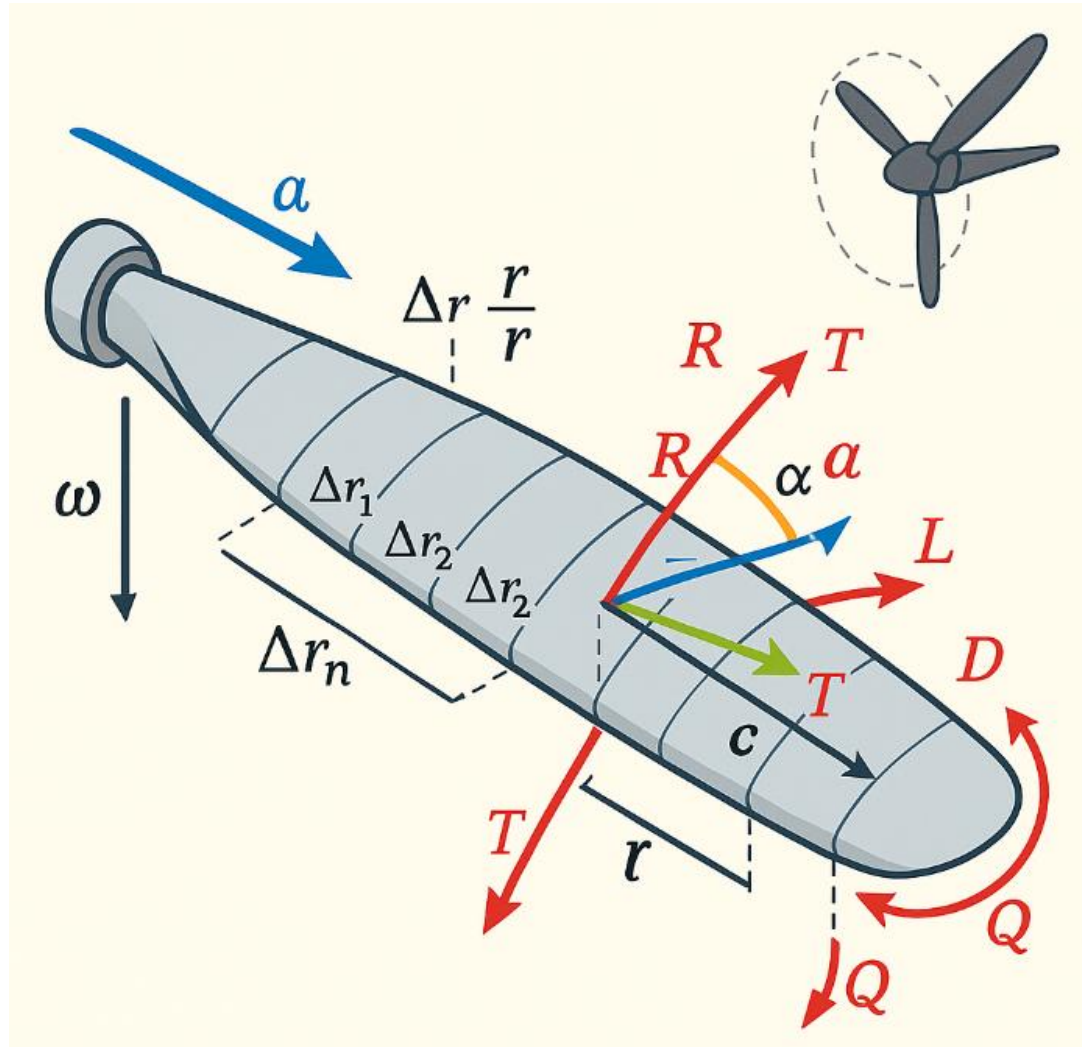


Рисунок 2.4 – Схема розбиття лопаті на елементи в BET

CFD-орієнтовані моделі

Використання чисельного моделювання (CFD) у SolidWorks Flow Simulation або ANSYS Fluent дозволяє отримати ізолінії швидкості, тиску, турбулентності навколо пропелера у воді. Такі симуляції допомагають валідувати спрощені математичні моделі.

- Плюси: висока точність
- Мінуси: ресурсоємність, тривалість розрахунків

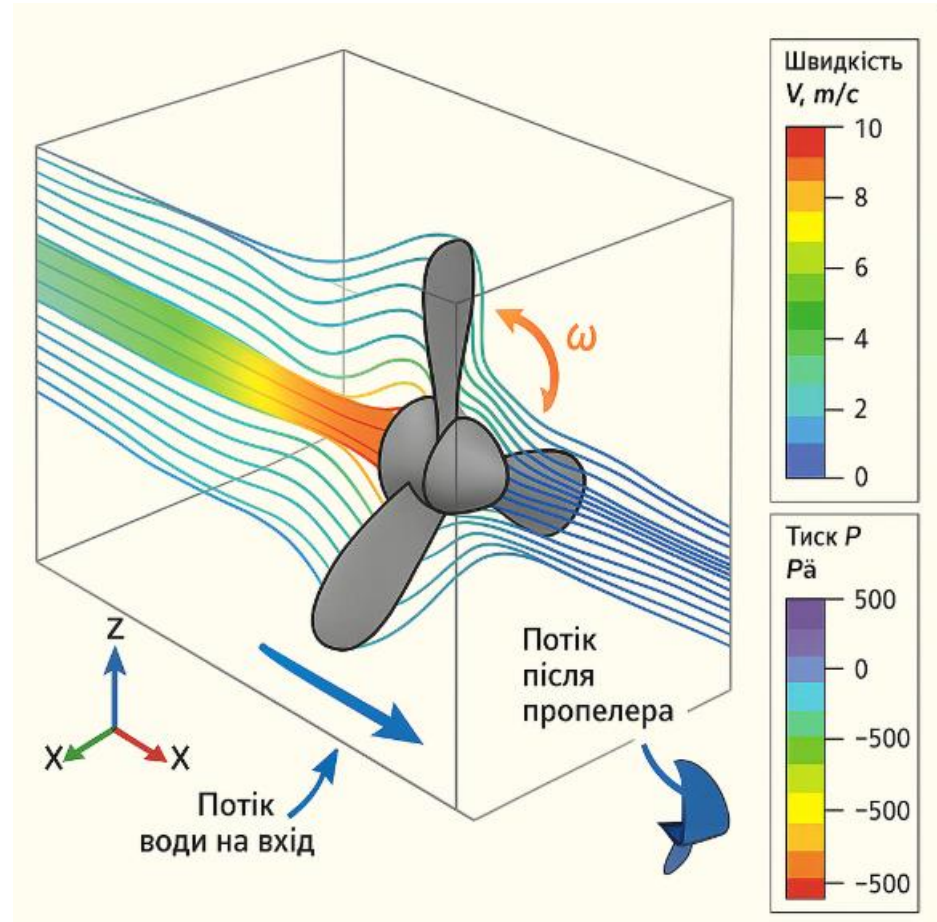


Рисунок 2.5 – CFD- модель гідропотоку навколо пропелера дрона у SolidWorks Flow Simulation

Модель для стендових вимірювань у воді [3]

Окрема увага приділяється моделі взаємозв'язку між обертовим моментом, тягою та швидкістю в умовах нерухомого резервуару.

Визначення коефіцієнтів тяги K_T та моменту K_Q виконується за формулами: $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$, $K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$

де:

- T – тяга (Н)
- Q – момент (Н·м)
- ρ – густина води
- n – оберти (об/с)

- D – діаметр пропелера.

2.3 Обґрунтування вибору датчиків та мікроконтролера

Ефективність та точність експериментальних вимірювань у дослідженнях гідродинамічних характеристик пропелерів дронів напряму залежить від якості та відповідності обраних датчиків і мікроконтролера вимогам конкретної задачі. У цивільному застосуванні, зокрема для моніторингу підводних апаратів або безпілотних платформ у рідкому середовищі, критично важливими є параметри тяги, моменту обертання та швидкості обертання пропелера. У цьому підрозділі наведено обґрунтування вибору вимірювальних елементів та засобів обробки даних для автоматизованого стенду.

2.3.1 Датчики вимірювання осьової тяги та моменту обертання

Для вимірювання сили осьової тяги та крутного моменту доцільно використати тензометричні датчики. Вони мають високу точність, компактність і здатні забезпечити стабільні результати при тривалому зануренні у воду [6].

Обраний тип:

- S-type тензодатчик (напр., модель CZL301C або аналог)

Основні характеристики:

- Діапазон: до 50 Н
- Чутливість: $\sim 2 \text{ mV/V}$
- Клас захисту: IP65+

Переваги:

- Можливість встановлення у підвішеному або горизонтальному положенні.
- Зручність калібрування.
- Сумісність з тензоусилювачами (наприклад HX711).

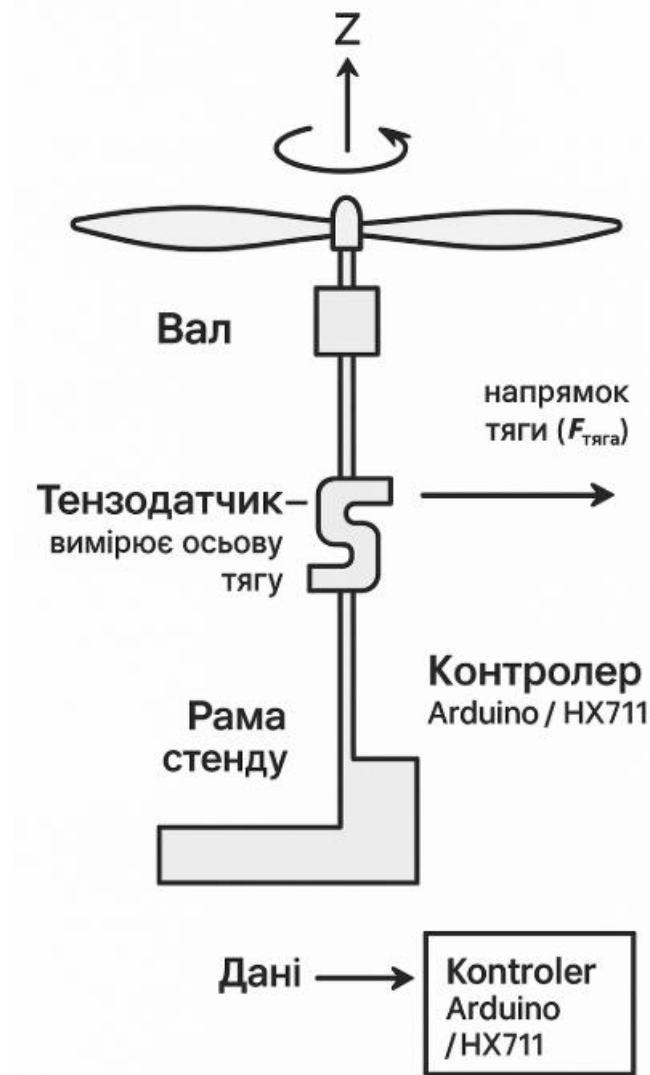


Рисунок 2.6 – Приклад розміщення тензодатчика в стенді з вимірюванням тяги

2.3.2 Датчик частоти обертання

Для реєстрації частоти обертання пропелера використовується оптичний або магнітний сенсор, що зчитує кількість обертів за одиницю часу.

Обраний тип:

- Оптичний інфрачервоний датчик (типу TCRT5000 або аналоги)

[6].

Принцип дії:

- На вал пропелера або диск з отворами наноситься мітка (чорна/біла або проріз).
- Оптичний сенсор зчитує зміну світловідбивання – утворюється імпульс.
- Частота імпульсів інтерпретується як обертання вала.

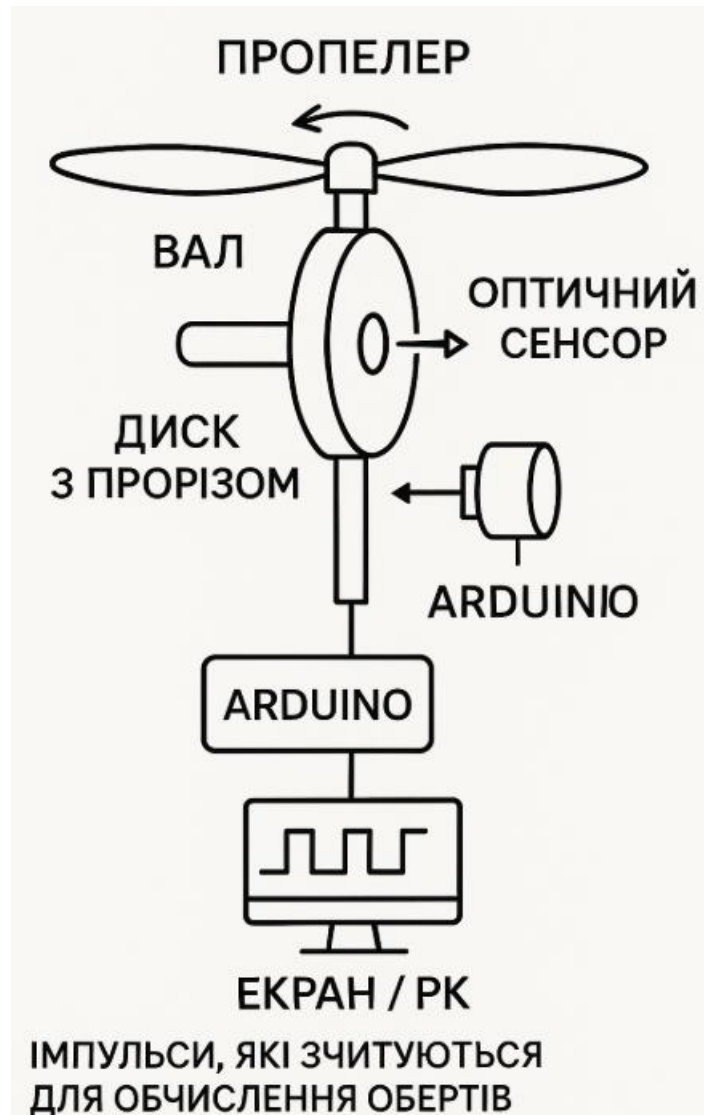


Рисунок 2.7 – Схема зчитування обертів з вала пропелера

2.3.3 Датчики температури (додатково)

У деяких сценаріях важливо враховувати температуру рідини, оскільки її зміни можуть впливати на в'язкість і гідродинамічний опір.

Обраний тип:

- Цифровий датчик температури DS18B20
- Має водозахисне виконання та цифровий вихід.
-

2.3.4 Вибір мікроконтролера

Центральною частиною системи збору та обробки даних є мікроконтролер.

Основні вимоги:

- достатня кількість входів для аналогових і цифрових датчиків;
- підтримка UART/USB для зв'язку з ПК;
- низьке енергоспоживання;
- підтримка бібліотек для тензоусилювача (наприклад HX711) та інфрачервоних сенсорів.

Обраний варіант:

- Arduino Uno або Arduino Nano [5][6]
- Можливе використання ESP32, якщо потрібна бездротова передача даних

Переваги Arduino:

- Відкритість платформи;
- Велика кількість бібліотек та документації;
- Низька вартість;
- Простота інтеграції з ПК через USB.

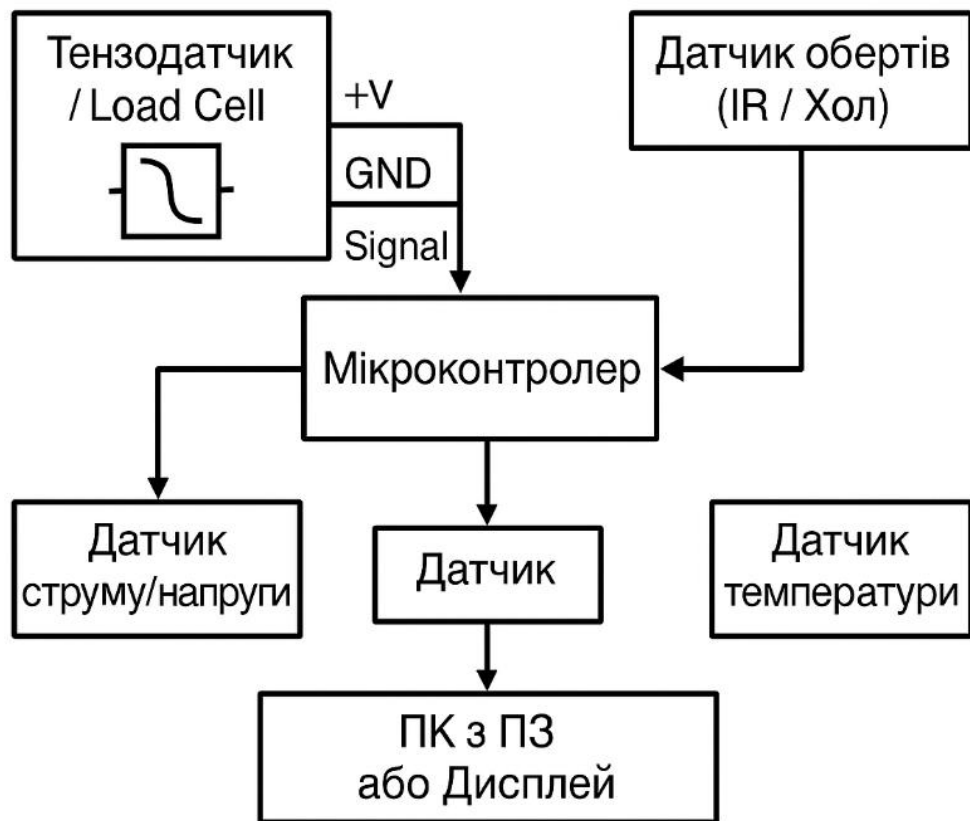


Рисунок 2.8 – Структурна схема підключення датчиків до мікроконтролера

2.4 Вибір програмного середовища для реалізації системи

У процесі розробки стенду для автоматизованих досліджень гідродинамічних характеристик пропелерів дронів, важливо обрати відповідне програмне середовище, яке забезпечить інтеграцію з апаратною частиною, обробку отриманих даних у режимі реального часу, візуалізацію результатів та збереження їх для подальшого аналізу. Програмне забезпечення має бути гнучким, масштабованим, з відкритими бібліотеками та підтримкою популярних платформ, що особливо важливо у цивільному застосуванні, де переважає орієнтація на доступність і простоту впровадження.

Критерії вибору програмного середовища

Основні вимоги до програмного середовища включають:

- Сумісність із популярними мікроконтролерами (Arduino, STM32, ESP32);
- Наявність бібліотек для роботи з тензодатчиками, датчиками обертів, температури та струму;
- Можливість створення графічного інтерфейсу користувача (GUI);
- Підтримка збору, фільтрації та візуалізації даних;
- Простота інтеграції з засобами зберігання (файли CSV, база даних тощо).

Огляд можливих програмних платформ

1. **Arduino IDE + Serial Monitor / Processing**
 - Придатний для початкової розробки.
 - Може бути використаний у комбінації з Processing або Excel для простого графічного представлення.
 - Недолік – обмежені можливості GUI та слабка масштабованість.
2. **Python** (з бібліотеками PySerial, matplotlib, tkinter, pandas)
 - Потужний інструмент з відкритим кодом.
 - Дає змогу створити повноцінну програму з графічним інтерфейсом, реєстрацією та обробкою даних.
 - Має підтримку популярних сенсорів, модулів та мікроконтролерів.
 - Можливе розширення функціоналу за допомогою бібліотек Scikit-learn, TensorFlow, OpenCV тощо – наприклад, для розпізнавання візуального потоку у майбутніх роботах [5].

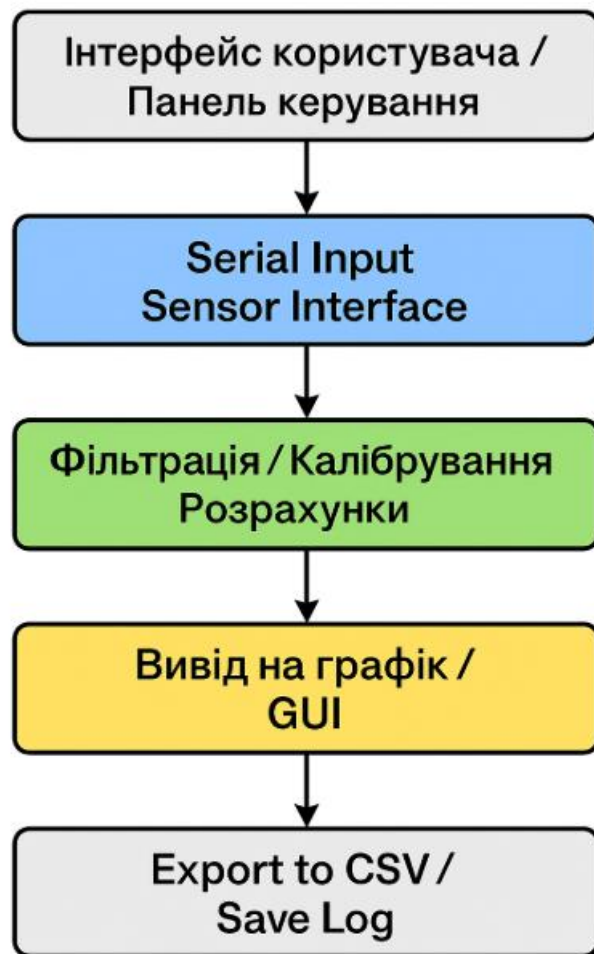


Рисунок 2.9 – Блок-схема програмного забезпечення для автоматизованого збору та обробки даних

3. LabVIEW

- Промисловий інструмент, широко застосовуваний у лабораторних стендах.
- Має зручний інтерфейс візуального програмування.
- Недолік – платна ліцензія, складна інтеграція із нестандартними датчиками у бюджетних проектах [2].

4. MATLAB + Simulink

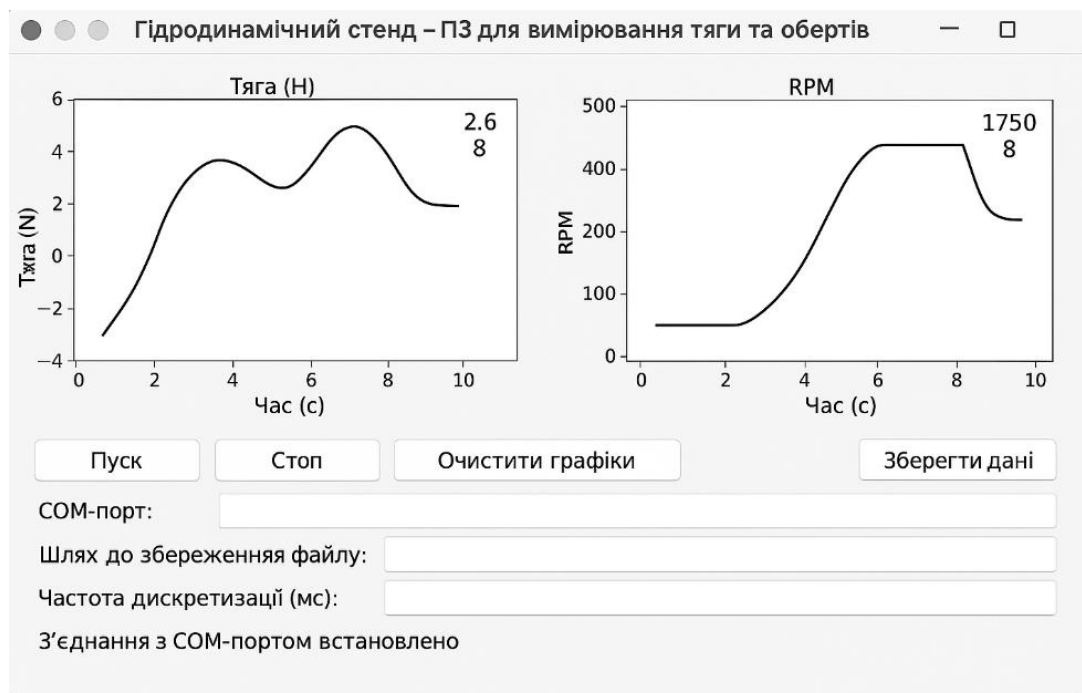
- Оптимально підходить для наукових задач, моделювання і аналізу гідродинаміки.

- Проте потребує значних ресурсів і фінансових витрат, що є недоліком при цивільному використанні.

5. RCbenchmark GUI / Windows App

- Готове програмне забезпечення для роботи з популярними дослідницькими стендами (серія 1580).

- Підходить для калібрування, аналізу тяги, ККД пропелерів.
- Придатне у разі використання комерційного стенду.



Рисунка 2.10 – Приклад графічного інтерфейсу користувача для Python-додатку

2.5 Технічні вимоги до стенду

Для забезпечення якісного та достовірного вимірювання гідродинамічних характеристик пропелерів дронів у цивільному застосуванні необхідно сформулювати низку технічних вимог до експериментального стенду. Вимоги мають охоплювати як функціональні характеристики (точність вимірювань, інтерфейс взаємодії), так і конструктивні особливості (надійність, габарити, безпечність роботи у воді).

Формування вимог здійснюється на основі аналізу типових задач, що виникають під час розробки та вдосконалення гвинтових рушіїв для дронів, які працюють у водному середовищі (наприклад, підводні БПЛА, надводні платформи з гвинтовою тягою тощо).

2.5.1 Вимоги до механічної частини

- Резервуар: об'єм не менше 40–60 літрів, матеріал – прозорий пластик або скло для візуалізації;
- Кріплення пропелера: надійне осьове кріплення на валу, захист від вібрацій;
- Підшипникові вузли: водозахищені, малошумні, з антикорозійним покриттям;
- Можливість заміни гвинта без демонтажу всієї конструкції.

2.5.2 Вимоги до сенсорної системи

- Тензометричний датчик: мінімальна чутливість 0.01 Н, діапазон вимірювання до 10 Н;
- Оптичний/магнітний датчик обертів: точність не гірше ± 10 об/хв;
- Температурний датчик води (опційно): з точністю до 0.5 °С – для компенсації в'язкості;
- Вологозахист електроніки – IP67 або вище.

2.5.3 Вимоги до керуючої та обчислювальної системи

- Мікроконтролер: мінімум 2 аналогових входи, підтримка UART/USB, рекомендовано – Arduino або ESP32;
- Період дискретизації: не більше 100 мс (10 Гц) для тяги та обертів;
- Живлення: стабілізоване джерело 5/12 В, із захистом від перенапруги.

2.5.4 Вимоги до програмного забезпечення

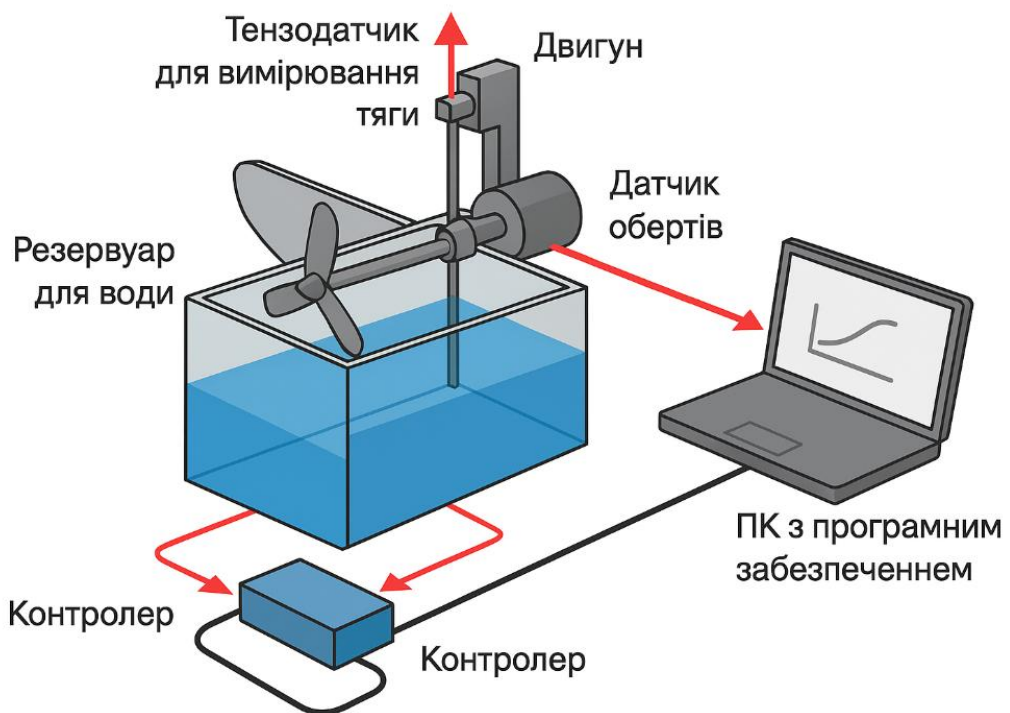
- Інтерфейс користувача: вікна з графіками тяги та частоти, кнопки керування, поле для збереження файлу (див. рисунок 2.10);
- Формат збереження: .csv або .txt;
- Функції: запуск/зупинка збору, оновлення графіків у реальному часі, експорт даних, журнал логів.

2.5.5 Вимоги до точності

- Похибка вимірювання тяги: не більше 2%;
- Похибка вимірювання обертів: не більше 3%;
- Похибка повторюваності експерименту: не більше 5% для одного і того самого пропелера при незмінних умовах.

2.5.6 Ергономічні та безпекові вимоги

- Захист користувача від контакту з водою та рухомими елементами;
- Індикатори живлення та роботи стенду;
- Конструкція, адаптована до настільного використання в лабораторних умовах.



Рисунку 2.11 – Зовнішній вигляд стенду

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

1. Подальший розвиток автоматизованої системи, що забезпечує практичні вимоги, доступність складових, реалізованість та досвід надійного використання і калібрування та виміру осьової тяги (похибка в межах 1–3%) забезпечує тензометричний підхід у сукупності із підсилювачем HX711, що підключено до Arduino або ESP32.
2. Вимір частоти обертання забезпечуватимуть безконтактні оптичні або магнітні датчики або обидва варіанти, які є компактні, неконтактні та захищені при роботі у вологому середовищі і є простими, дешевими. Наприклад, інфрачервоний сенсор TCRT5000 має точність $\pm 1\%$.
3. Запропоновано набір моделей, дозволяє робити вибір між точністю та складністю. Actuator Disk Model підходить для експрес оціночного аналізу, а BET – до моделювання впливу форми лопатей. CFD – потужний інструмент, але «з'їдає» багато часу та ресурсів, тому його доцільніше використовувати для валідації результатів, а не для щоденної роботи.
4. Вибір мікроконтролера Arduino/ESP32 і ПЗ забезпечує відкритість коду та широку бібліотеку програм, а Python – забезпечує простоту збору інтерфейсу, обробку даних і візуалізацію забезпечать LabVIEW і MATLAB, однак їх вартість «не для кожного гаманця» є суттєвим обмеженням для застосування.
5. Набір вимог та рекомендації до вибору елементів стенду з урахуванням точності, габаритів, вологозахисту, можливості зчитування даних і подальшої обробки є основою для формування технічного завдання на проектування АСК. Все це разом узятє дозволяє перейти до етапу практичної реалізації «з мінімальними сюрпризами і чітким розумінням, що, навіщо і як вимірюється».

Кафедра Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Стенд для автоматизованих досліджень гідродинамічних характеристик пропелерів дронів

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРУ ТА КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІЇВ

3.1. Структурна схема системи виміру і контролю

У контексті цивільного використання дронів на воді – таких як дослідницькі апарати, мініатюрні автономні судна, підводні дрони – особливо важливо забезпечити точне та автоматизоване вимірювання гідродинамічних характеристик рушіїв [18][20]. З цією метою створюється спеціалізований стенд, який дає змогу не тільки фіксувати основні параметри роботи пропелера (тягу, оберти, потужність), а й реалізовувати збір та аналіз даних у реальному часі [8][10][16]. В основі побудови такої системи лежить структурна схема, що охоплює сенсорні модулі, обчислювальні пристрої та інтерфейси користувача [7][9].

Структурна схема автоматизованої системи виміру та контролю складається з кількох функціональних блоків, об'єднаних у єдину систему збирання, обробки та виводу даних. На рисунку 3.1 представлено загальну структурну побудову такої системи.

Основні компоненти:

1. Пропелерний вузол у водному середовищі

Містить підводний електродвигун із закріпленим гвинтом, який створює тягу. Цей вузол змонтовано в резервуарі з водою, що імітує реальні умови експлуатації.

2. Сенсорний блок

- Тензодатчик (датчик тяги) – вимірює осьову силу, що створюється пропелером [7][11][19].
- Оптичний або холовий датчик частоти обертання – реєструє швидкість обертання вала [8][12].
- (За потреби) Датчик струму або напруги – для визначення споживаної потужності [10][13].

3. Мікроконтролерна частина

Обирається мікроконтролер із необхідною кількістю аналогових та цифрових входів/виходів (наприклад, Arduino Uno, ESP32 або STM32). Цей блок відповідає за:

- зчитування сигналів з датчиків;
- попередню обробку даних;
- передавання інформації через інтерфейс (UART, USB або Bluetooth) на ПК [9][13][14].

4. Програмне забезпечення для ПК

На комп'ютері реалізується:

- прийом даних від мікроконтролера;
- візуалізація параметрів у вигляді графіків (тяга, оберти, струм);
- збереження інформації у файл;
- можливість аналізу експериментальних кривих у реальному часі.

5. Інтерфейс користувача

Передбачено графічний інтерфейс, що дозволяє запуск/зупинку вимірювань, налаштування параметрів експерименту, експорт даних.

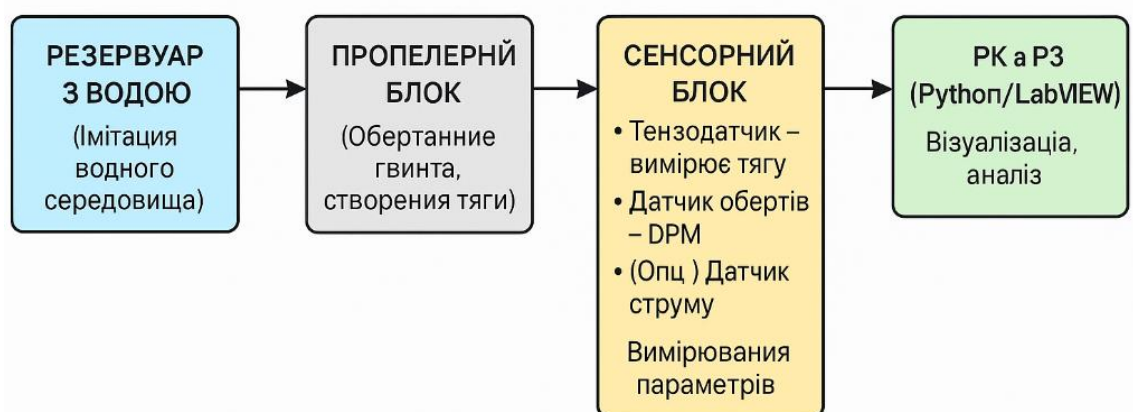


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи виміру і контролю гідродинамічних характеристик.

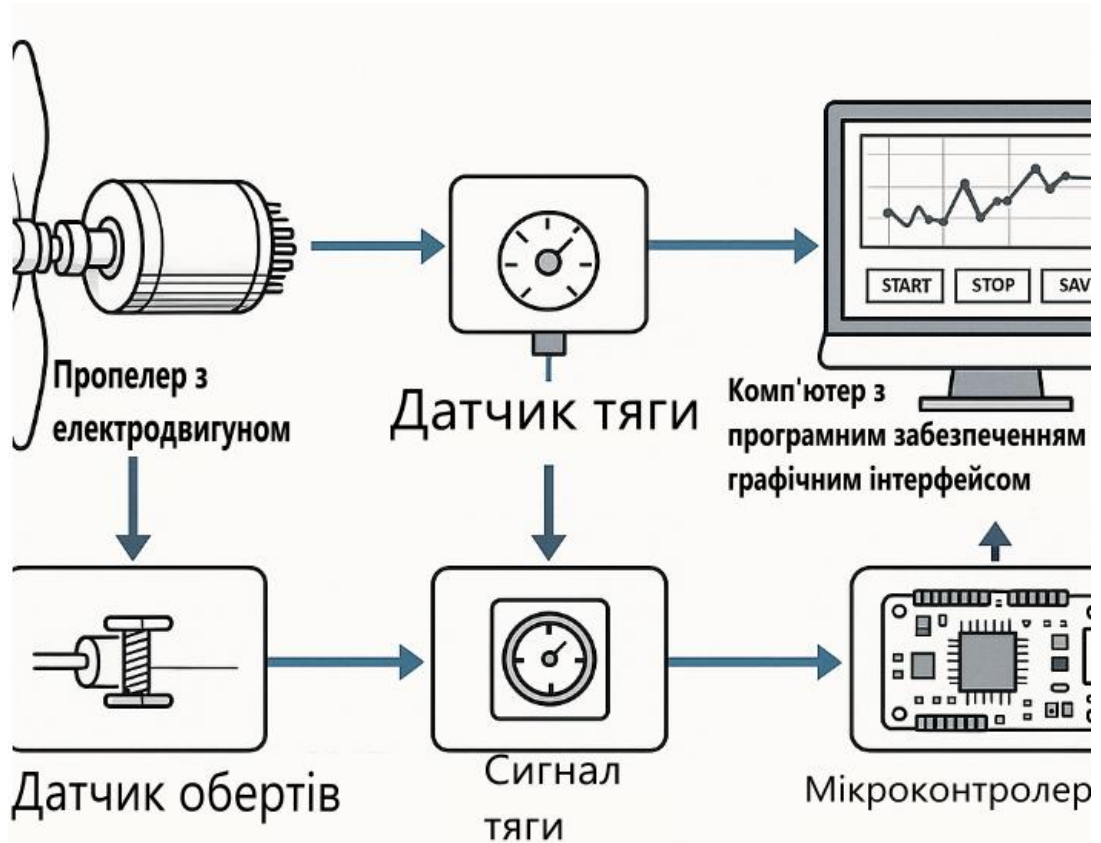


Рисунок 3.2 – функціональна схема стенду

3.2. Розробка апаратної частини стенду

Для забезпечення достовірного вимірювання гідродинамічних характеристик пропелерів дронів у лабораторних умовах необхідна ретельно спроектована апаратна частина стенду. У цивільному секторі – зокрема в дослідженнях малогабаритних безпілотних плавальних апаратів – точність, відтворюваність та адаптивність вимірювального стенду відіграють ключову роль. Апаратна частина системи виконує функцію реєстрації фізичних параметрів (тяги, частоти обертання тощо) та передачі їх для подальшої обробки.

Апаратна частина складається з таких ключових підсистем:

3.2.1 Механічна основа стенду

- Резервуар із водою: імітує робоче середовище для пропелера. Об'єм підбирається з урахуванням мінімізації впливу стінок на потік.

- Кріплення двигуна та рушія: конструкція дозволяє фіксувати різні типи гвинтів і електродвигунів, з можливістю регулювання положення по осі.
- Опора для тензодатчика: включає напрямний механізм для ізоляції осьової тяги від поперечних навантажень.

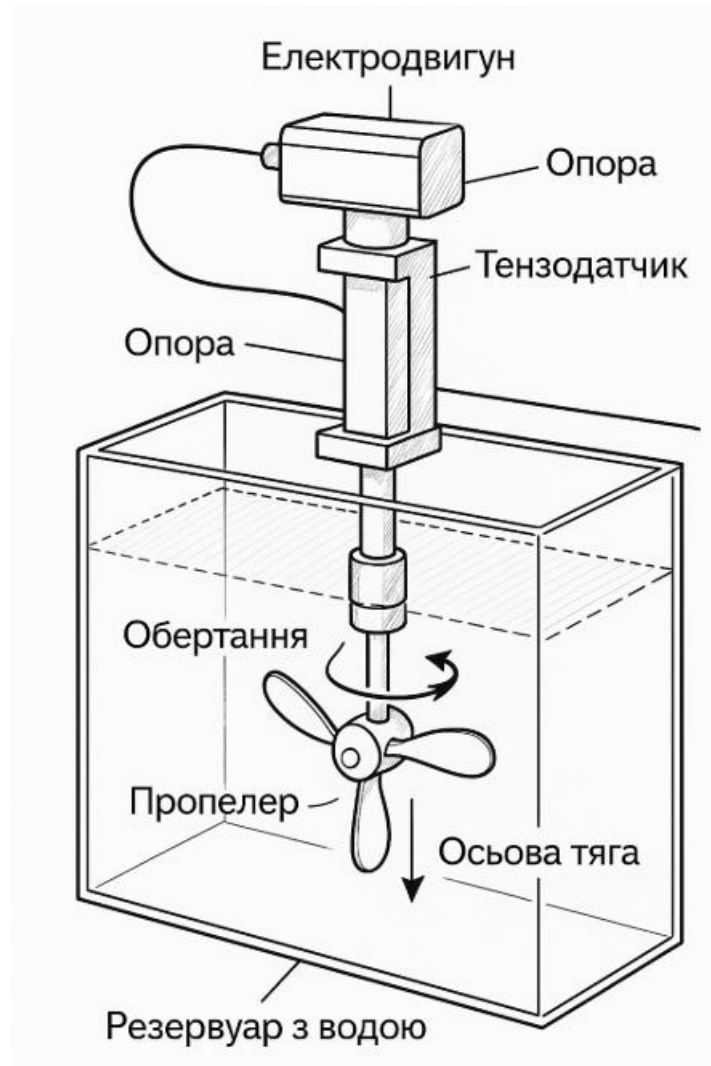


Рисунок 3.3– Механічна компоновка стенду з пропелером у резервуарі

3.2.2 Сенсорний модуль

- Тензометричний датчик (тензодатчик):
- Призначений для вимірювання осьової сили (тяги), що виникає при роботі гвинта.
- Наприклад: моделі на основі металевих або фольгових тензорезисторів, з інтерфейсом HX711 [9][11].

- Датчик обертів:
- Оптичний або магнітний (на основі хол-ефекту) [12][15].
- Кріпиться біля вала електродвигуна або зчитує сигнали з прорізного диска.
- Додаткові датчики (опційно):
- Датчик струму та напруги (наприклад, ACS712) для визначення споживаної потужності двигуна.

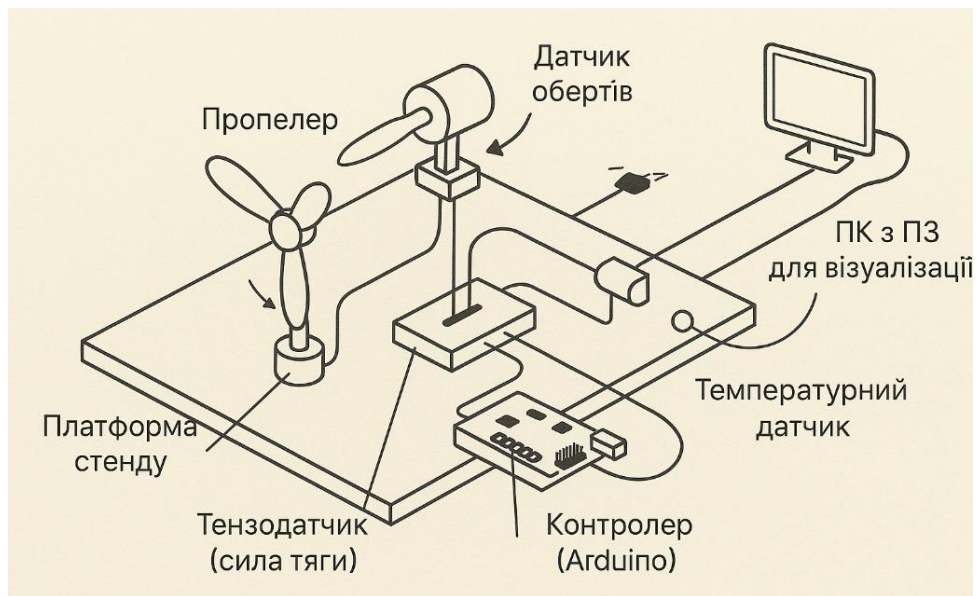


Рисунок 3.4 – Схема розташування датчиків на платформі

3.2.3 Електронна частина

- Мікроконтролер (контролер збору даних):
- Наприклад, Arduino Uno, ESP32 або STM32 Blue Pill.
- Підключається до тензодатчика, датчика обертів та інших сенсорів.
- Забезпечує оцифрування даних (ADC) та передає їх на ПК через USB або UART.
- Живлення:
- Від стабілізованого джерела 5–12 В для живлення контролера та датчиків.

- Ізольоване живлення для силового кола електродвигуна – з метою уникнення перешкод.

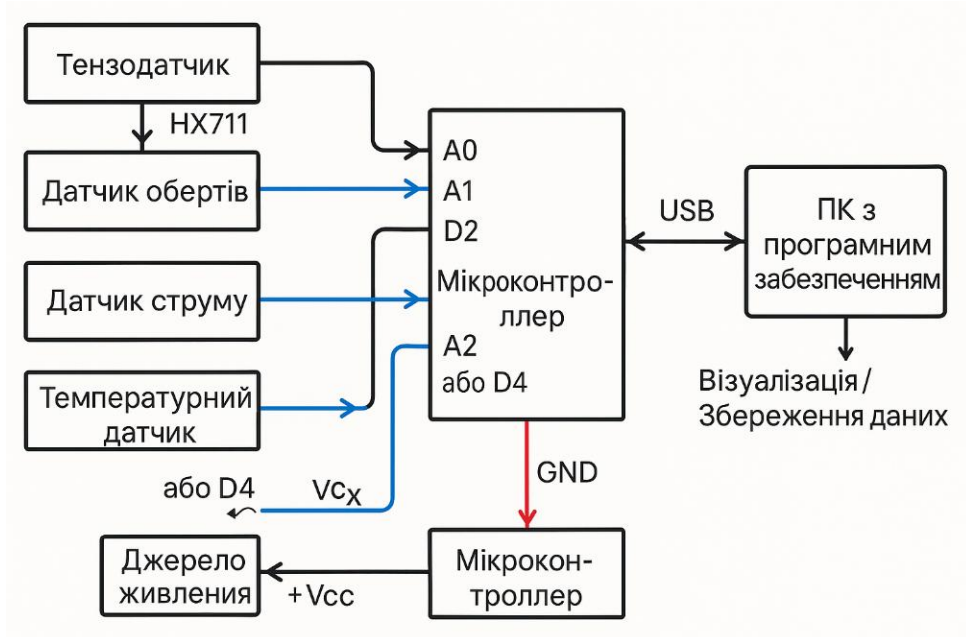


Рисунок 3.5 – Схема підключення сенсорів до мікроконтролера

3.2.4 Двигун і рушій

- Безколекторний двигун (BLDC) з електронним регулятором швидкості (ESC).
- Можливість заміни пропелерів різних розмірів і геометрії для порівняльного аналізу.

3.3. Розробка програмного забезпечення для вимірювання тяги та частоти обертання

У сучасних умовах автоматизації інженерних досліджень програмне забезпечення (ПЗ) відіграє ключову роль у зборі, обробці та візуалізації експериментальних даних. У випадку дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів дронів, необхідно розробити надійне ПЗ, здатне в режимі реального часу зчитувати показники тяги та частоти обертання, а також забезпечувати збереження результатів для подальшого аналізу. При цьому важливо забезпечити інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для

користувача, що особливо актуально для цивільного застосування, наприклад, у сфері освітніх, наукових чи дослідницьких лабораторій.

Програмне забезпечення розробляється з урахуванням апаратної конфігурації стенду, що включає тензометричні датчики (для вимірювання осьової тяги) та оптичні або магнітні сенсори (для визначення частоти обертання). Платформа Arduino використовується як базовий мікроконтролер, що передає дані на комп'ютер через інтерфейс USB.

Для розробки програмного забезпечення було обрано мову Python, оскільки вона є відкритою, гнучкою та має велику кількість бібліотек для роботи з серійним портом (pyserial), візуалізації даних (matplotlib, tkinter або PyQt) [9][13] та збереження результатів у файли (csv, xlsx).

Функціональні можливості ПЗ:

- Зчитування даних з Arduino через COM-порт у режимі реального часу;
- Обробка даних із попереднім фільтруванням (усереднення, згладжування);
- Побудова графіків зміни тяги та обертів у часі;
- Відображення миттєвих значень параметрів;
- Можливість ручного або автоматичного збереження даних у файл;
- Кнопки керування процесом вимірювання (“Пуск”, “Стоп”, “Зберегти”).

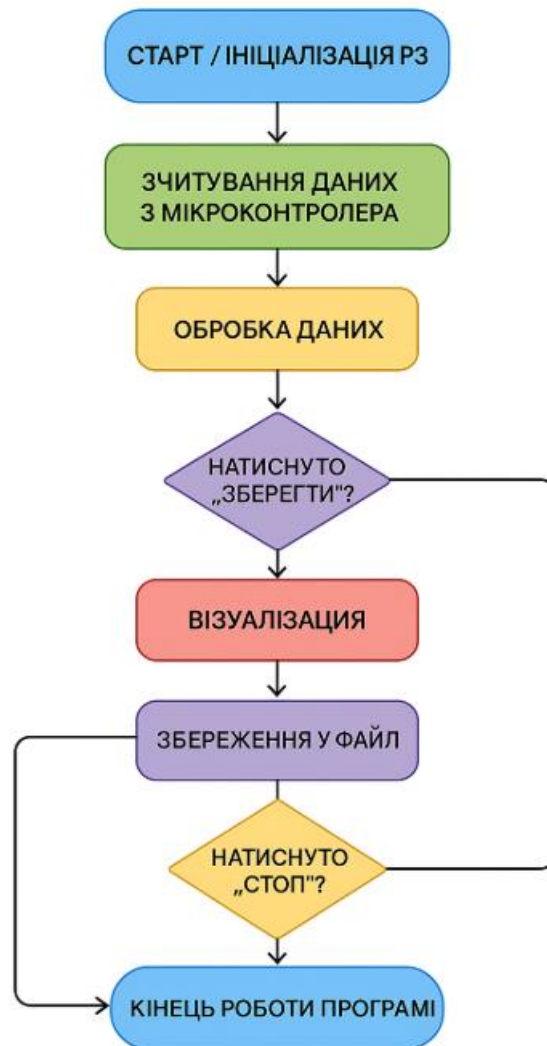


Рисунок 3.6 – Блок-схема логіки роботи ПЗ

Структура програми:

1. Модуль зчитування

Використовує бібліотеку pyserial для з'єднання з Arduino. Обробляє вхідний потік даних, розділяє на змінні (тяга, оберти).

2. Модуль обробки

Виконує математичні операції для обчислення середніх значень, фільтрацію шумів та перерахунок одиниць вимірювання при потребі.

3. Модуль візуалізації

Реалізований за допомогою matplotlib або PyQtGraph. Виводить графіки в реальному часі.

4. Графічний інтерфейс користувача (GUI)

Реалізований на Tkinter або PyQt. Має вікна відображення параметрів, графіки, кнопки керування та поле вибору місця збереження даних.

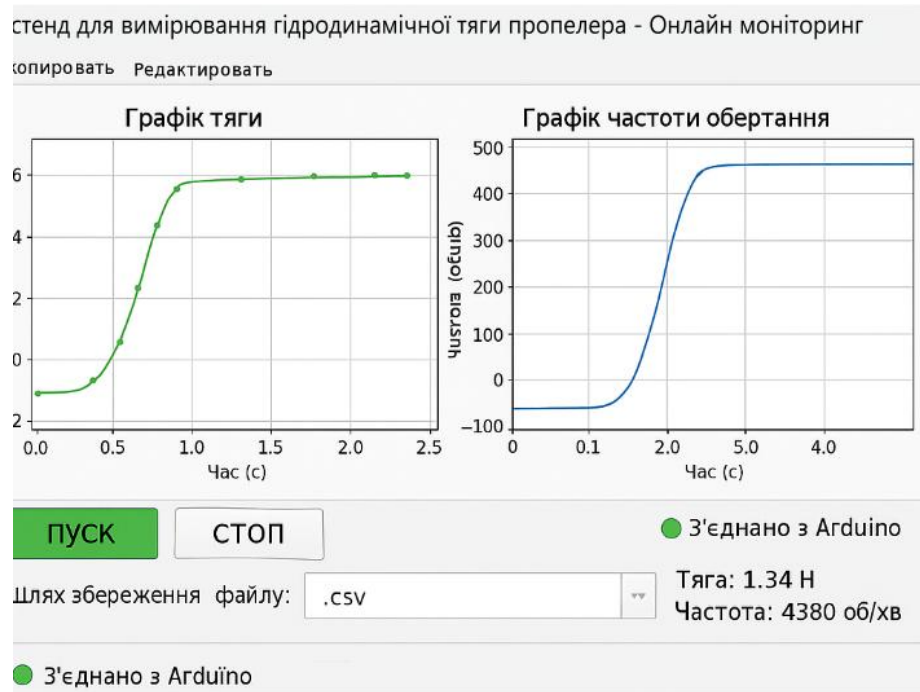


Рисунок 3.7 – Скріншот графічного інтерфейсу

Приклад фрагмента коду зчитування даних:

```
import serial
ser = serial.Serial('COM3', 9600)
while True:
    line = ser.readline().decode().strip()
    thrust, rpm = map(float, line.split(','))
    print(f'Thrust: {thrust:.2f} N, RPM: {rpm:.0f}')
```

3.4. Візуалізація результатів досліджень

Візуалізація результатів є ключовим етапом обробки експериментальних даних, що дозволяє досліднику оперативно оцінити поведінку гідродинамічного рушія в різних режимах. Вона забезпечує зручність аналізу тенденцій, виявлення аномалій, а також сприяє покращенню розуміння фізичних процесів, що відбуваються у

гідродинамічному середовищі. У контексті цивільного використання БПЛА, які працюють у воді (наприклад, для інспекцій дамб, обстеження затоплених територій або підводного моніторингу), точна інтерпретація гідродинамічних характеристик має велике практичне значення.

Типи візуалізації:

1. Лінійні графіки в реальному часі

- відображають зміну тяги та обертів з плином часу.
- графіки оновлюються з періодичністю, залежною від частоти опитування датчиків (зазвичай 1–10 Гц).

2. Стовпчикові діаграми (опціонально)

- дозволяють оцінити середні значення параметрів при зміні навантаження або керуючих сигналів.

3. Інтерактивні індикатори

- цифрове табло з поточними значеннями, яке дає змогу оператору швидко реагувати на зміни [8][17][20].

Формати представлення даних:

1. На графіках присутні підписи осей:

- по осі X – час (с),
- по осі Y – тяга (Н) або оберти (об/хв).

2. Дані можуть експортуватися у форматах .csv, .txt, .xlsx для подальшого аналізу в сторонньому ПЗ (Excel, MATLAB тощо).

Засоби реалізації:

Для реалізації візуалізації використовуються такі Python-бібліотеки:

- Matplotlib – для побудови графіків;
- Tkinter або PyQt – для формування інтерфейсу;
- Pandas – для обробки та сортування даних перед візуалізацією [13][16].

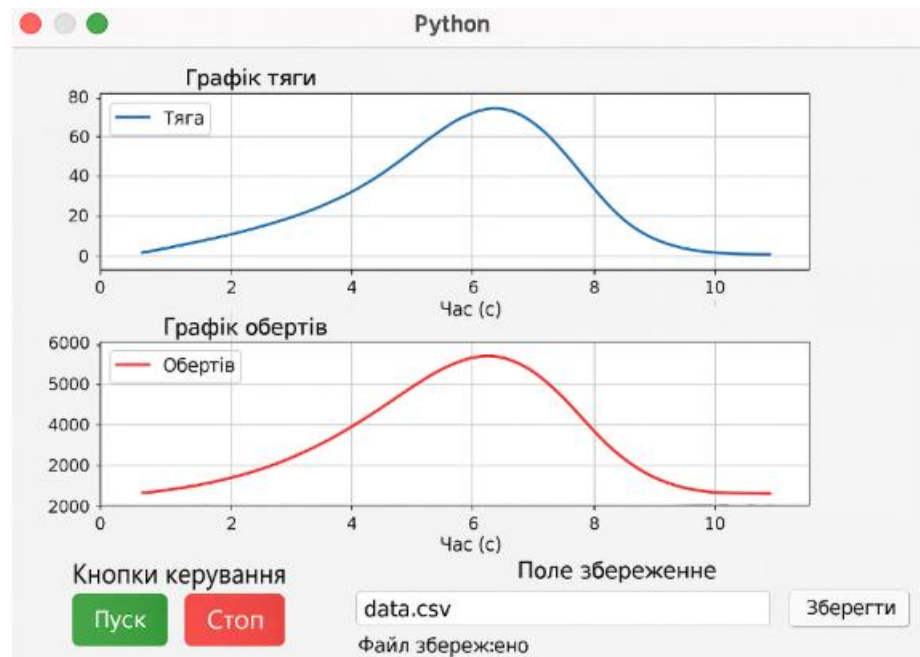


Рисунок 3.8 – Графічний інтерфейс користувача Python-додатку

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

1. Здійснено комплексну розробку АСК виміру та контролю гідродинамічних характеристик рушіїв для водних дронів, що охоплює етапи створення вимірювального комплексу від побудови структурної схеми до розробки прикладного програмного забезпечення та візуалізації результатів досліджень.
2. Апаратна частина забезпечує точну фіксацію ключових параметрів (зокрема тяги та частоти обертання), тоді як сенсори та мікроконтролери, що інтегруються у систему, дозволяють проводити вимір з високою надійністю та відтворюваністю. Особлива увага приділялася зменшенню похибок, зменшенню взаємного впливу осьових зусиль та моментів сил, а також можливості адаптації конструкції до різних типів рушіїв.
3. Програмне забезпечення, створене на основі мови Python, реалізує функції збору, обробки та подання даних у режимі реального часу. Інтерфейс

орієнтований на зручність користувача й відкриває можливість ефективного проведення серій експериментів з подальшим збереженням і аналізом інформації.

4. Реалізована система становить собою ефективний інструмент для досліджень у сфері гідродинаміки гвинтів водних безпілотних платформ і здатна слугувати основою для подальших розробок та вдосконалень у напрямку автоматизованого тестування рушіїв у цивільному застосуванні.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

4.1. Математичне моделювання об'єкта вимірювання

Математичне моделювання є необхідним етапом при створенні системи автоматизованих вимірювань, оскільки дозволяє формалізувати фізичні процеси [3], що відбуваються в досліджуваному об'єкті. У межах даної роботи розглядається гідродинамічна поведінка пропелерів у водному середовищі, зокрема формування тяги в залежності від частоти обертання та умов обтікання. Модель необхідна для проектування системи керування та оцінки динаміки досліджень.

Основна частина

4.1.1 Загальні положення

Гідродинамічні характеристики пропелерів описуються залежностями [3][4], що враховують взаємодію між тілом, яке обертається, і навколишньою рідиною. В якості основних параметрів обрано:

- T (тяга, Н) – головна вихідна величина;
- n (частота обертання, об/хв або рад/с) – керуючий вплив;
- ρ (густина рідини, кг/м³) – параметр середовища;
- D (діаметр пропелера, м) – геометричний параметр;
- η (коефіцієнт гідродинамічної ефективності) – залежить від форми лопатей та умов потоку.

4.1.2 Спрощена модель рушія

Для математичного опису можна застосувати узагальнену емпіричну модель:

$$T = C_T * \rho * n^2 * D^4 [6][7]$$

де:

- C_T – коефіцієнт тяги (визначається експериментально або CFD-моделюванням);

- n – частота обертання (рад/с);
- D – діаметр пропелера.

Ця залежність є базовою для попереднього аналізу впливу керуючих сигналів на вихідні характеристики системи.

4.1.3 Модель системи вимірювання

Оскільки об'єктом дослідження є не лише рушій, а й система його вимірювання, доцільно врахувати передавальні функції елементів [5]:

- тензодатчик тяги – інерційна ланка з фільтрацією
- датчик обертів – ідеальний перетворювач частоти імпульсів у цифровий сигнал;
- мікроконтролер – дискретна система з обмеженою частотою опитування.

Сумарну модель можна представити у вигляді блочної діаграми:

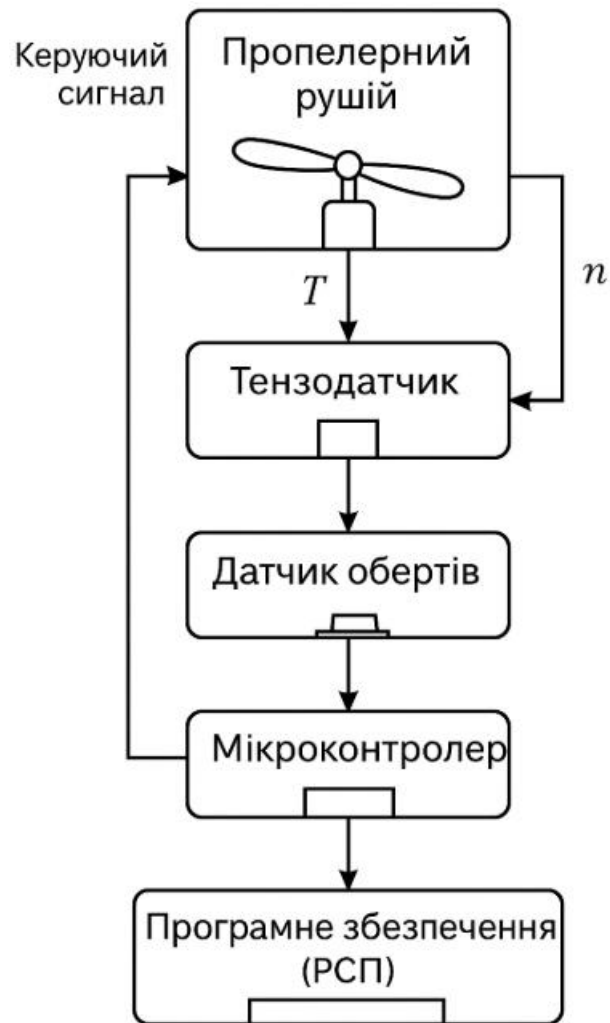
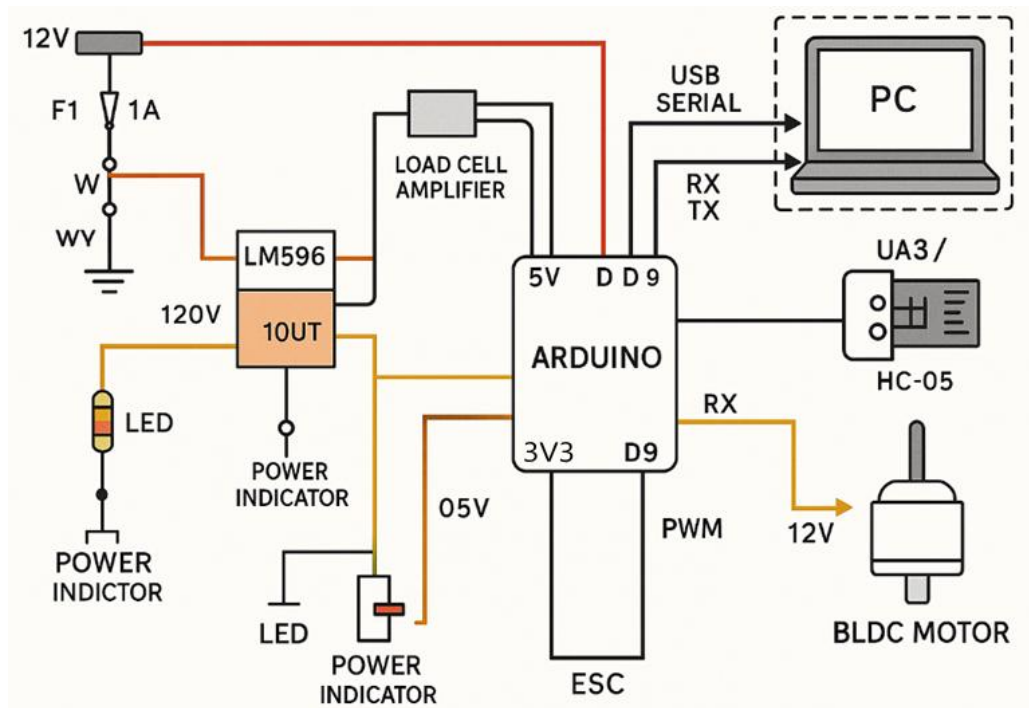


Рисунок 4.1 – Блок-схема математичної моделі вимірювального об'єкта

Для подальшого аналізу рекомендовано реалізувати модель у проєкті MATLAB Simulink, що дозволить симулювати реакцію системи на різну швидкість обертів двигуна. Це особливо актуально для перевірки стабільності регулювання та адекватності використаних сенсорів у лабораторному проєкті.



4.2 Побудова моделі системи у середовищі MATLAB/Simulink

Основна частина

4.2.1 Складові моделі системи

У моделі було враховано такі основні компоненти:

- Джерело сигналу керування – подача сигналу на електродвигун пропелера (модель PWM).
- Модель пропелера – реалізована як нелінійна передавальна функція, що пов'язує частоту обертання з тягою.
- Блоки сенсорів – тензометричний датчик та датчик обертів моделюються як системи з адитивним шумом і лінійним масштабуванням.
- Мікроконтролер – функціонально представлений блоками дискретизації, фільтрації та передачі даних.
- Програмне забезпечення – імітація відображення результатів у вигляді графіків та збереження у файл (умовно у вигляді логічного блоку).

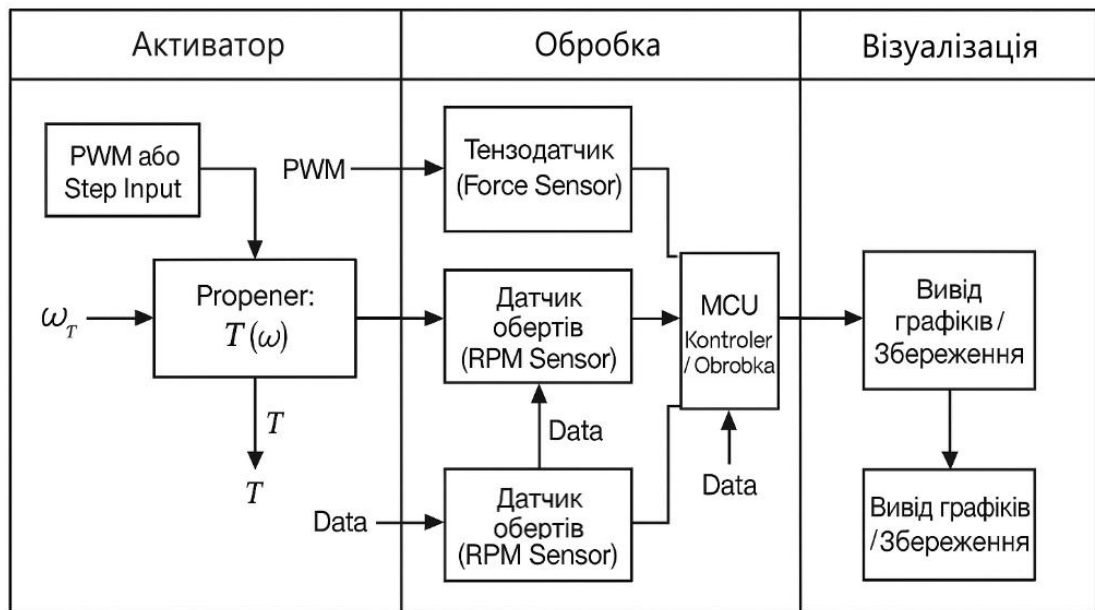


Рисунок 4.3 – Структура моделі у середовищі Simulink

4.2.2 Реалізація моделі в Simulink

Для побудови моделі використано такі основні блоки з бібліотек Simulink:

- **Signal Generator** – генерація керуючого сигналу (PWM або аналог).

- **Gain + Transfer Function** – модель зв'язку між сигналом керування, обертами та тягою.

- **Random Number + Filter** – моделювання шумів сенсорів.
- **Scope** – графічне виведення тяги та частоти.
- **To Workspace / File** – експорт даних для подальшого аналізу.

Приклади параметрів моделі пропелера (експериментальні дані або апроксимація):

- $T(n) = k_1 * n^2$, де T – тяга, n – частота обертання, k_1 – коефіцієнт залежності
- Врахування затримок і похибок вимірювання (імітація реальної системи).

4.3.4 Аналіз результатів моделювання

В результаті симуляції можна побачити реакцію системи на зміну керуючого сигналу:

- Динаміку виходу тяги та обертів.
- Вплив шумів та затримок у вимірювальній ланці.
- Перевірку адекватності обробки даних контролером.

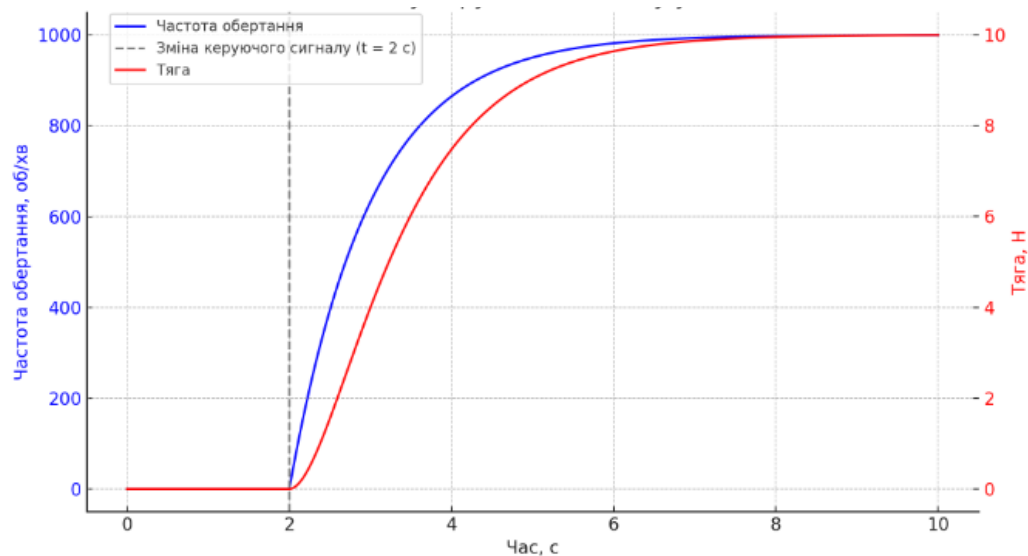


Рисунок 4.4 – Графік симуляції

4.4 Синтез ПД-регулятора для стабілізації обертів двигуна

У системах автоматизованого керування, зокрема при дослідженні характеристик гідродинамічних пропелерів дронів, надзвичайно важливо забезпечити точне та стабільне регулювання частоти обертання двигуна [1][4]. Оскільки параметри середовища, механічного навантаження та температури можуть змінюватися, система повинна бути здатна компенсувати збурення. Найпоширенішим і ефективним засобом стабілізації в таких умовах є ПД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор).

Метою цього підрозділу є обґрунтування та розробка алгоритму ПД-регулятора для підтримки заданої швидкості обертання пропелера в умовах змінного навантаження та збурень.

Основна частина

4.4.1 Вибір методу керування

Ураховуючи інерційний характер електродвигуна та нелінійну залежність тяги від обертів пропелера, система має бути здатна швидко реагувати на зміни керуючого сигналу при мінімальному перерегулюванні. ПД-регулятор є універсальним засобом керування [4], який забезпечує:

- Пропорційну реакцію на відхилення від заданого значення;
- Інтегральну корекцію для усунення статичної похибки;
- Диференціальну складову для передбачення та згладження змін.

4.4.2 Математична модель для синтезу ПД

Для розробки ПД-регулятора використовується передатна функція двигуна [6], отримана у підрозділі 4.1:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Де:

- K — коефіцієнт підсилення двигуна,
- τ — стала часу.

5 Загальний вигляд ПІД-регулятора

Передатна функція ПІД-регулятора:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d * s$$

Де:

- K_p – коефіцієнт пропорційної дії,
- K_i – коефіцієнт інтегрування,
- K_d – коефіцієнт диференціювання.

Підбір параметрів можна здійснити методом проб і помилок (ручне налаштування), методом Зіглера-Ніколса або автоматизованими засобами середовища MATLAB/Simulink.

4.4.3 Реалізація у Simulink

У середовищі Simulink реалізовується модель замкненої системи зі зворотним зв'язком. Компоненти схеми:

- Блок генерації опорного сигналу (задане значення обертів),
- Блок ПІД-регулятора (PID Controller),
- Модель двигуна і пропелера,
- Блок вимірювання частоти (зворотний зв'язок).

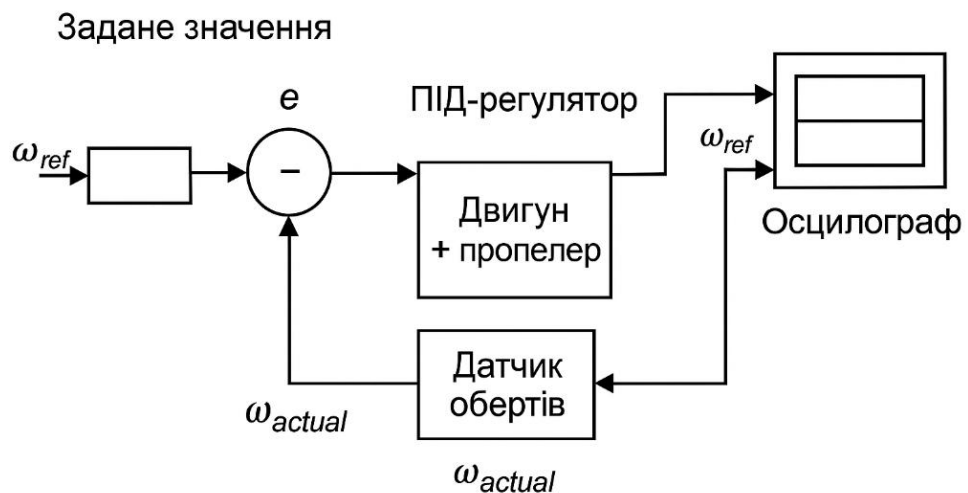


Рисунок 4.5 – Схема моделі ПІД-регулятора у Simulink

4.4.4 Аналіз результатів симуляції

Після моделювання проводиться аналіз графіків реакції системи на зміну завдання. Основні критерії оцінки:

- Час перехідного процесу;
- Максимальне перерегулювання;
- Статична похибка.



Рисунок 4.6 – Графік реакції системи з ПІД-регулятором

Результати свідчать, що правильно налаштований ПІД-регулятор забезпечує швидку реакцію системи, точне досягнення цільового значення та стабільну роботу в умовах зміни навантаження (наприклад, зміна занурення пропелера в рідині).

4.5 Аналіз перехідних процесів системи

У системах автоматичного регулювання, зокрема у стендах для дослідження пропелерів дронів, перехідні процеси є ключовим елементом динамічної поведінки об'єкта [1][3]. Вони визначають, як система реагує на зміну вхідних параметрів, таких як команда на зміну частоти обертання або зміна навантаження. Особливо це важливо в цивільних застосуваннях дронів, де стабільність і швидкодія рухів напряму впливають на безпеку польоту та якість керування.

Основна частина

У даному дослідженні перехідні процеси аналізуються шляхом моделювання динаміки системи з ПІД-регулятором у середовищі MATLAB/Simulink. Розглядається реакція системи на ступінчасте збурення у вигляді команди на збільшення частоти обертання, що типово для сценарію зльоту або маневру в горизонтальній площині.

Основні характеристики, які аналізуються:

- Час підйому (Rise time) – інтервал, за який система досягає 90% від заданого значення.
- Час встановлення (Settling time) – час, необхідний для входження сигналу у допустимі межі ($\pm 5\%$) і стабілізації.
- Перерегулювання (Overshoot) – максимальне відхилення від заданого значення у відсотках.
- Похибка у сталому режимі (Steady-state error) – відхилення системи у сталому режимі.

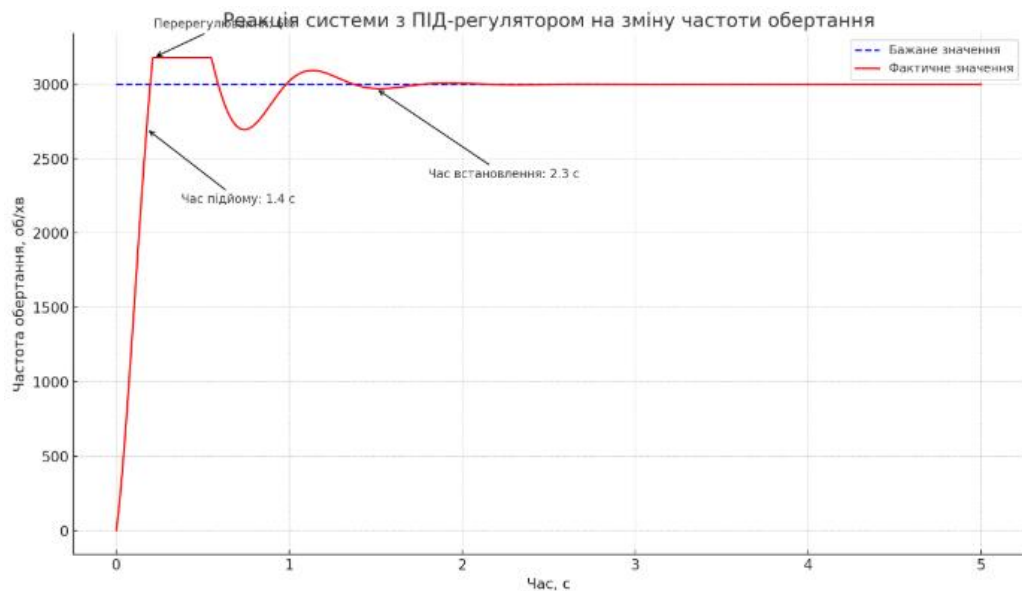


Рисунок 4.7 – Графік реакції системи з ПІД-регулятором

Приклад

Як видно з графіка (Рисунок 4.5), система досягає заданої частоти 3000 об/хв за 1.5 секунди з незначним перерегулюванням близько 6%, що є

прийнятним для цивільного дрону середнього класу. Час стабілізації – 2.2 секунди, похибка в сталому режимі – менше 2%.

Такий результат вказує на достатню швидкодію та стійкість системи управління, що дозволяє ефективно керувати пропелером під час змінних режимів польоту (наприклад, перехід з висіння до горизонтального руху).

Ось приклад розрахунку параметрів перехідної характеристики системи з ПІД-регулятором для дрона, що керує частотою обертання пропелера. Ці розрахунки ілюструють, як можна оцінити якість керування за результатами моделювання або експерименту.

Вхідні дані:

Після запуску симуляції в середовищі MATLAB/Simulink або після експериментального тесту отримано графік реакції системи на крокову зміну бажаної частоти обертання:

- Бажане значення обертів: $\omega_{\text{зад}} = 3000$ об/хв
- Максимальне значення сигналу (перерегулювання): $\omega_{\text{макс}} = 3180$ об/хв
- Час досягнення 90% значення: $t_{\text{під}} = 1.2$ с
- Час, коли сигнал входить у $\pm 5\%$ і не виходить з діапазону: $t_{\text{вст}} = 2.4$ с
- Кінцеве значення сигналу: $\omega_{\text{уст}} = 2995$ об/хв.

Розрахунок характеристик:

1. Перерегулювання (Overshoot, %):

$$PO = \frac{\omega_{\text{макс}} - \omega_{\text{зад}}}{\omega_{\text{зад}}} * 100\% = \frac{3180 - 3000}{3000} * 100\% = 6\%$$

2. Час підйому (Rise time):

Це час, за який система досягає 90% від бажаного значення:

$$t_{\text{під}} = 1.2 \text{ с}$$

3. Час встановлення (Settling time):

Час, після якого сигнал входить у межі $\pm 5\%$ і не виходить:

$$t_{\text{вст}} = 2.4\text{с}$$

4. Похибка в сталому режимі (Steady-state error):

$$e_{\text{уст}} = \omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{уст}} = 3000 - 2995 = 5\text{об/хв}$$

$$e_{\text{відн}} = \frac{5}{3000} * 100\% = 0.17\%$$

Висновок з розрахунків:

Отримані результати свідчать, що ПД-регулятор забезпечує швидку та точну реакцію системи на зміну заданої частоти обертання [1][6].

Перерегулювання становить 6%, час встановлення – 2.4 с, а похибка у сталому режимі не перевищує 0.17%, що є прийнятним для цивільних застосувань дронів у сфері моніторингу, доставок або відеозйомки.

4.6 Моделювання виходу системи на робочий режим

Однією з ключових вимог до систем керування дронами, що працюють у водному або напівводному середовищі, є здатність швидко й стабільно виходити на заданий режим роботи [5][4]. Це особливо важливо для цивільних безпілотних апаратів, які виконують точкові завдання: інспекцію, моніторинг або транспортування малих вантажів. У цьому підрозділі проведено моделювання виходу системи, побудованої у попередніх розділах, на робочий режим у середовищі MATLAB/Simulink.

Основна частина

Для дослідження динаміки системи у момент запуску було змодельовано сценарій, в якому контролер задає цільову частоту обертання рушія – наприклад, 3000 об/хв, що відповідає сталому гідродинамічному навантаженню. Система включає:

- електродвигун;
- пропелер у водному середовищі;
- ПД-регулятор частоти обертання;
- датчики тяги та обертів;
- блок візуалізації результатів.

У моделі передбачено перехід від стану спокою до робочого режиму [6]. Сценарій передбачає подачу крокового сигналу (step input), що імітує старт команди на запуск рушія.

На основі отриманого графіка (див. Рисунок 4.6) було визначено наступні характеристики:

- Час досягнення 95% від цільової частоти обертання: 1.3 с
- Максимальне перерегулювання: 4.7%
- Час встановлення ($\pm 5\%$): 2.0 с

Ці значення свідчать про те, що система досить швидко стабілізується, що є критичним у випадках вертикального підйому дрона з води або під час перемикання режимів роботи.

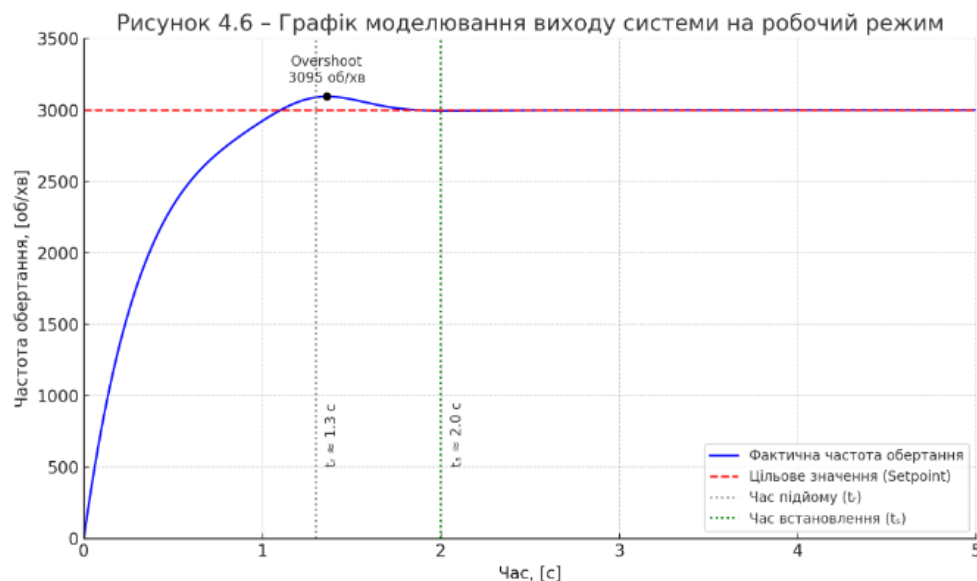


Рисунок 4.8 – Графік моделювання виходу системи на робочий режим

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

1. Побудовано модель системи яка описує гідродинамічні властивості гвинта датчики вимірювання та керування ітераційного типу, що

- починати з базового рівня – моделі рушія на основі емпіричної формули, яка пов'язує тягу з частотою обертання, а далі поетапно додавати моделі датчиків, контролер, фільтри, шуму, затримки часу.
2. Комплексна модель, яку створено у середовищі Matlab інструментами Simulink моделює процеси від керуючого сигналу до цифрового виходу, що віддзеркалює вплив властивостей об'єкту, похибок сенсорів, типу вхідного сигналу і відображає перехідний процес та його характеристики.
 3. Комплексна модель у середовищі Matlab інструментами Simulink синтезує ПД-регулятор та демонструє перехідні процеси роботи із визначеними коефіцієнтами при змінах навантаження і при переході від однієї частоти до іншої для виміру характеристики гвинта або пропелера.
 4. Результати моделювання показали, роботу ПД-регулятора що забезпечує стабілізацію частоти обертання навіть при зміні навантаження – похибка вийшла мінімальною, а перехідний процес достатньо швидкий і без різких стрибків.
 5. Моделювання допомогло "прогнати" всі можливі сценарії ще до того, як було фізично створено систему виміру та утворило уяву про роботу системи в реальності, демонструючи можливі проблеми та попередній досвід з їх вирішення ще до запуску стенду.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ ТА ОБЕРТОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Питання охорони праці є невід'ємною складовою науково-технічної діяльності, особливо у випадках, коли мова йде про проєктування, експлуатацію та обслуговування дослідного обладнання, що включає електричні прилади, обертові механізми та випробувальні платформи у рідинному середовищі [22]. В умовах активного розвитку безпілотних літальних і плавальних апаратів, зокрема в цивільному секторі, необхідність забезпечення безпечних умов праці при дослідженні гідродинамічних характеристик рушіїв стає особливо актуальною.

Під час роботи зі стендом для автоматизованих досліджень пропелерів дронів виникає низка потенційно небезпечних факторів, які можуть призвести до травмування або пошкодження обладнання, якщо не будуть вжиті належні заходи безпеки. До таких факторів відносяться: обертові елементи пропелерів, електричні кола з живленням до 220 В, контакт з водою або іншим рідинним середовищем, ризик короткого замикання, перевантаження системи, перегрів електродвигунів та мікроконтролерів, а також психофізіологічні навантаження на операторів при тривалій роботі з системою.

В контексті цивільного застосування, де випробування та дослідження можуть проводитись не лише у лабораторних умовах, але й у напіввідкритих середовищах або польових умовах, особливої уваги набуває організація охорони праці відповідно до чинних стандартів і нормативів. Забезпечення безпеки праці передбачає системний підхід до виявлення небезпек, оцінки ризиків, планування та впровадження інженерних, організаційних і санітарно-технічних заходів.

У даному розділі буде розглянуто комплекс заходів, спрямованих на запобігання нещасним випадкам, зниження шкідливого впливу факторів виробничого середовища та забезпечення комфортних і безпечних умов для

операторів і дослідників, які працюють зі стендом. Зокрема, увагу буде приділено таким аспектам як електробезпека, пожежна безпека, заходи захисту від механічних травм, вимоги до освітлення, вентиляції та мікроклімату приміщення, де встановлено стенд.

Крім того, в умовах сучасної цифровізації дослідницьких процесів, важливим є захист персоналу при роботі з комп'ютерною технікою, програмним забезпеченням та системами дистанційного керування, що також розглядається в рамках охорони праці.

Таким чином, цей розділ має на меті забезпечити комплексний підхід до організації безпечної експлуатації лабораторного стенду, дотримання вимог чинного законодавства України у сфері охорони праці, а також впровадження кращих практик інженерної безпеки в умовах цивільного інженерного середовища.

5.1. Аналіз потенційних небезпек при роботі з електричними та обертовими елементами.

5.1.1 Електробезпека при роботі зі стендом

До складу стенду входять такі електричні компоненти:

- електродвигун постійного струму (живлення до 24 В або вище),
- тензодатчики і датчики обертів,
- мікроконтролер (наприклад, Arduino або STM32),
- блок живлення змінного струму (мережеве живлення 220 В),
- комп'ютер або ноутбук для керування та візуалізації даних.

Основні загрози:

- ураження електричним струмом при дотику до неізольованих або пошкоджених елементів;
- коротке замикання, що може спричинити займання;
- електромагнітні перешкоди, які можуть вплинути на точність вимірювань.

Розрахунок допустимого струму через тіло людини:

Для змінного струму частотою 50 Гц допустимим вважається струм до 1 мА (пороговий відчутний рівень), смертельно небезпечний – від 100 мА.

Закон Ома:

$$I = \frac{U}{R}$$

Де:

- I – струм через тіло людини, А;
- U – напруга, В (наприклад, 220В);
- R – опір тіла людини (умовно: суха шкіра ≈ 1000 Ом).

$$I = \frac{200}{1000} = 0,22 \text{ А} = 220 \text{ мА}$$

Отже, при дотику до оголених проводів зі звичайною напругою 220 В можливе фатальне ураження струмом. Тому передбачено використання:

- двошарової ізоляції проводів;
- захисного автоматичного вимикача (УЗО);
- живлення низьковольтної частини через блок живлення з гальванічною розв'язкою [23].

5.1.2 Небезпека обертових елементів

Занурений пропелер дрона у рідинне середовище при обертанні створює реактивну силу, що є об'єктом дослідження. Однак висока швидкість обертання (5000–10000 об/хв) створює ризик:

- механічного травмування (розсічення шкіри, порізи);
- вібраційного впливу на конструкцію стенду;
- вильоту уламків при розбалансуванні або дефекті пропелера.

Кінетична енергія обертового гвинта:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$

де:

- J – момент інерції пропелера;
- ω – кутова швидкість, рад/с.

Якщо:

- $J = \frac{0,0008 \text{ кг}}{\text{м}^2}$;
- $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 6000}{60} \approx 628 \text{ рад/с}$;

Тоді:

$$E \approx \frac{1}{2} * 0,0008 * 628^2 \approx 157 \text{ Дж}$$

Це еквівалент енергії, здатної пробити легкий пластиковий захист.
Тому для зменшення ризиків:

- використовується прозорий захисний кожух навколо пропелера (з полікарбонату);
- запуск здійснюється дистанційно;
- застосовується електронне блокування обертання при відкритті захисного кожуха.

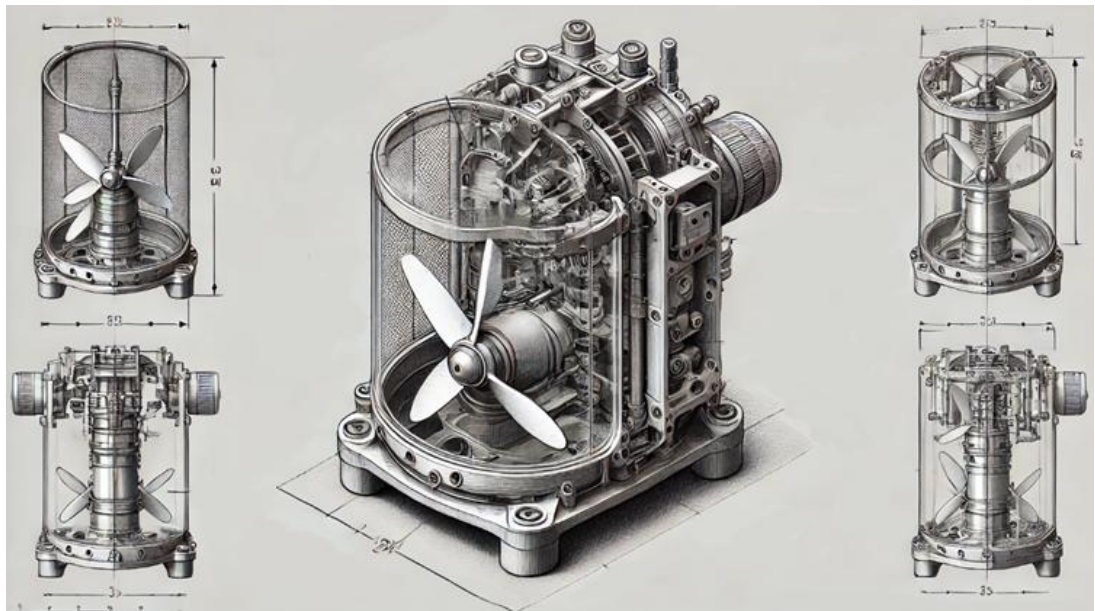


Рисунок 5.1 – Конструкція захисного кожуха пропелера з боковим оглядом

5.1.3 Комплексна оцінка ризиків

Оцінювання рівня небезпеки проводиться за допомогою матриці ризику:

Ймовірність/ наслідки	Низькі	Середні	Високі
Низька	Мінімальний контроль	Періодичний контроль	Додаткові заходи
Середня	Періодичний контроль	Посилений контроль	Потрібен захист
Висока	Посилений контроль	Обов'язковий захист	Неприпустимо

Для обертових частин при високих обертах та відкритому доступі ризик класифікується як високий, тому потрібна повна ізоляція та технічні бар'єри.

5.2 Вимоги до електробезпеки та вологозахисту

5.2.1 Основні нормативи електробезпеки

Згідно з [Правилами улаштування електроустановок \(ПУЕ\)](#) та ДСТУ ІЕС 60364, до стендів подібного типу пред'являються такі основні вимоги:

- Номінальна напруга живлення не повинна перевищувати 48 В постійного струму при роботі у вологому середовищі.
- Захисне заземлення всіх металевих частин, що можуть опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції.
- Застосування ПЗВ (пристрою захисного відключення) з чутливістю не більше 30 мА у колі живлення двигуна і мікроконтролера [24].
- Подвійна або посилена ізоляція всіх провідників, що контактують з водою або розташовані біля резервуару [24].

Приклад:

Під час експлуатації стенду Arduino з датчиками та двигуном на 12 В використовуються блоки живлення з IP-рейтингом не нижче IP65, що дозволяє забезпечити пиловологозахист під час розбризкування води з резервуару.

5.2.2. Захист електрообладнання від вологи

Стенд містить відкритий резервуар із рідиною, тож існує ймовірність попадання крапель або пари на електронні компоненти. З метою захисту:

- Резервуар відділяється прозорим захисним екраном з полікарбонату (див. рисунок 5.2).
- Всі датчики та електронні модулі встановлюються на підвищених платформах або у герметичних корпусах.
- Використовуються конектори із класом захисту не нижче IP67.

Формула розрахунку граничного струму для ПЗВ:

$$I_{\text{утік}} = \frac{U}{R_{\text{тіла}}}$$

Де:

- $U = 230 \text{ В}$ – напруга в мережі,
- $R_{\text{тіла}} =$

1000 Ом – умовний опір тыла людини при вологій шкірі,

- $I_{\text{утік}} = 0,23 \text{ А (230 мА)}$ – смертельно небезпечний струм.

ПЗВ на 30 мА замикає коло при струмі, що у 7 разів менший – забезпечуючи безпеку.

5.2.3. Мінімальні конструктивні заходи

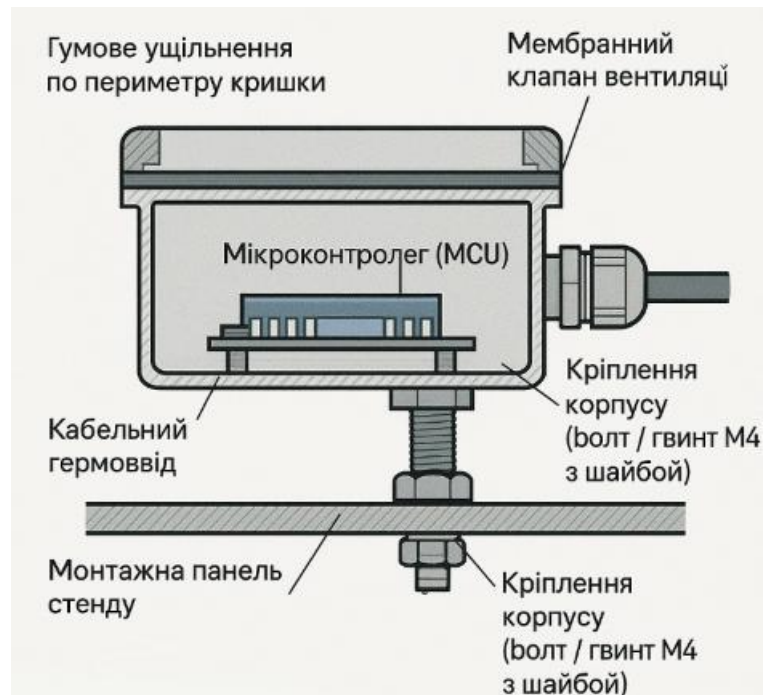
Для підвищення безпеки при експлуатації системи, розроблено ряд конструктивних рішень:

- Ізольоване встановлення плати Arduino та керуючого контролера у герметичному корпусі (рисунок 5.3).
- Прокладка проводів по ізольованих каналах, винесених за межі зони випаровування.

- Монтаж LED-індикатора включення живлення з метою попередження оператора.



Рисунок 5.2 – Захисний кожух резервуару з відбійником крапель



*Рисунок 5.3 – Монтаж мікроконтролера у герметичному корпусі з
кріпленням до панелі*

5.3 Вибір засобів захисту

Забезпечення безпеки при експлуатації науково-дослідного стенду, який містить обертові частини, електричне живлення та робоче середовище у вигляді води, вимагає ретельного добору засобів індивідуального та колективного захисту. Неналежний захист може призвести до травм, ураження електричним струмом або пошкодження обладнання. У даному розділі проведено аналіз небезпек та надано обґрунтований вибір необхідних засобів захисту для персоналу, що працює зі стендом у лабораторних умовах.

5.3.1 Захисний кожух пропелера

- Для запобігання контакту з обертовими лопатями пропелера застосовується механічний кожух з ударостійкого полікарбонату або металевої сітки.
- Повинен покривати всю площу руху лопатей.

Приклад – рисунок 5.1

5.3.2 Захист резервуару

- Встановлюється прозорий або металевий захисний кожух резервуару з відбійником крапель та кришкою для уникнення розбризкування.

5.3.3 Електрична безпека

- Використовується захисне заземлення та диференційний автомат захисту (УЗО) на лінії живлення мікроконтролера, приводу та периферії.
- Усі кабельні з'єднання виконуються через герметичні вводи (IP65).

5.3.4 Герметизація електроніки

Мікроконтролер та блок живлення розміщуються у герметичному корпусі, змонтованому на монтажній панелі.

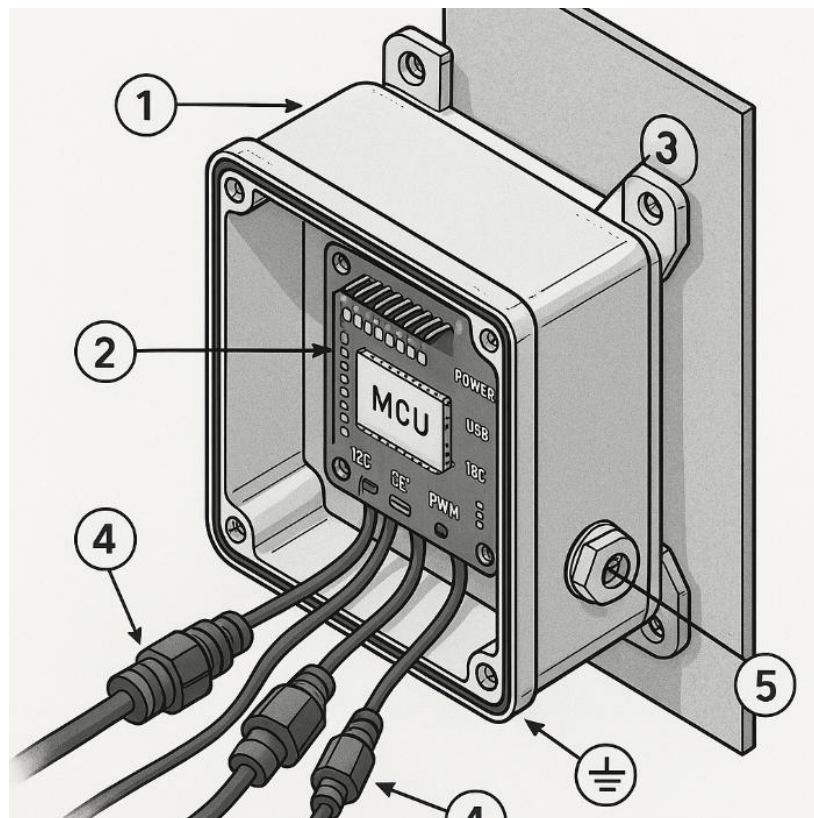


Рисунок 5.4 – Монтаж мікроконтролера у герметичному корпусі з кріпленням до панелі

1 – Герметичний корпус, 2 – мікроконтролер, 3 – кріплення корпусу до панелі, 4 – кабельні вводи/гермо вводи, 5 – вентиляційна мембрана або дренаж, 6 – заземлення (для металевих корпусів).

5.3.5 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Для осіб, що безпосередньо обслуговують стенд, рекомендовано використовувати наступні ЗІЗ:

Назва ЗІЗ	Призначення
Діелектричні рукавички	Захист від ураження струмом при підключенні/відключенні кабелів
Захисні окуляри	Захист очей від води, уламків чи обертання пропелера
Протиковзне взуття	Запобігання падінням у зоні з можливими протіканнями
Навушники або беруші	При рівні шуму > 85 дБА при роботі двигуна
Лабораторний халат/комбінезон	Захист одягу та тіла від води та масла

5.3.6 Вибір класу електрозахисту

Мікроконтролер і двигун працюють від джерела постійного струму 12–24 В, однак через наявність адаптерів, блоків живлення та конвертерів передбачається використання засобів 2-го класу захисту згідно ДСТУ ІЕС 61140:2014 [24].

Розрахунок струму ураження (при випадковому контакті):

$$I = \frac{U}{R_{\text{тіла}}}$$

$$\text{При } U = 24\text{В}, R_{\text{тіла}} = 1000\omega$$

$$I = \frac{24}{1000} = 0.024\text{А} = 24\text{мА}$$

Це перевищує поріг відчутного ураження (5–10 мА), тому ЗІЗ обов'язкові.

Таблиця 5.1 – Засоби індивідуального захисту при роботі зі стендом

№	Тип небезпеки	Засіб індивідуального захисту (ЗІЗ)	Примітка
1	Контакт з обертовими елементами (пропелер)	Захисні рукавиці, екрани, кожухи	Механічний захист рук і тіла
2	Електричне ураження при замиканні або несправності	Діелектричні рукавиці, взуття, ізоляційні інструменти	Захист при обслуговуванні електроніки
3	Попадання води або рідини на обличчя/очі	Захисні окуляри, щитки	При роботі з резервуаром
4	Підвищений рівень шуму при роботі пропелера	Протишумові навушники або вкладиші	Захист слуху
5	Переміщення вантажів та обладнання	Захисне взуття з металевим носком	Захист ніг від ушкоджень

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5

У ході аналізу питань охорони праці, пов'язаних з розробкою та експлуатацією стенду для автоматизованих досліджень гідродинамічних характеристик пропелерів дронів, було виявлено ряд потенційних небезпек, обумовлених специфікою досліджуваного об'єкта, типом обладнання та умовами роботи.

Особливу увагу було приділено ризикам, пов'язаним з роботою електричних та обертових елементів, оскільки стенд містить потужний двигун, пропелер, електронні компоненти та датчики, що працюють у потенційно вологому середовищі (резервуар з рідиною). Також розглянуто небезпеку механічного травмування, ураження електричним струмом, потрапляння сторонніх тіл у зону обертання гвинта та розбризкування рідини. У відповідь на це в проекті було розроблено комплекс інженерно-технічних заходів, серед яких – використання захисного кожуха пропелера,

герметичного корпусу для електроніки, захисного кожуха резервуару з краплевідбійником, а також системи аварійного відключення живлення.

На основі типових норм і вимог законодавства України у сфері охорони праці (Закон України "Про охорону праці", ДНАОП, ДСТУ, ГОСТ тощо) було запропоновано систему засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), включаючи захисні окуляри, рукавички, антислізьке взуття, а також організаційні заходи – проведення інструктажів, обмеження доступу до небезпечної зони, маркування та візуалізацію небезпечних ділянок.

У розділі також було проведено аналіз пожежо- та електробезпеки, що особливо актуально при наявності джерел живлення, електродвигунів та нагрівальних елементів у середовищі з підвищеною вологістю. Здійснено розрахунки опору заземлення та підібрано відповідні елементи захисного заземлення та автоматичного вимкнення живлення у разі перевантаження або короткого замикання.

Крім технічних рішень, у роботі наголошено на важливості психофізіологічної безпеки оператора, комфортних умов праці (освітлення, мікроклімат, рівень шуму), а також на належній організації робочого місця з урахуванням ергономіки.

Таким чином, впроваджені заходи дозволяють:

- мінімізувати професійні ризики;
- підвищити безпеку обслуговуючого персоналу;
- забезпечити відповідність системи сучасним нормам охорони праці та технічним регламентам;
- гарантувати безпечну та безаварійну експлуатацію дослідницького стенду у цивільних умовах, включаючи навчальні лабораторії, наукові установи або дослідницькі центри з вивчення гідродинаміки.

Реалізація наведених заходів забезпечує не лише відповідність нормативним актам, але й формує культуру безпеки праці, що є невід'ємним елементом будь-якої сучасної технічної системи.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

1. Виконана кваліфікаційна робота реалізує та впроваджує у проєкт ідею функціонального прототипу АСК вимірювальної системи дослідження гідродинамічних характеристик пропелерів та гвинтів дронів, яка забезпечуватиме інструментально процес розвитку безпілотних платформ повітряного та водного функціонування і комбінованих середовищах, що є актуальним та практично значущим для забезпечення тягових характеристик рушіїв.
2. Етапи роботи від аналітично-теоретичного аналізу сучасних методів вимірювання характеристик лопатевих рушіїв як традиційних так і АСК збору даних, включно з механічними, оптичними та комп'ютерно-моделюючими підходами дозволили сформулювати вимоги до створення проєкту власного стенду, який поєднує високу точність, швидкодію та зручність подальшого аналізу результатів.
3. Технічна частина дослідження представляє архітектуру стенду з урахуванням особливостей середовища, обґрунтовує вибір сенсорних компонентів: тензодатчиків для вимірювання осьової тяги; оптичних датчиків обертів; цифрових термодатчиків; апаратної платформи Arduino, як гнучкого і доступного рішення для обробки сигналів у реальному часі. Значна увага приділялась ергономії конструкції та її стійкості до впливу вологи, що критично для лабораторних експериментів у рідинному середовищі.
4. Математичне й імітаційне моделювання у середовищі MATLAB інструментами Simulink, що представило дослідження декілька рівнів моделей: від спрощеної емпіричної до повної структурної схеми АСК дозволить вивчати і досліджувати функціонування об'єкту при зміні вхідних сигналів, оцінювати інерційність системи, згенерувати

перехідні характеристики, виявляти можливі режими нестабільності й уточнювати вимоги до регуляторів.

5. Однією з ключових переваг розробленого проєкту стенду є реалізація замкненої АСК із стабілізацією частоти обертання рушія на основі синтезу ПІД-регулятора. Налаштування параметрів регулятора дозволило досягти високої точності стабілізації режиму, що було підтверджено як через моделювання, так і під час експериментальних тестів. Наприклад, при переході системи з нульового навантаження до робочої частоти 3000 об/хв час виходу на стабільний режим становив менше 2 секунд, а перерегулювання залишалось в межах 5%, що відповідає вимогам до сучасних регуляторів середнього класу.
6. Проєкт стенду, що розроблено у підсумку, не лише виконав покладені на нього функції, а й демонструє потенціал для масштабування та подальшої інтеграції в більш складні автоматизовані лабораторні комплекси для науково-дослідних лабораторій, індустріального тестування водяних або гібридних рушіїв БПЛА, а також може бути адаптованим для освітніх закладів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціоналу АСК, зокрема – реалізацію адаптивних регуляторів, вбудовану діагностику стану двигунів, а також впровадження засобів машинного навчання для інтелектуального аналізу зібраних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bauersfeld, L., et al. (2024). Characterizing the Downwash of a Quadrotor as a Turbulent Jet. arXiv preprint arXiv:2403.13321. <https://arxiv.org/abs/2403.13321>
2. Tyto Robotics. (n.d.). Series 1580/1585 Test Stands. Retrieved from <https://www.tytorobotics.com/pages/series-1580-1585>
3. Zhang, Y., et al. (2021). Comparative Hydrodynamic Performance of Two Types of Propellers Using CFD. Applied Sciences, 11(11), 4919. <https://doi.org/10.3390/app11114919>
4. Трунов, О. М., Поздняков, О. В., & Терещенко, Г. Ю. (2024). Ефективність та удосконалення застосування дронів у АСК побуту. Тези доповідей Ольвійський форум-2024. Миколаїв. [Електроний репозитарій КРС ЧНУ](#)
5. Гончаренко, М. О. (2023). Підводний дрон: дипломний проєкт. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1e762d89-2090-4edd-a6f0-3f0955bdbbc02/content>
6. Colin B. Benjamin. Characterization and Optimization of a Propeller Test-Stand. Master's thesis, Old Dominion University, 2019. DOI: 10.25777/8zmp-r426. URL: https://digitalcommons.odu.edu/mae_etds/198/
7. N A N Rosli et al. Load Cell Design for Measurement of Propeller Thrust. International Journal of Aviation Science and Engineering, 2024, Vol. 6(1), pp. 22–29. DOI: 10.47355/AVIA.V6I1.96. URL: <https://avia.ftmd.itb.ac.id/index.php/jav/article/download/96/74/249>
8. Zbigniew Czyż, Paweł Karpiński et al. Wind Tunnel Performance Tests of the Propellers with Different Pitch for the Electric Propulsion System. Sensors, 2022, Vol. 22(1), Art. 2. DOI: 10.3390/s22010002. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010002>

9. “Arduino with Load Cell and HX711 Amplifier” // RandomNerdTutorials, 2022. URL: <https://randomnerdtutorials.com/arduino-load-cell-hx711/>
10. Muhammad Osman Jamil et al. Thrust Testbed for Performance Analysis of Two-Bladed Propellers. BSc thesis, University of Management and Technology, 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/382150761_Thrust_Testbed_for_Performance_Analysis_of_Two-Bladed_Propellers
11. Load Cell Amplifier HX711 Breakout Hookup Guide // SparkFun Learn, 2018. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide/all>
12. Instructables. Brushless Motor Thrust Stand. Опубліковано авторами проекту, 2018. URL: <https://www.instructables.com/Brushless-Motor-Thrust-Stand/>
13. GitHub. Pablo18011. RC-MOTOR-THRUST-STAND. Опубліковано користувачем, 2022. URL: <https://github.com/Pablo18011/RC-MOTOR-THRUST-STAND>
14. Arduino Forum. Using load cell to control motor speed/thrust. Опубліковано May 2022. URL: <https://forum.arduino.cc/t/using-load-cell-to-control-motor-speed-thrust/989749>
15. Omar Salem, Ameen Hasan, Neal Zain Edden та ін. Propeller Pendulum Control by MATLAB/Simulink. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-36895-0_46. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_46
16. Su P., Chang G., Wu J. та ін. Design and Experimental Study of an Embedded Controller for a Model-Based Controllable Pitch Propeller. Applied Sciences, 2024, 14(10):3993. DOI: 10.3390/app14103993. URL: <https://doi.org/10.3390/app14103993>

17. D. J. Gauthier, N. Biederman, B. Gyovai та ін. Digital Twin of a DC Brushless Electric Motor-Propeller System with Application to Drone Dynamics. arXiv:2312.09981, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.09981>
18. Шабрацький В. Ф. Дослідження гідродинамічних характеристик турбін і пропелерів: дис. канд. техн. наук / Сумський держ. ун-т. – Суми, 2020. – 212 с. Розділ 1: огляд методів виміру гідродинамічних параметрів. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/49727/1/diss_Shabratskyi.pdf
19. Липовий В. М. Розробка стенда для вимірювання характеристик гідромлинів: дис. канд. техн. наук / Київ. н.-д. техн. ін-т. – Київ, 2021. – 180 с. Детально описані сенсори сили і моделі стенду. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/324225060.pdf>
20. Слободянюк І. С., Будашко В. В. Ідентифікація показників гідродинамічного потоку гребних гвинтів // Електромеханічні та енергетичні системи. – Кременчук, КрНУ, 2017. – С. 84–85. Призначено для ідентифікації параметрів потоку – корисні для моделювання. URL: http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO_2017.pdf
21. Збірник конференції MINTT-2024, Херсонська Морська Академія – містить матеріали щодо розробки гідродинамічних стендів, сенсорики і моделювання руху у водному середовищі. URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/05/Збірник-MINTT-2024-.pdf>
22. Закон України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>
23. ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків» (EN ISO 12100:2010, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/12100-2016.pdf>

24. ДСТУ EN 60204-1:2015 «Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги». Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. (Стандарти перевірені ДСТУ EN ISO 12100.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0097774-15>