

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТУ**

здобувачеві Гамову Олексію Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення лабораторного макету для дослідження
характеристик PID регулятора на базі Arduino

Затверджено наказом по університету від 22.11.2024 №1231 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження

3.2 Розробка структурної схеми лабораторного макету для дослідження ПІД
регулятора

3.3 Вибір компонентів та побудова лабораторного макету

3.4 Опис законів регулятора та автоматичних регуляторів

4. Реалізація цифрового ПІД-регулятора

4.1 Вступ;

4.2 Експериментальні дослідження

4.3 Опис методики проведення експерименту

4.4 Опис функції та призначення PID-регуляторів

4.5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлені у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 стор. Формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та аналогічних існуючих продуктів	02.09.2024 – 01.10.2024	виконано
2	Аналіз предметної області та постановка задач	01.10.2024 – 18.10.2024	виконано
3	Розробка структурної схеми	18.10.2024 – 05.11.2024	виконано
4	Вибір компонентів та побудова лабораторного макету	05.11.2024 – 07.11.2024	виконано
5	Реалізація цифрового ПД-регулятора	07.11.2024 – 22.11.2024	виконано
6	Опис методики проведення експерименту	22.11.2024 – 01.12.2024	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2024 – 12.01.2025	виконано
8	Подання роботи у ЕК	13.01.2025	виконано

Дата видачі завдання _____ 02.09.2024

Здобувач _____ Гамов О.В.
(підпис)

Керівник роботи _____ Новоселов С.П.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«19» грудня 2024 р.



Гамов О.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 65 с., 1 табл., 42 рис., 2 дод., 11 джерел.

ПІД-РЕГУЛЯТОР, ЦАП, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА
УПРАВЛІННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ARDUINO, МОВА ПРОГРАМУВАННЯ
C/C++

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого управління промисловими технологічними процесами.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та лабораторні макети для вивчення промислової автоматики.

Мета дослідження – підвищення якості підготовки фахівців з автоматизації шляхом розробки та впровадження лабораторного макета для дослідження автоматизованих систем управління на основі ПІД-регуляторів.

Методи дослідження – теорія автоматичного регулювання, алгоритми цифрової обробки сигналів, програмування мікроконтролерів, розробка електронних схем.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано існуючі лабораторні макети, їх конструктивні особливості, функціональні можливості та методи застосування. На основі цього розроблено структурну схему, алгоритми функціонування, а також електричну принципову схему макета для дослідження ПІД-регулятора. Було здійснено вибір апаратних компонентів, таких як контролери, сенсори, RC-ланки та інші елементи, що забезпечують функціональність макета. Реалізовано цифровий ПІД-регулятор із використанням мікроконтролера Arduino Nano, зокрема алгоритми регулювання з пропорційними, інтегральними та диференціальними складовими. Програмна реалізація системи управління із замкнутим контуром була протестована на моделюваних та реальних процесах.

Розробка спрямована на вдосконалення навчального процесу через впровадження лабораторного макета у освітні програми. Такий підхід сприяє досягненню Цілі сталого розвитку 9 – "Індустрія, інновації та інфраструктура", оскільки забезпечує розвиток інноваційних освітніх технологій. Лабораторні макети дають змогу готувати висококваліфікованих фахівців для сучасних виробництв, наближаючи навчальний процес до реальних умов роботи, а також підвищують ефективність використання технологій у промисловій автоматизації.

Отримані результати сприяють створенню інноваційного інструменту навчання, що поєднує апаратні й програмні компоненти. Запропонований макет моделює роботу промислової системи управління, забезпечуючи доступність і ефективність практичного навчання. Це є важливим кроком у розвитку сучасної інженерної освіти, орієнтованої на формування практичних навичок роботи з автоматизованими системами управління.

ABSTRACT

Explanatory note: 65 p., 1 table, 42 figures, 2 appendix, 11 sources.

**PID CONTROLLER, DAC (DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER),
AUTOMATED CONTROL SYSTEM (ACS), ARDUINO MICROCONTROLLER,
C/C++ PROGRAMMING LANGUAGE**

The object of the study is the process of automated control of industrial technological processes. The subject of the study is the methods, algorithms, and laboratory models for studying industrial automation. The purpose of the study is to improve the quality of training specialists in automation through the development and implementation of a laboratory model for studying automated control systems based on PID controllers. The research methods include the theory of automatic regulation, algorithms for digital signal processing, microcontroller programming, and the development of electronic circuits.

During the course of the thesis work, existing laboratory models, their design features, functional capabilities, and methods of application were analyzed. Based on this analysis, a structural diagram, functional algorithms, and an electrical schematic diagram of the model for studying PID controllers were developed. Hardware components such as controllers, sensors, RC circuits, and other elements ensuring the functionality of the model were selected. A digital PID controller was implemented using an Arduino Nano microcontroller, including regulation algorithms with proportional, integral, and derivative components. The software implementation of the closed-loop control system was tested on simulated and real processes.

The development is aimed at improving the educational process through the introduction of the laboratory model into educational programs. This approach

contributes to achieving Sustainable Development Goal 9 – "Industry, Innovation, and Infrastructure" by fostering the development of innovative educational technologies. Laboratory models enable the preparation of highly qualified specialists for modern industries, bringing the educational process closer to real working conditions and enhancing the efficient use of technologies in industrial automation.

The results contribute to the creation of an innovative learning tool that combines hardware and software components. The proposed model simulates the operation of an industrial control system, ensuring accessibility and effectiveness in practical learning. This is a significant step forward in the development of modern engineering education, focusing on the formation of practical skills for working with automated control systems.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	10
Вступ.....	11
1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження	13
1.1 Аналіз переваг застосування лабораторних макетів в навчальному процесі	13
1.2 Опис функцій та призначення PID-регуляторів	15
1.3 Аналіз аналогічних лабораторних макетів для вивчення промислової автоматизи- ки.....	18
1.4 Висновки по першому розділу	28
2 Розробка структурної схеми лабораторного макету для дослідження ПД регулятора.....	29
2.1 Опис законів регулювання та автоматичних регуляторів	29
2.2 Розробка структурної схеми лабораторного макета.....	35
2.3 Висновки по другому розділу	41
3 Вибір компонентів та побудова лабораторного макету	42
3.1 Опис схеми електричної принципової	42
3.2 Реалізація цифрового ПД-регулятора	45
3.3 Висновки по третьому розділу	50
4 Експериментальні дослідження.....	51
4.1 Опис методики проведення експерименту	51
4.2 Висновки по четвертому розділу кваліфікаційної роботи	59
Висновки.....	60
Перелік джерел посилань	62
Додаток А Лістинг коду.....	65
Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АП – автоматизований пристрій;

АСУ ТП – автоматизовані системи управління технологічними процесами;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ОУ – об'єкт управління;

ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПД – пропорційне диференційне регулювання;

ПІД – пропорційне інтегральне диференційне регулювання;

ПЛК – програмований логічний контролер;

САР – система автоматичного регулювання;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

PID – proportional integral derivative.

ВСТУП

Застосування лабораторних макетів у закладах вищої освіти є ключовим елементом у підготовці висококваліфікованих спеціалістів у галузі промислової автоматики. Вони дозволяють студентам поєднувати теоретичні знання з практичними навичками, знайомляться з реальними промисловими системами, що забезпечує їхню готовність до роботи на виробництві. Важливим завданням освітніх закладів є підтримка таких лабораторій у актуальному стані та впровадження інноваційних технологій для забезпечення високої якості навчання.

В перспективі розвиток технологій, таких як віртуальна реальність та доповнена реальність, може дозволити створювати віртуальні лабораторні макети, що зменшить вартість обладнання та розширить доступ студентів до різних видів макетів без необхідності їх фізичної присутності.

Вивчення основ PID-регулювання є критично важливим для інженерів, які займаються автоматизацією виробничих процесів. PID-регулятори допомагають підтримувати технологічні процеси на оптимальному рівні, забезпечуючи точне управління та стабільність системи. Студенти, які освоюють ці основи, набувають ключових навичок для роботи з сучасними автоматизованими системами, що робить їх підготовленими до вирішення складних інженерних завдань у різних галузях промисловості.

Метою цієї роботи є вдосконалення лабораторного обладнання для вивчення основ теорії автоматичного управління, а саме, принципів PID-регулювання на основі контролера Arduino.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес автоматичного регулювання параметрів радіоелектронного обладнання.

Предмет дослідження – метод PID-регулювання на основі контролера Arduino.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз переваг застосування лабораторних макетів в навчальному процесі;
- виконати опис методу PID-регулювання в автоматичі.
- побудувати структурну схему лабораторного макету;
- виконати побудову алгоритму та розробити програму для проведення експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень.

Оформити пояснювальну записку згідно ДСТУ 3008:2015 [1], методичних вказівок з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи [2], навчального посібнику з дипломного проекту [3] та положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз переваг застосування лабораторних макетів в навчальному процесі

У сучасному світі промислова автоматизація відіграє ключову роль у розвитку виробництва та технологій [5]. Підготовка висококваліфікованих спеціалістів з автоматизації є важливою складовою освіти в галузі інженерії, що включає вивчення таких дисциплін, як автоматизовані системи управління технологічними процесами, промислова електроніка, програмування промислових контролерів, сенсори та приводи тощо. Для ефективного засвоєння цих дисциплін необхідно не лише вивчення теорії, а й практичний досвід роботи з реальними промисловими компонентами та системами. Одним із найважливіших інструментів для цього є лабораторні макети, які допомагають студентам закріплювати отримані знання на практиці.

Лабораторні макети є моделюючими системами або стендами, що представляють промислові об'єкти в мініатюрі. Вони дозволяють студентам взаємодіяти з промисловими компонентами, контролерами, датчиками та іншими технічними засобами автоматизації. Основна мета використання таких макетів — навчання студентів реальній роботі з промисловими системами в умовах, максимально наближених до виробничих процесів.

Лабораторні макети надають можливість перевірити на практиці знання, отримані під час лекцій та семінарів. Студенти можуть безпосередньо застосовувати концепції, такі як налаштування ПЛК (програмованих логічних контролерів), робота з сенсорами, актуаторами та системами керування, що дозволяє їм краще зрозуміти, як працюють реальні автоматизовані системи.

Використовуючи макети студенти мають можливість працювати з компонентами, які використовуються в реальних виробничих умовах. Це

підвищує їхню готовність до роботи на виробництві після закінчення навчання, оскільки вони вже мають базовий досвід роботи з такими системами.

В процесі роботи з лабораторними макетами студенти розвивають навички, які є критично важливими в інженерії: налаштування та калібрування обладнання, програмування контролерів, усунення неполадок, аналіз помилок та вдосконалення процесів.

Лабораторні макети дозволяють студентам навчатися у безпечному середовищі, де помилки або невдачі не призведуть до катастрофічних наслідків, як це може бути у реальних виробничих умовах. Студенти можуть експериментувати з різними сценаріями, шукати оптимальні рішення і вчитися на своїх помилках.

Віртуальні та реальні лабораторні макети дозволяють студентам створювати нові рішення або модифікувати існуючі. Вони можуть бути використані для моделювання різних виробничих процесів, що допомагає студентам розвивати творчий підхід до вирішення інженерних завдань.

Лабораторні макети, що призначені для вивчення основ АСУТП можуть імітувати різні виробничі процеси, такі як транспортні системи, системи упаковки, обробка матеріалів або навіть складніші технологічні операції. Такі макети часто використовують датчики, актуатори, контролери для відображення повного циклу виробничого процесу.

Лабораторні макети з програмованими логічними контролерами дозволяють студентам вивчати програмування та налаштування ПЛК, які є основою багатьох автоматизованих систем на виробництві. Студенти можуть створювати власні програми для керування процесами, тестувати їх і коригувати.

Лабораторні макети можуть включати різні типи сенсорів (температури, тиску, вологості, рівня тощо), що допомагають студентам зрозуміти, як працюють ці сенсори в контексті промислових процесів та як інтегрувати їх у загальну систему автоматизації.

Для дисциплін, пов'язаних з промисловою електронікою та енергетикою, лабораторні макети можуть моделювати роботу систем енергозабезпечення, розподілу електроенергії, енергозбереження тощо.

Хоча лабораторні макети мають величезні переваги, є і певні виклики, пов'язані з їх впровадженням у навчальний процес. Основні з них включають високі витрати на закупівлю та обслуговування макетів, необхідність постійного оновлення обладнання відповідно до сучасних тенденцій та технологій в промисловій автоматизації. Проте ці інвестиції виправдовуються високою якістю підготовки студентів.

У майбутньому розвиток технологій, таких як віртуальна реальність (VR) та доповнена реальність (AR), може дозволити створювати віртуальні лабораторні макети, що зменшить вартість обладнання та розширить доступ студентів до різних видів макетів без необхідності їх фізичної присутності.

1.2 Опис функцій та призначення PID-регуляторів

Серед основних компонентів автоматизованих систем управління технологічними процесами виділяються PID-регулятори [6]. Вони є найбільш поширеними в практиці автоматизації завдяки своїй універсальності, ефективності та здатності забезпечувати стабільне управління технологічними процесами.

Вивчення основ застосування PID-регуляторів є важливим етапом підготовки інженерів-автоматників, оскільки це дозволяє їм зрозуміти принципи роботи систем управління та опанувати методи регулювання різноманітних технологічних параметрів.

PID-регулятор – це тип зворотного зв'язку системи управління, який використовується для підтримання заданого значення контрольованої величини (наприклад, температури, тиску, швидкості або рівня) шляхом регулювання

впливу на процес. Основною особливістю PID-регулятора є те, що він поєднує три елементи управління [7].

Пропорційна (P) складова – визначає реакцію на поточну помилку (різницю між бажаним і фактичним значенням контрольованого параметра) [7, 8]. Чим більша помилка, тим більший вихідний сигнал

$$W(p) = kp, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт передачі (коефіцієнт посилення завжди більше 1).

Інтегральна (I) складова – враховує накопичену помилку з плином часу. Вона спрямована на усунення постійної систематичної похибки. Вихідний сигнал регулятора пропорційний інтегралу відхилення вихідної величини від заданого значення за часом. Динамічне відношення виражається передавальною функцією

$$W(p) = \frac{1}{T_i p}, \quad (1.2)$$

де T_i – настроюваний параметр (час інтеграції).

Пропорційно-інтегральний регулятор (PI) – вихідний сигнал змінюється під дією пропорційною і інтегральною складових [7, 8]. Передавальна функція схеми такого пристрою має вигляд

$$W(p) = kp + \frac{1}{T_i p}. \quad (1.3)$$

Диференціальна (D) складова – реагує на швидкість зміни помилки, передбачаючи подальшу поведінку системи та допомагаючи запобігти коливанням і надмірним відхиленням. Передавальна функція має вигляд

$$W(p) = T_d \cdot p, \quad (1.4)$$

де T_d – настроюваний параметр (час диференціювання).

Пропорційно-диференціальний регулятор (ПД) і пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД) – дозволяють у ряді випадків підвищити якість регулювання за рахунок обліку швидкості зміни вхідної величини регулятора, званою диференціальною складовою [7, 8]. Вплив Д-складової в ПД- і ПІД-регуляторах однакова. У замкнутому контурі при відхиленні регульованої величини від заданого значення ПД-регулятор вступає в роботу раніше, ніж відомий П-регулятор. Передавальна функція має вигляд

$$W(p) = kp + T_d \cdot p. \quad (1.5)$$

PID-регулятори використовуються у величезній кількості промислових процесів. Вони застосовуються для управління температурою в печах, тиском у трубопроводах, швидкістю обертання двигунів, рівнем рідини в резервуарах та багатьма іншими процесами. Тому знання про PID-регулятори є фундаментальним для будь-якого інженера, який працює в галузі автоматизації.

Одним із головних завдань регулятора є стабілізація процесу на заданому рівні. PID-регулятори допомагають підтримувати технологічні параметри в межах допустимих значень, забезпечуючи стабільність і надійність роботи обладнання. Знання принципів налаштування та застосування PID-регуляторів дозволяє інженерам розробляти ефективні системи управління, які мінімізують відхилення від заданих значень.

PID-регулятори допомагають підвищити ефективність роботи обладнання, оптимізуючи його роботу шляхом точного регулювання. Наприклад, регулювання температури з використанням PID-регулятора дозволяє зменшити витрати енергії, а регулювання швидкості двигунів сприяє зниженню зносу обладнання.

PID-регулятори можуть бути налаштовані для різних технологічних процесів шляхом коригування коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та

диференціальної складових. Це дає можливість адаптувати їх під конкретні потреби і характеристики системи.

Використовуючи лабораторні макети, що дають можливість змоделювати роботу PID-регулятора, студенти можуть навчитись аналізувати поведінку системи управління і розуміють, як змінюються параметри під дією різних налаштувань PID-регулятора. Використання математичних моделей і симуляцій дозволяє експериментувати з різними конфігураціями регуляторів.

Одним з найважливіших аспектів є налаштування регуляторів на реальному обладнанні. Студенти отримують досвід роботи з промисловими системами, програмування ПЛК (програмованих логічних контролерів) і налаштування відповідних параметрів регулювання. Це дозволяє їм зрозуміти, як PID-регулятор впливає на поведінку технологічного процесу.

Вивчення основ PID-регулювання допомагає студентам зрозуміти реальні процеси, такі як управління теплом, тиском, потоками, і надає можливість оцінювати динаміку цих процесів у різних умовах. Це забезпечує кращу підготовку до реальної роботи з промисловими системами.

1.3 Аналіз аналогічних лабораторних макетів для вивчення промислової автоматички

1.3.1 Аеродинамічна труба від компанії Control Engineering Innovative Energy Systems [9]

Аеродинамічна труба – це система, в якій м'яч контролюється на певній висоті в пластиковій трубі за допомогою двигуна постійного струму з 30-мм пропелером і відповідним контролером.

Система плаваючої кулі включає наступні елементи: лазерний датчик, мікроконтролер Arduino Mega 2560, двигун DC-20-8.5 з пропелером 30 мм, LCD з розширювачем I2C, світлодіодну стрічку RGB з APA102 і BallShield для Arduino Mega. Зовнішній вигляд макету показано на рисунку 1.1.

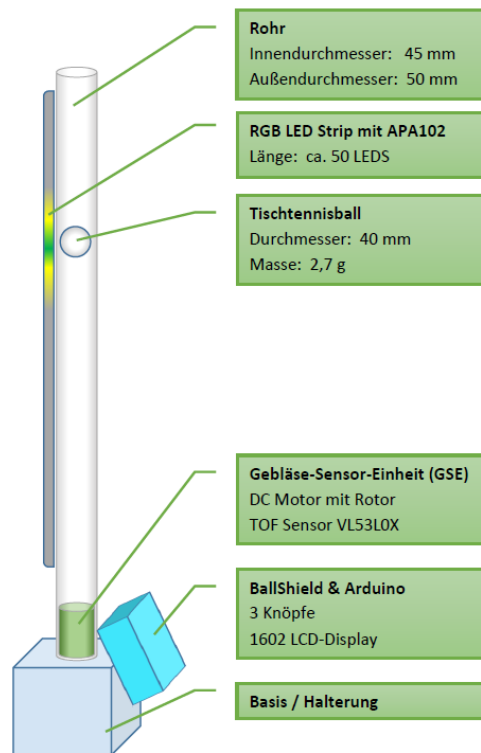


Рисунок 1.1 – Схема лабораторного макету «Аеродинамічна труба»

У цьому лабораторному макеті м'яч для пінг-понгу контролюється на певній висоті в трубці з оргскла. Висота труби становить приблизно 800 мм, і кулька підштовхується на певну висоту потоком повітря за допомогою двигуна з пропелером. У нижній частині трубки знаходиться силова електроніка (наприклад, на кульовому екрані) і мікроконтролер.

Згідно теорії автоматичного управління [7, 8], контролери автоматично впливають на фізичні змінні в основному технічному процесі таким чином, щоб задане значення підтримувалося якомога краще навіть за наявності порушень (рисунок 1.2).

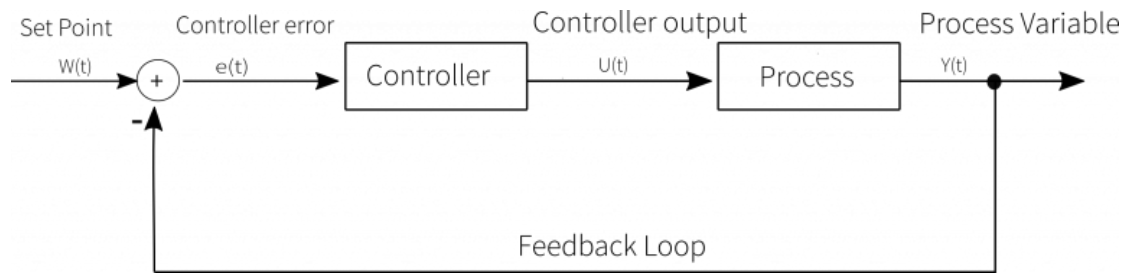


Рисунок 1.2 – Принцип роботи замкненої системи регулювання

Система керування із замкнутим контуром – це технічний пристрій, призначений для автоматичного підтримання контрольованої змінної Y (вихід системи – встановлене значення висоти кульки) на заданому значенні, еталонної змінної w (вхід – фактичне значення висота кулі). Метою системи керування із замкнутим циклом є використання приводу для мінімізації відхилення керування e навіть під впливом змінних збурень.

Контур керування описує самодостатній процес впливу на керовану змінну X таким чином, щоб керована змінна X досягала та підтримувала значення еталонної змінної W . У контурі керування ми говоримо про безперервну послідовність вимірювання – порівняння – налаштування.

Розглянемо наведену вище систему (рисунок 1.1) у статичній області, тобто м'яч знаходиться на певній висоті і залишається там незмінним. Тоді, з фізичної точки зору, ми можемо використовувати перший закон Ньютона для опису системи, який говорить:

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \quad (1.6)$$

ми можемо проаналізувати сили, що діють на систему плаваючої кулі (рисунок. 1.3).

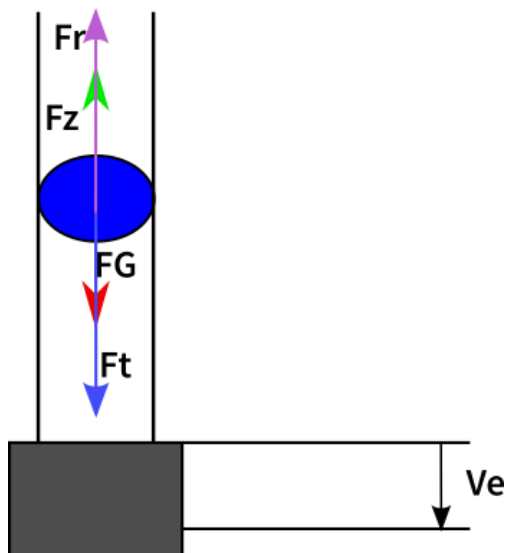


Рисунок 1.3 – Фізичне зображення експерименту з плаваючою кулькою

На рисунку 1.3 на кульку діють 4 різні сили:

– сила ваги:

$$F_G = m \cdot g, \quad (1.7)$$

де m – маса кулі;

g – прискорення сили тяжіння;

– сила інерції маси:

$$F_t = m \cdot \ddot{z}, \quad (1.8)$$

де \ddot{z} – друга похідна за часом від висоти;

– сила тертя:

$$F_r = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \mu_0 \cdot v, \quad (1.9)$$

де r – радіус кулі;

μ_0 – динамічна в'язкість повітря;

v – кінцева швидкість;

– сила тяги:

$$F_z = \delta p \cdot A_b, \quad (1.10)$$

де δp – різниця тиску повітря між верхню і нижню частину кулі;
 A_b – площа поперечного перерізу кулі.

На рисунку 1.4 показана схема лабораторного макету.

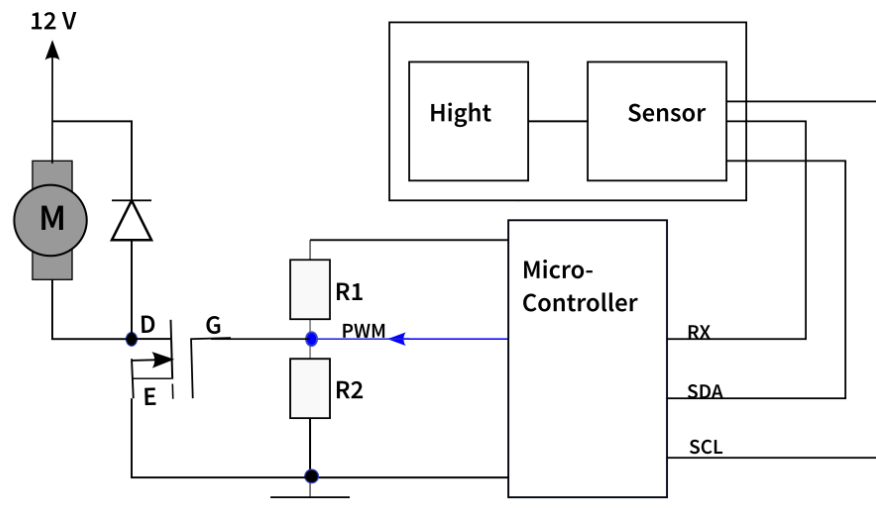


Рисунок 1.4 – Схема лабораторного макету

За допомогою даного лабораторного макету виконується налаштування контролера для контролю швидкості м'яча за допомогою методу стабільності Ziegler Nichols. Для цього виконується така послідовність дій:

- використовується P-контролер, щоб знайти критичне посилення $K_{\text{крит}}$ і пов'язаний період t_{Tu} (тривалість періоду на графіку, який отримано в результаті експерименту) при заданому значенні 12 В (з Matlab);
- налаштування контролера Ziegler Nichols. Для цього використовується таблиця 1.1 щоб визначити параметри ПІД-регулятора;
- отриманий параметр підставляється в рівняння

$$R(S) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot S} + T_v \cdot S \right) . \quad (1.11)$$

щоб визначити значення ПІД-регулятора.

Таблиця 1.1 – Параметри регулятора

Тип регулятора	K_r	TN	T_v
P	$0,5 K_{\text{крит}}$	-	-
PI	$0,45 K_{\text{крит}}$	$0,85 T_u$	-
PID	$0,6 K_{\text{крит}}$	$0,5 T_u$	$0,12 T_u$

1.3.2 Лабораторний макет VTOL від QNET Trainer [10]

На рисунку 1.5 показаний лабораторний макет для дослідження ПІД регулятора на прикладі вирішення задачі вертикального зльоту та посадки.



Рисунок 1.5 – Лабораторний макет від QNET для дослідження ПІД регулятора

Система складається з вентилятора з регульованою частотою обертання, укріпленого на важелі і з захисною огорожею. На іншому кінці важеля закріплено регульовану противагу. Це дозволяє змінювати становище ваги, що, своєю чергою, впливає динаміку всієї системи. Вісь важеля зістикована з віссю енкодера. Це дозволяє визначити кут нахилу системи VTOL.

Пристрій VTOL розбивається на дві підсистеми: динаміка напруга-струм двигуна і динаміка ток-положення важеля VTOL. Схема каскадного регулювання, реалізованого у тренажері VTOL, показано на рисунку 1.6. Підрегулятор струму у внутрішньому циклі, призначений для регулювання струму у двигуні відповідно до заданої уставки по струму. Ця уставка генерується ПІД-компенсатором у зовнішньому циклі контролера, який керує відхиленням тренажера VTOL.

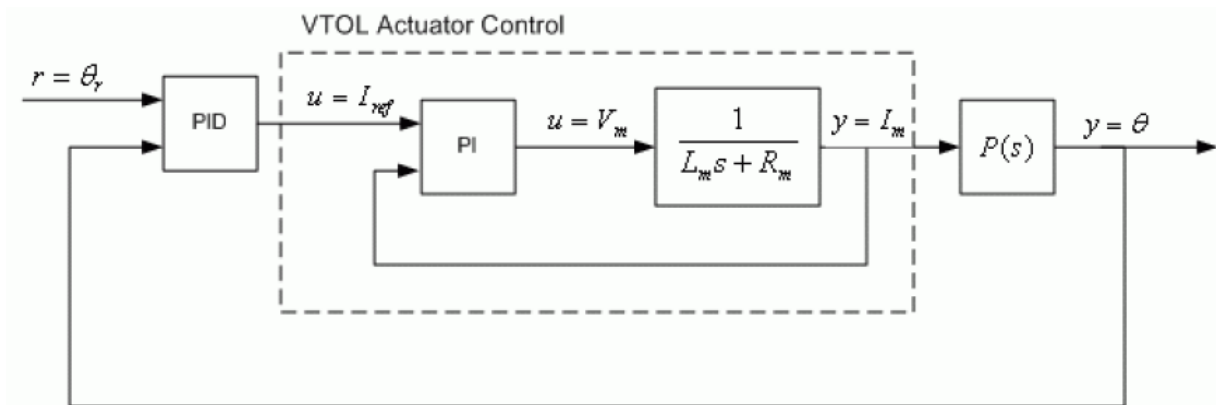


Рисунок 1.6 – Система каскадного регулювання лабораторного макету VTOL

У випадках, коли актюатор має відносно повільну динаміку, наприклад, як електромагніт з великою індуктивністю, має сенс розробити регулятор струму. Як правило, регулювання струму в навантаженні використовується пропорційно-інтегральний компенсатор. Це робить динаміку актюатора несуттєвою та спрощує проектування зовнішнього циклу.

У цьому випадку зв'язок напруги та струму двигуна лабораторного макету VTOL у часовій області може бути описаний рівнянням

$$v_m(t) = R_m i_m(t) + L_m \left(\frac{d}{dt} i_m(t) \right), \quad (1.12)$$

де R_m – опір обмотки якоря двигуна;

i_m – струм в електричному колі;

L_m – індуктивність.

Передатна характеристика має вигляд

$$I_m(s) = \frac{V_m(s)}{R_m + L_m s}. \quad (1.13)$$

На рисунку 1.7 показана реалізація системи управління струмом. ПІ-компенсатор обчислює напругу, що необхідна для отримання заданого струму.

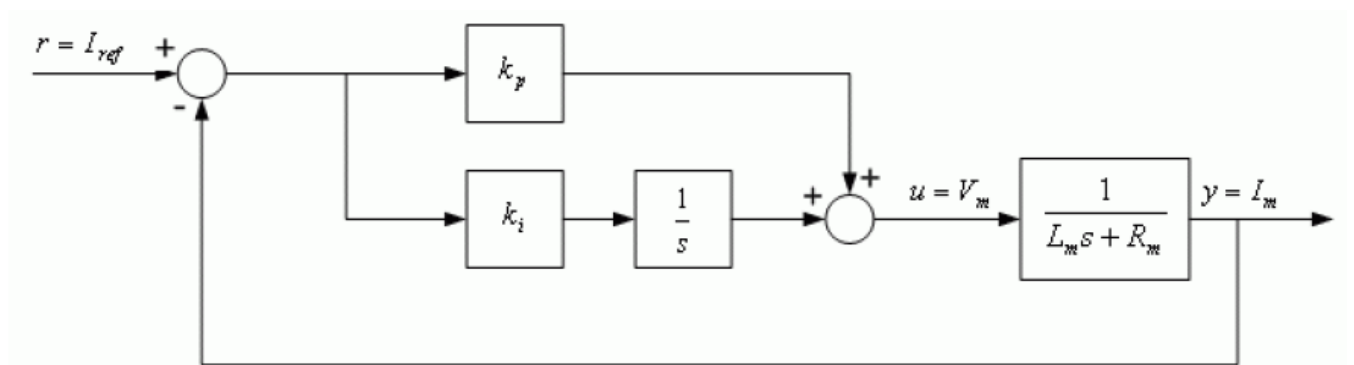


Рисунок 1.7 – Контур ПІ-регулювання струму двигуна

Віртуальний прилад, який використовується для запуску регулятора струму в системі вертикального зльоту та посадки QNET, показано на малюнку 1.8.

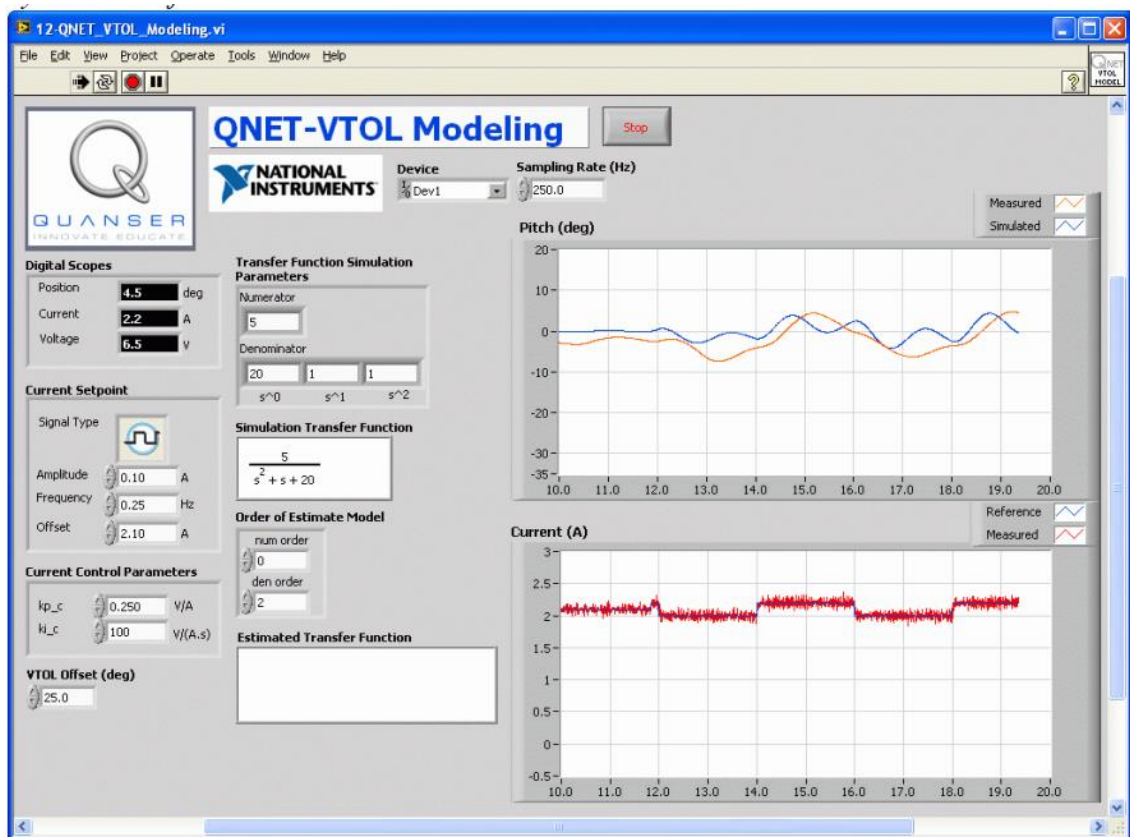


Рисунок 1.8 – Віртуальний прилад LabVIEW для регулювання струму у лабораторному макеті QNET-VTOL

На відміну від двигуна постійного струму, ця система описана моделлю другого порядку. Рівняння руху виводиться з основних принципів автоматичного регулювання і використовується для отримання передавальної функції, що представляє співвідношення струму та положення VTOL.

Для знаходження параметрів моделі можна використовувати різні методи. У лабораторній роботі параметри спочатку знаходяться вручну шляхом виконання вимірювань у кількох експериментах. Потім використовується LabVIEW System Identification Toolkit для автоматичної побудови моделі. Таким чином, демонструється використання програмних інструментів для визначення параметрів моделей або навіть моделей цілком (що особливо важливо в системах вищого порядку). Далі правильність моделювання підтверджується запуском отриманої моделі паралельно із реальною системою.

Схема сил вільного тіла – пристрій VTOL вертикального зльоту та посадки з одним ступенем свободи, що обертається навколо осі тангажу, показана на рисунку 1.9.

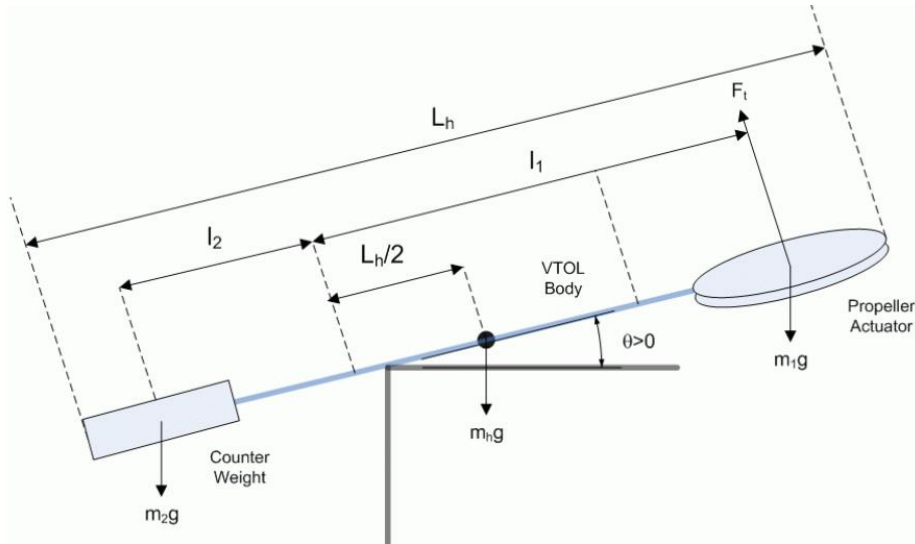


Рисунок 1.9 – Схема лабораторного макету VTOL

Обертальний момент, що генерується пропелером, і гравітаційний момент, зумовлений противагою, діють в одному напрямку, протилежному гравітаційним моментам, що діють на тіло апарату та лопаті пропелера.

На рисунку 1.10 показана схема ПД-регулювання, що використовується у пристрої VTOL.

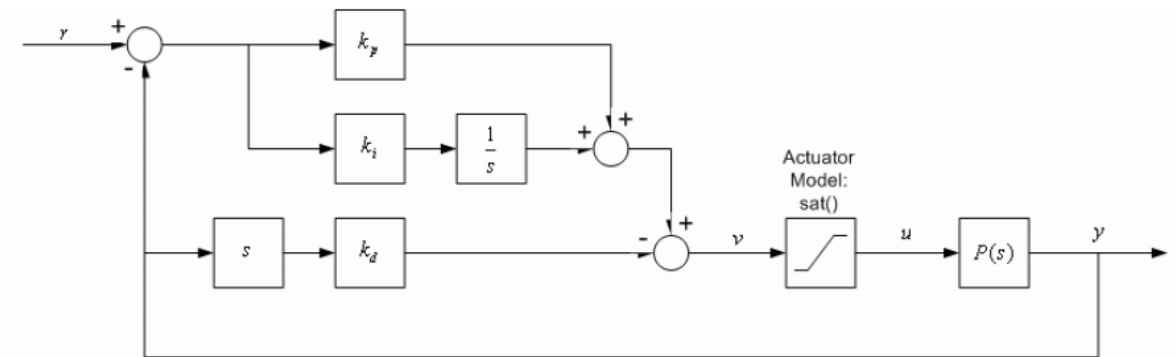


Рисунок 1.10 – Схема ПД-регулювання

Отриманий графік роботи ПІД регулятора за допомогою віртуального макету показаний на рисунку 1.11.

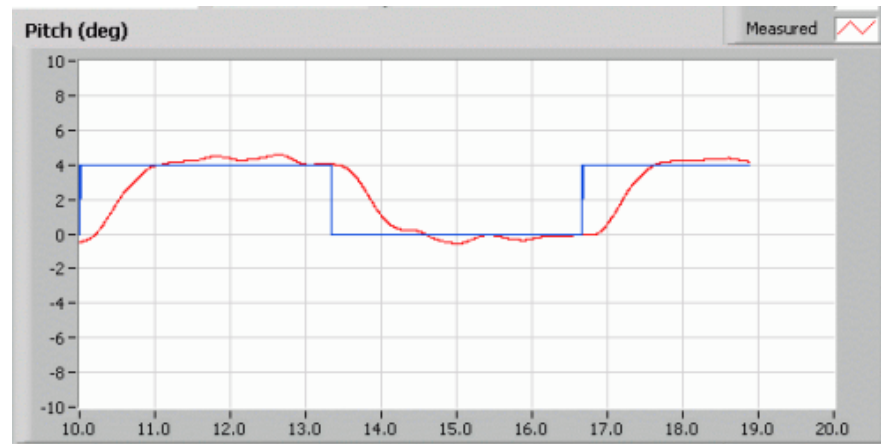


Рисунок 1.12 – Отриманий графік роботи ПІД регулятора

1.4 Висновки по першому розділу

В результаті виконання першого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз переваг застосування лабораторних макетів в навчальному процесі. З'ясовано, що лабораторні макети надають можливість перевірити на практиці знання, отримані під час лекцій та семінарів.

Описані функції та призначення PID-регуляторів і наведено приклади пристроїв, де вони можуть застосовуватись.

Розглянуті схеми аналогічних лабораторних макетів для вивчення промислової автоматики. Такими макетами є аеродинамічна труба від компанії Control Engineering Innovative Energy Systems, лабораторний макет VTOL від QNET Trainer, віртуальний прилад LabVIEW для регулювання струму у лабораторному макеті QNET-VTOL. Визначені основні функції, що притаманні лабораторним макетам для вивчення основ теорії автоматичного управління та застосування її в системах автоматизації на виробництві.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІД РЕГУЛЯТОРА

2.1 Опис законів регулювання та автоматичних регуляторів

Для реалізації перехідних процесів у САУ реальними об'єктами застосовують автоматичні регулятори – спеціальні автоматичні пристрої, що підключаються до об'єкта регулювання, які забезпечують підтримку заданих значень його регульованих величин або зміну їх за певним законом.

На рисунку 2.1 наведена схема найпростішої системи управління з регулюючим пристроєм (РП).

Законом (алгоритмом) регулювання називають математичну залежність між вихідним регулюючим впливом Y_p і вхідним відхиленням X_p регульованої величини Y від заданого значення Y_0

$$Y_p = f(X_p), \quad (2.1)$$

де $X_p = Y_0 - Y$.

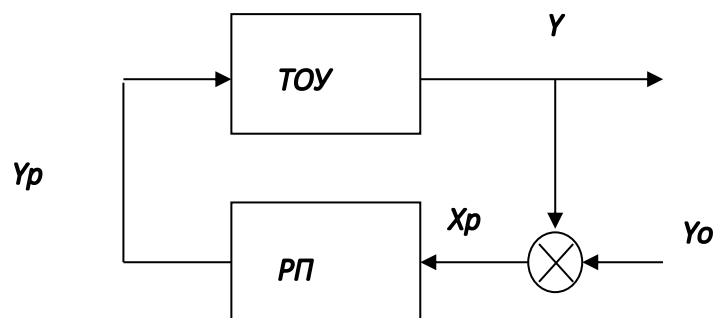


Рисунок 2.1 – Схема системи управління

В ідеальних умовах роботи САР (лінійність характеристики об'єкта, стаціонарність випадкових збурювань, мала інерційність регулятора в порівнянні з об'єктом) регулятор повинен мати лінійну передатну функцію

За характером роботи регулятори діляться на безперервні, імпульсні й релейні. Найбільш широке поширення одержали регулятори безперервної дії, що використовують лінійні закони регулювання виду

$$y_p = C_1 x_p + C_2 \int_0^t x_p dt + C_3 \frac{dx_p}{dt}, \quad (2.2)$$

де C_i – настроювання регулятора.

Розрізняють три типових закони регулювання:

П – пропорційний; І – інтегральний; Д – диференціальний.

Для управління реальними об'єктами в сучасних регулюючих пристроях реалізуються також наступні комбінації цих законів:

- ПІ – пропорційно–інтегральний;
- ПД – пропорційно–диференціальний;
- ПІД – пропорційно–інтегральний–диференціальний.

Настроюваннями безперервних регуляторів П–, І–, ПІ–, ПД– і ПІД–дії можна реалізувати кожний із трьох типових оптимальних процесів регулювання.

Відповідно до реалізованих законів регулювання регулятори безперервної дії діляться на такі типи.

Пропорційні або П–регулятори, у яких вихідна величина Y_p пов'язана із вхідною величиною X_p співвідношенням

$$Y_p = K_p \cdot X_p. \quad (2.3)$$

Кожному значенню регульованого параметра Y відповідає певне значення відхилення X_p . При відхиленні Y від заданого значення X_0 , на виході відразу

виникає зміна регулюючого впливу Y_p , що призводить до відновлення заданої величини Y . Така жорстка залежність між вхідною й вихідною величинами призводить до статичної помилки системи

$$X_{ст} = Y_{уст} - Y_0, \quad (2.4)$$

що обернено пропорційна коефіцієнту передачі K_p .

Потрібно відмітити, що П-регулятори прості й стійкі, працюють швидко.

Інтегральні або І-регулятори, у яких зміна вихідної величини пропорційна інтегралу зміни вхідної величини

$$Y_p = \frac{1}{T_i} \int_0^{\tau} X_p dt \quad (2.5)$$

На рисунку 2.2 наведені перехідна характеристика І-регулятора (а) і перехідний процес при реалізації І-закону регулювання (б). Постійна часу інтегрування T_i , від величини якої залежить кут α перехідної характеристики $Y_p(t)$.

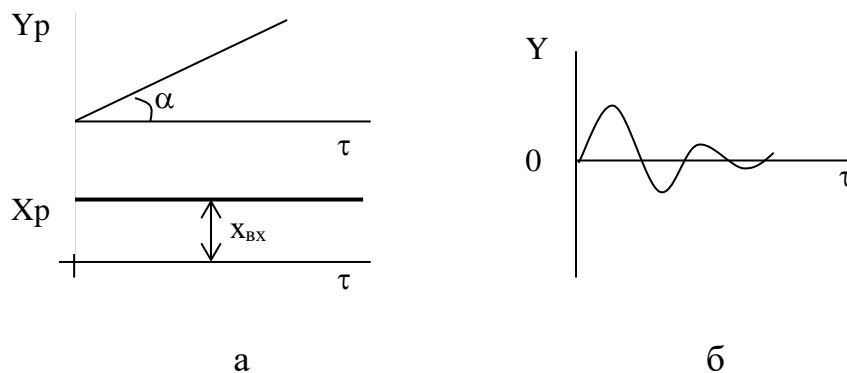


Рисунок 2.2 – Перехідна характеристика І-регулятора (а) і перехідний процес при реалізації І-закону регулювання (б)

При цьому законі регулювання швидкість переміщення регульовального органа пропорційна відхиленню регульованої величини Y від заданого значення

Уо. Відсутня жорстка залежність між X_p і Y , тому статична помилка дорівнює нулю.

Цей регулятор виграє по точності, але програє по швидкодії й стійкості роботи. Таким системам регулювання властива висока коливальність перехідного процесу. І-регулятори застосовують для управління малоінерційними об'єктами з невеликим часом запізнювання й істотним самовирівнюванням.

Пропорційно-інтегральні або ПІ-регулятори, у яких зміна вихідної величини пропорційна як зміні вхідної величини, так і інтегралу її зміни

$$y_p = k_p \left(x_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t x_p dt \right), \quad (2.6)$$

де T_i – час інтегрування, протягом якого регулюючий вплив, обумовлений роботою П-складової, буде подвоєний під дією І-складової регулятора.

Перехідна характеристика ПІ-регулятора показана на рисунку 2.3.

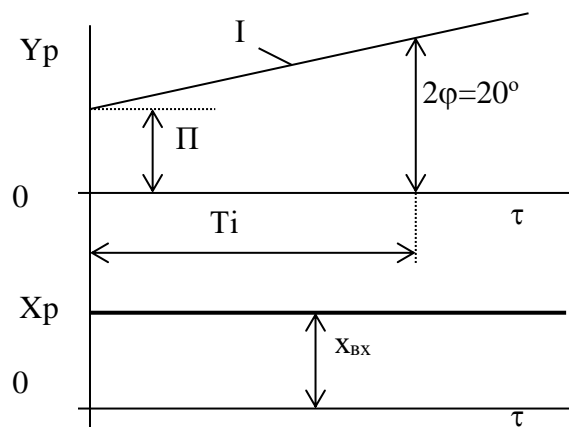


Рисунок 2.3 – Перехідна характеристика ПІ-регулятора

Передаточна функція ПІ-регулятора

$$W_i(p) = \frac{k_p(T_i p + 1)}{T_i p}. \quad (2.7)$$

По швидкодії цей регулятор ближче до пропорційного, ніж до інтегрального. При цьому І-частина усуває статичну помилку регулювання.

Пропорційно-диференціальні або ПД-регулятори, які впливають на регулювальний орган, пропорційно як відхиленню регульованої величини, так і швидкості її відхилення

$$y_p = k_p \left(x_p + T_d \frac{dx_p}{dt} \right), \quad (2.8)$$

де T_d – час попередження (диференціювання), с.

Передатна функція ПД-регулятора має вигляд

$$W_{пд}(p) = k_p (1 + T_d p). \quad (2.9)$$

Введення Д-частини доцільно при управлінні об'єктами, у яких сильно проявляється швидкість відхилення регульованої величини. Попереджувальний вплив підвищує швидкодію системи, але не виключає статичну помилку.

У пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів (ПІД) зміна вихідної величини y_p пропорційна відхиленню регульованої величини, інтегралу цього відхилення, а також швидкості його зміни

$$y_p = k_p \left(x_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t x_p dt + T_d \frac{dx_p}{dt} \right). \quad (2.10)$$

Передатна функція ПІД-регулятора

$$W_{\text{під}}(p) = K_p (1 + 1/ (T_i p) - T_d p) , \quad (2.11)$$

або, після перетворення у канонічний вид

$$W_{\text{нід}}(p) = k_p \frac{T_i T_d p^2 + T_i p + 1}{T_i p} . \quad (2.12)$$

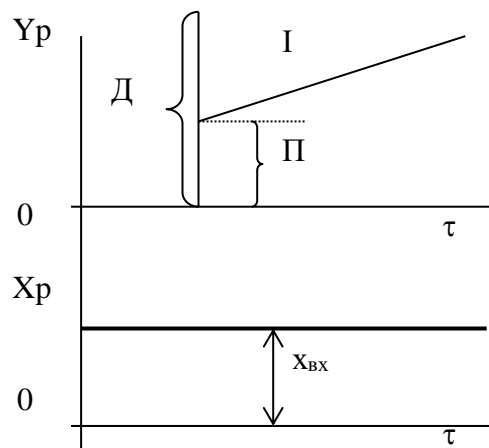


Рисунок 2.4. Перехідна характеристика ПІД–регулятора

По характеру функціонування в САР цей закон зі збільшенням T_d наближається до ПД, а при зменшенні T_i – до ПІ–закону.

ПІД–закон значно поліпшує якість регулювання, особливо при різких збурюваннях. Однак такі регулятори – дуже складні по технічній реалізації і налаштуванню й, отже, найдорожчі.

2.2 Розробка структурної схеми лабораторного макета

Структурна схема лабораторного макету для дослідження ПІД регулятора показана на рисунку 2.5.

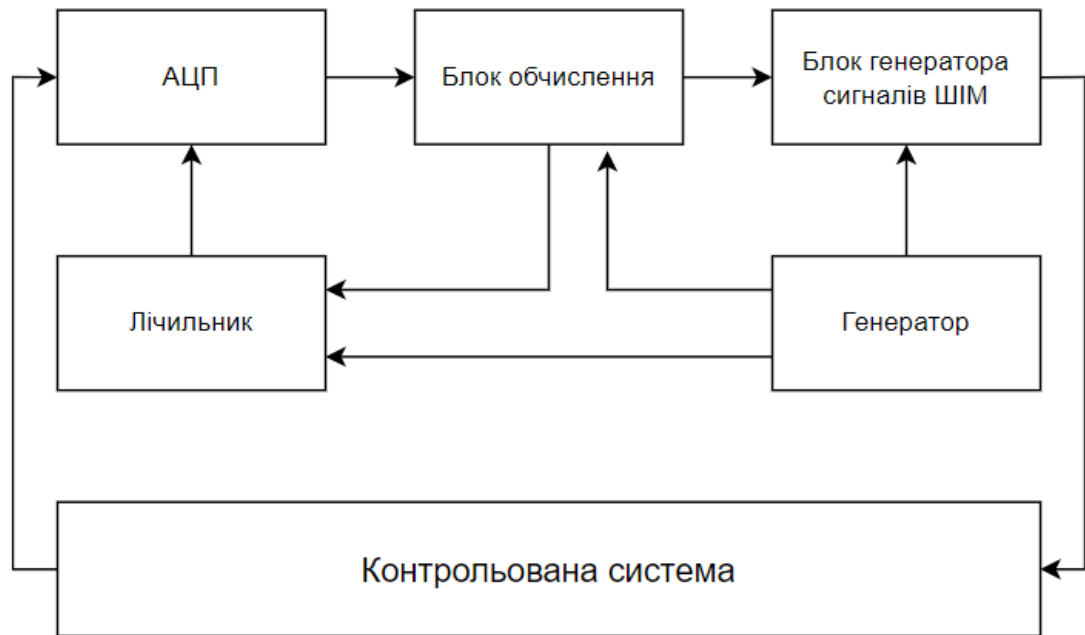


Рисунок 2.5 – Структурна схема лабораторного макету для дослідження ПІД регулятора

Контрольована система являє собою RC ланцюг, що отримую на вхідні сигнали ШІМ та на виході формує напругу, що пропорційна частоті ШІМ.

Блок обчислень працює за принципом ПІД регулятора. В залежності від параметрів налаштування ПІД регулятора блок обчислень виробляє сигнали управління для блока ШІМ генератора.

Замкнена система отримана шляхом поєднання виходу RC-ланцюга з блоком аналого-цифрового перетворювача. Даний блок перетворює вхідну напругу у цифровий сигнал, щоб передати його на блок виконання обчислень.

Лічильник потрібен для підрахунку імпульсів від генератора та управління АЦП.

В лабораторному макеті RC ланцюг повинен мати пристрій налаштування часу затримки. Таким чином можна дослідити різні режими роботи ПД регулятора.

Основна частина структурної схеми буде реалізована програмно внутрі контролера Arduino. Таким чином, такі блоки як: генератор ШІМ, лічильник, блок обчислень та АЦП будуть реалізовані програмно.

На рисунку 2.6 показана загальна блок-схема системи автоматичного керування, що повинна бути реалізована в макеті. Система складається з регулятора з передавальною функцією $G(s)$, об'єкта (об'єкта, керованої системи, системи) з передавальною функцією $H(s)$ і вузла підсумовування в у якому задане значення $X(s)$ порівнюється з вихідним сигналом $Y(s)$ [11].

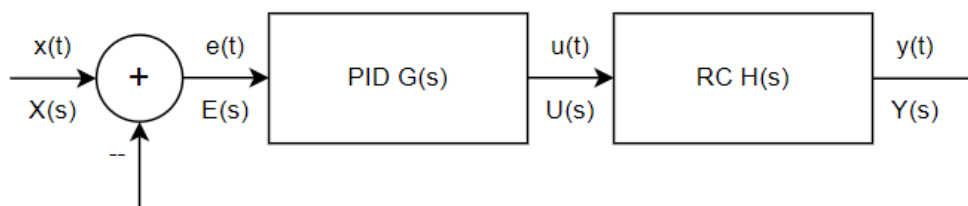


Рисунок 2.6 – Загальна блок-схема системи автоматичного керування, що реалізована в макеті

Для даної системи управління можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} Y(s) = E(s)G(s)H(s) \\ E(s) = X(s) - Y(s) \end{cases} \quad (2.13)$$

де $X(s)$ – бажане значення процесу або задане значення;

$E(s)$ – значення похибки як різниця між бажаним заданим значенням $X(s)$ і вимірним значенням процесу $Y(s)$, $E(s) = X(s) - Y(s)$;

$G(s)$ – передатна функція регулятора;

$H(s)$ – передатна функція керованої системи (об'єкта);

$Y(s)$ – вимірне значення процесу;

$U(s)$ – контрольна змінна.

З системи рівнянь (2.13) можна визначити передатну функцію замкнутої системи керування

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)H(s)}{1+G(s)H(s)}. \quad (2.14)$$

Розглянемо більш детально блок ПІД регулятора та визначимо його передавальну функцію. Структурна схема блока аналогового ПІД регулятора показана на рисунку 2.7.

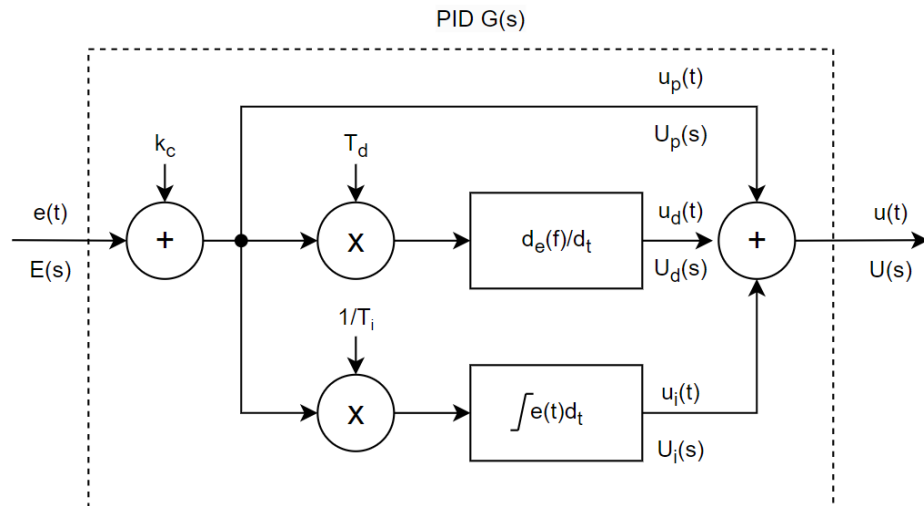


Рисунок 2.7 – Структурна схема блока аналогового ПІД регулятора

Передатна функція аналогового ПІД-регулятора, що реалізовано в макеті, визначається рівнянням

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (2.15)$$

де k_c – підсилення регулятора, параметр налаштування;

T_d – час похідної, параметр налаштування;

T_i – інтегральний час, параметр налаштування.

Для ПІД-регулятора керуюче значення $U(s)$ складається з трьох членів:

– $U_p(s)$ – пропорційний член;

– $U_i(s)$ – інтегральний член;

– $U_d(s)$ – диференціальний член.

Таким чином, значення керуючої змінної ПІД-регулятора можна визначити за допомогою рівняння

$$U(s) = E(s)k_c + \frac{k_c}{T_i} \frac{1}{s} E(s) + k_c T_d E(s)s. \quad (2.16)$$

Інтегральний член (2.16) переводиться в цифрову форму за допомогою білінійного перетворення. Z-перетворення є цифровим аналогом безперервного перетворення Лапласа і використовується для аналізу дискретних систем. Після застосування білінійного перетворення, зв'язок між змінною s (в домені Лапласа) і z (в домені z-перетворення) задається так:

$$s = \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1}, \quad (2.17)$$

де T_s – період вибірки;

z – змінна в області z-перетворення (для цифрових систем);

s – змінна в області Лапласа (для безперервних систем).

Цей перехід дозволяє перетворити безперервні передаточні функції та рівняння регулятора на цифрові, щоб їх можна було використовувати в дискретних системах управління, таких як програмовані контролери або цифрові фільтри.

В результаті перетворення формула 2.16 буде мати наступний вигляд [11, 12]

$$U(z) = E(z)k_c + k_c \frac{T_s}{2T_i} (E(z) + E(z)z^{-1}) + U_i(z)z^{-1} + k_c \frac{T_d}{T_i} (E(z) - E(z)z^{-1}). \quad (2.18)$$

Тепер значення змінної цифрового керування можна розрахувати за допомогою різницевого рівняння

$$u(n) = k_c e(n) + k_c \frac{T_s}{2T_i} (e(n) + e(n+1)) + u_i(n-1) + k_c \frac{T_d}{T_s} (e(n) - e(n+1)). \quad (2.19)$$

Відповідна структурна схема ПІД регулятора, реалізованого у вигляді цифрового контролера, як зображено на рисунку 2.8.

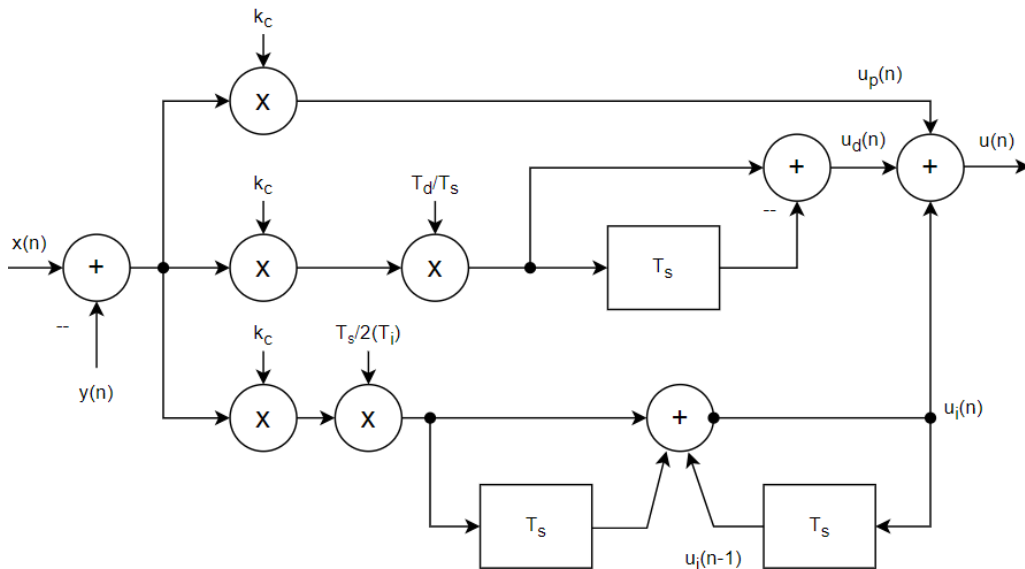


Рисунок 2.8 – Структурна схема ПІД регулятора, реалізованого у вигляді цифрового контролера

Передбачається, що для спрощення реалізації алгоритм ПІД-регулятора на базі контролера Arduino буде реалізовано з використанням арифметики з

плаваючою комою. Також було прийнято діапазон мінливості змінних $-1,0.. 1,0$. Крім того, в алгоритм додано насичення змінних $u_i(n), (i)$ та $u(n)$.

Цифрова керуюча змінна $u(n)$ перетворюється в аналогову форму цифро-аналоговим перетворювачем. В даному випадку, ШІМ-модулятор також використовується як цифро-аналоговий перетворювач.

Перед цифро-аналоговим перетворенням керуюча змінна $u(n)$ має бути масштабована до діапазону ЦАП і приведена до цілого типу

$$u_N(n) = (\text{int})((1 + u(n))0,5N_L), \quad (2.20)$$

де N_L – кількість станів цифрового ШІМ-модулятора або цифро-аналогового перетворювача.

Діапазон змінної $u_N(n)$ становить $0... N_L - 1$. Блок-схема цифрового ПІД-регулятора з насиченням і ШІМ-модулятором на виході показана на рисунку 2.9. Цей варіант регулятора прийнято для реалізації даного лабораторного макету за допомогою мікроконтролера.

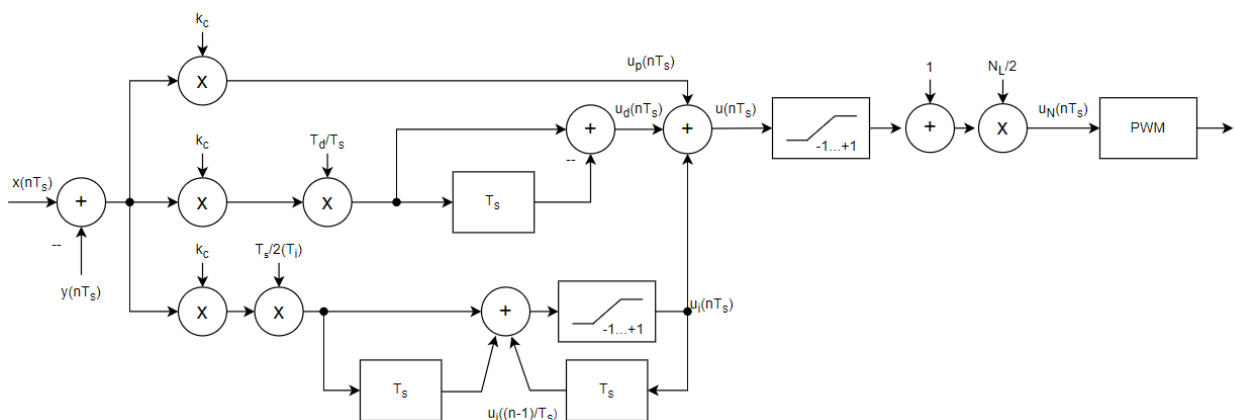


Рисунок 2.9 – Структурна схема регулятора прийнято для реалізації лабораторного макету за допомогою мікроконтролера

Передбачалося, що частота дискретизації сигналів f_s постійна і що алгоритм цифрового ПІД-регулятора розраховується з тією ж частотою.

2.3 Висновки по другому розділу

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи виконана розробка структурної схеми лабораторного макету для дослідження ПД регулятора. Проведено опис законів регулювання та автоматичних регуляторів. Наведена схема системи управління з регулюючим пристроєм та загальна блок-схема системи автоматичного керування, що реалізована в макеті. Передбачається, що для спрощення реалізації алгоритм ПД-регулятора на базі контролера Arduino буде реалізовано з використанням арифметики з плаваючою комою.

В результаті наведена структурна схема ПД регулятора, реалізованого у вигляді цифрового контролера. Основна частина структурної схеми буде реалізована програмно всередині контролера Arduino. Таким чином, такі блоки як: генератор ШІМ, лічильник, блок обчислень та АЦП будуть реалізовані програмно.

3 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ТА ПОБУДОВА ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ

3.1 Опис схеми електричної принципової

Схема електрична принципова лабораторного макету показана на рисунку 3.1.

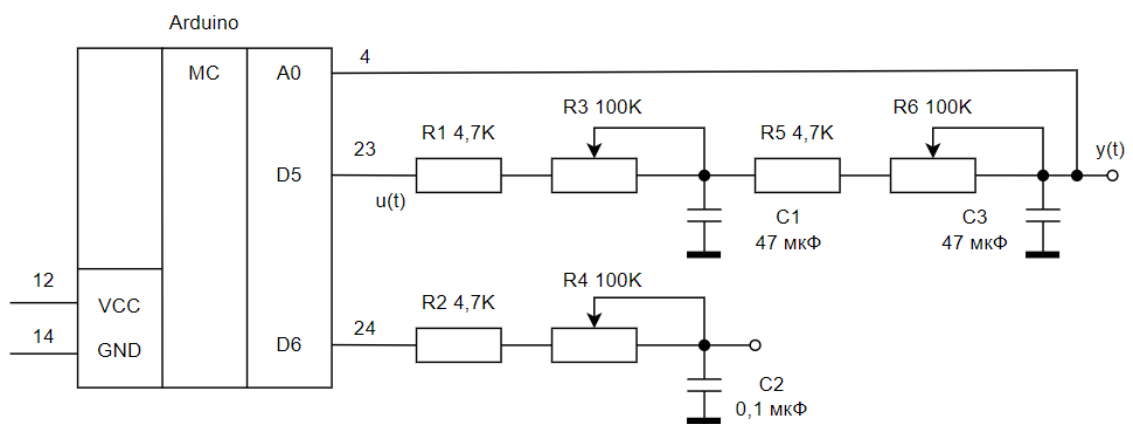


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова лабораторного макету

В основі схеми лежить контролер Arduino Nano [13]. Даний пристрій обрано тому, що це популярна платформа для розробки електроніки, яка поєднує в собі простоту використання апаратного забезпечення та програмування. Контролер Arduino Nano складається з мікроконтролера ATmega328 компанії Atmel, і плати з компонентами, які полегшують підключення до зовнішніх пристроїв. Зовнішній вигляд обраної плати показано на рисунку 3.2.

Arduino Nano підтримує просту у використанні середу програмування, відому як Arduino IDE, яка дозволяє писати код мовою, подібною до C/C++. Програма завантажуються на плату через USB і зберігаються в мікроконтролері для автономного виконання.

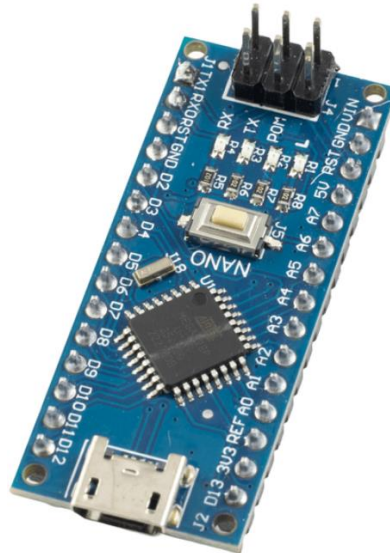


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд обраної плати Arduino Nano

Arduino має відкриту архітектуру, що дозволяє користувачам змінювати і адаптувати плату під свої потреби.

В якості об'єкту керування обрано інтегруючу RC ланку, що виконана на основі резисторів та конденсатора (рисунок 3.3) [14].

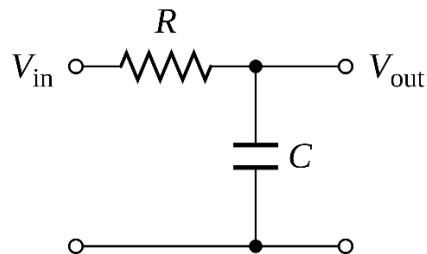


Рисунок 3.3 – Схема RC-ланки

Якщо вхідний сигнал подається на резистор, а вихідний знімається з конденсатора, то така ланка називається ланкою інтегруючого типу. Назва вказує, що напруга на виході (конденсаторі) є інтегральною функцією струму заряджання конденсатора.

Реакція кола інтегруючого типу на одиничний вхідний перепад з амплітудою V визначається наступною формулою:

$$V_c(t) = V(1 - e^{-t/RC}). \quad (3.1)$$

Таким чином, постійна часу цього аперіодичного процесу буде дорівнювати:

$$\tau = RC. \quad (3.2)$$

На рисунку 3.4 показано форма сигналу на виході RC-ланки.

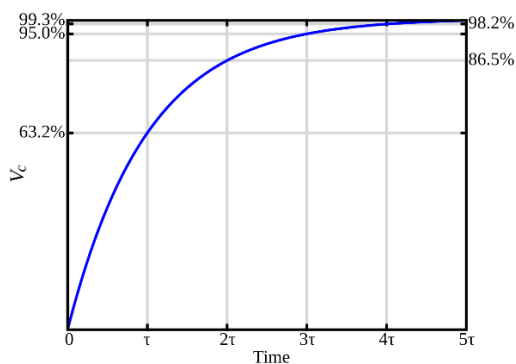


Рисунок 3.4 – Форма сигналу на виході RC-ланки

Для моделювання динамічних об'єктів використовується послідовне включення двох інтегрованих RC ланок. На рисунку 3.5 показано двоступеневий RC-ланцюг, який утворює керовану систему другого порядку.

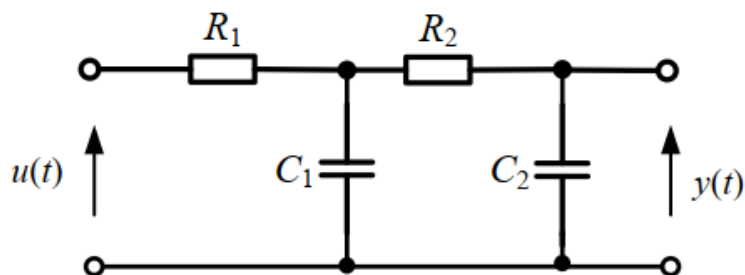


Рисунок 3.5 – Послідовне включення двох інтегрованих RC ланок

Ця схема обмежена, оскільки її добротність Q завжди менше 0,5, з $R_1 = R_2$ і $C_1 = C_2$, $Q = 1/3$. У цій схемі Q наближається до максимального значення 1/2, коли опір другого каскаду RC набагато більший, ніж перший.

Передавальна функція RC ланки може бути записана у вигляді:

$$H(s) = \frac{1}{1+s(R_1C_1+R_2C_2+R_1C_2)+s^2(R_1C_1R_2C_2)}. \quad (3.3)$$

3.2 Реалізація цифрового ПД-регулятора

Для реалізації цифрового ПД-регулятора використано внутрішній 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач Arduino для перетворення сигналу $u(t)$, а ШІМ-модулятор використовувався як 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач для перетворення сигналу керуючої змінної $u(f)$ [15].

У програмі C/C++ має бути присутня «основна» функція [16]. Цю основну функцію буде викликано, а з неї можна буде викликати інші функції та виконувати функції програми. В Arduino немає головної функції. Це замінено двома функціями `setup()` і `loop()`. Ці дві функції повинні бути присутніми в кожному скетчі Arduino. Інші функції повинні бути створені поза дужками цих двох функцій.

Функція `setup()` запускатиметься лише один раз, після кожного ввімкнення чи скидання плати Arduino. Вона використовується для ініціалізації змінних, режимів закріплення, початку використання бібліотек тощо, тоді як функція `loop()` виконує цикли послідовно.

У функції `loop()` записується основна програма, маючи на увазі, що ініціалізація вже виконана. При використанні цієї функції завжди слід пам'ятати, що за останнім рядком йде перший рядок. У цьому рішенні частота виклику функції `loop()` залежить від її довжини, і також важливо, що ця частота не є постійною.

В залежності від (2.18) для розрахунку керуючої змінної існує період вибірки T_s .

Оператори, що реалізують цифровий ПД-регулятор, викликаються у функції `loop()`, де необхідно забезпечити постійний період вибірки. Як правило, значення періоду визначається на основі показань системного часу. Для забезпечення стабільного часу T_s припускається, що період дискретизації дорівнює періоду модулятора ШІМ для виводу 5, і цей період дорівнює 1,024 мс.

Аналого-цифровий перетворювач безпосередньо запускається в циклі `loop` мікроконтролера, і після завершення перетворення обчислюється весь алгоритм регулятора і нове значення $u(n)$ надсилається на ШІМ-модулятор. Часова діаграма потоку даних у цифровому ПД-регуляторі зображена на рисунку 3.5. Перевага цього рішення полягає в тому, що алгоритм цифрового ПД-регулятора обчислюється кожен постійний період часу.

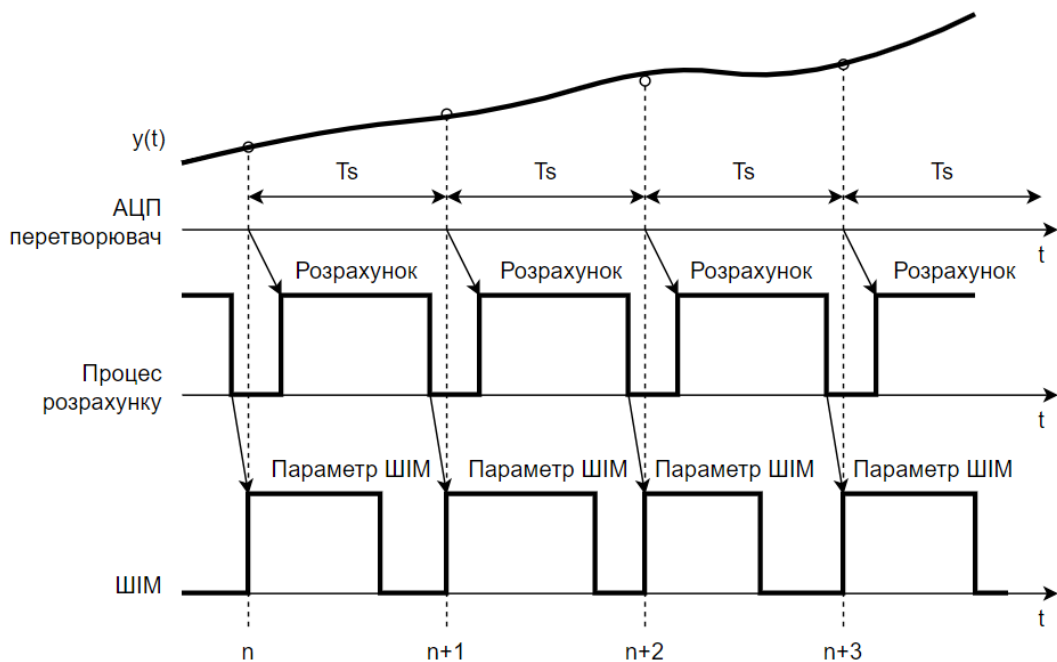


Рисунок 3.5 – Часова діаграма потоку даних у цифровому ПД-регуляторі

Функціональна схема контролера на основі Arduino Nano зображена на рисунку 3.6.

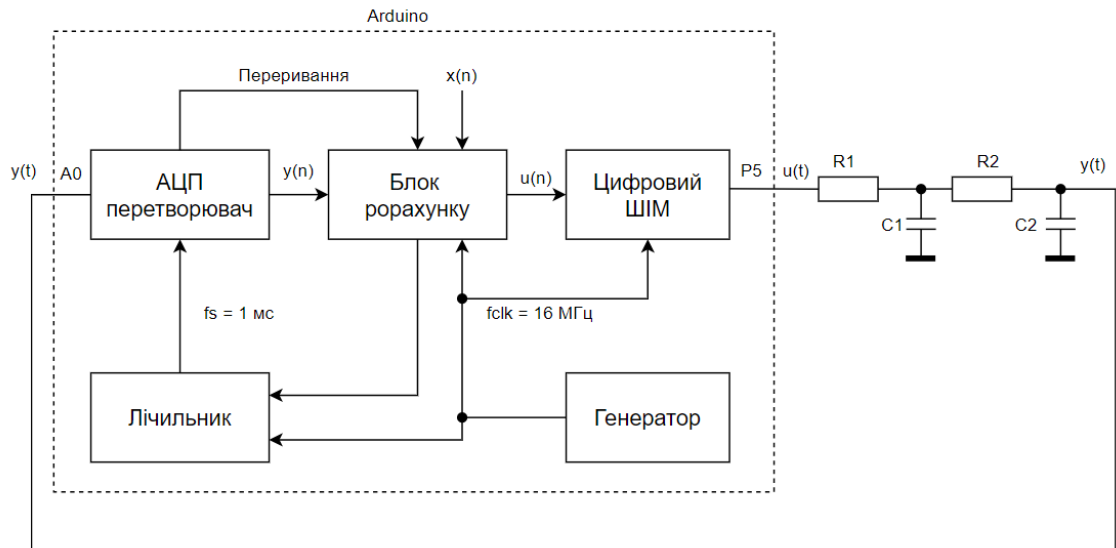


Рисунок 3.6 – Функціональна схема контролера на основі Arduino Nano

Програма для Arduino виконує керування RC-ланкою за допомогою ПІД-регулятора та виводить значення на послідовний порт для моніторингу.

На рисунку 3.7 показано вміст функції Setup.

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(U_PWMP, OUTPUT);
  pinMode(Out_PWMP, OUTPUT);
  pinMode(adcPin, INPUT);
}
```

Рисунок 3.7 – вміст функції Setup

У функції `setup()`, яка виконується один раз при запуску плати, налаштовуються початкові параметри. За допомогою команди `Serial.begin(115200)` ініціалізується серійний порт зі швидкістю 115200 біт/сек для обміну даними з комп'ютером.

Команда `pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT)` налаштовує вбудований світлодіод як вихід, щоб керувати його станом. Команди `pinMode(U_PWMP, OUTPUT)` і `pinMode(Out_PWMP, OUTPUT)` налаштовують два вихідні контакти для виведення сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а команда `pinMode(adcPin, INPUT)` налаштовує аналоговий вхід, до якого підключено датчик або інший аналоговий сигнал.

На рисунку 3.8 показано фрагмент функції `Loop()`.

```
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  a_vol = analogRead(adcPin);
  y=float(ADC/1024.0); // range of ADC 0...1023,
  if (counter++>Nk) {
    Serial.print("max:");
    Serial.print("1");
    Serial.print(",");
    Serial.print("min:");
    Serial.print("0");
    Serial.print(",");
    Serial.print("y:");
    Serial.println(y);
    counter=0;
  }
}
```

Рисунок 3.8 – Фрагмент функції `Loop()`.

У функції `loop()`, яка виконується циклічно, реалізується основна логіка керування та обчислень. Спочатку команда `digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH)` вмикає світлодіод.

Потім значення з аналогового входу зчитується за допомогою `a_vol = analogRead(adcPin)`, а команда `y = float(ADC/1024.0)` нормалізує значення ADC до діапазону від 0 до 1.

Якщо лічильник counter перевищує значення Nk, програма виводить мінімум, максимум та поточне значення змінної у в послідовний монітор для відображення, після чого лічильник скидається до нуля.

Далі програма обчислює керування за допомогою ПД-регулятора, реалізацію якого показана на рисунку 3.9.

```
// ---PID controller-----
e=(x-y);
ui=Kc/Ti*Ts/2*(e+e_1)+ui_1; // integral term
if(ui>1) ui=1; else if(ui<-1) ui=-1;
ud=Kc*Td/Ts*(e-e_1); // derivative term
u=e*Kc+ui+ud;
u=u+x; // works faster
ui_1=ui;
e_1=e;
// --- end of PID controller

if(u>1) u=1;
else if(u<0) u=0;
upwm=(int)(u*255+0.5);
out=(int)((e+1)*127+0.5 );
analogWrite(U_PWMP, upwm);
analogWrite(Out_PWMP, out);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
```

Рисунок 3.9 – Реалізація ПД-регулятора

В наведеному фрагменті спочатку розраховується помилка $e = (x - y)$, тобто різниця між бажаним значенням x та вимірним значенням y .

Інтегральний член обчислюється за формулою $u_i = K_c/T_i*Ts/2*(e+e_1) + u_{i-1}$, де також передбачене обмеження, щоб інтегральний член не виходив за межі діапазону $[-1, 1]$.

Диференціальний член обчислюється як $u_d = K_c*T_d/T_s*(e-e_1)$.

Повний керуючий сигнал визначається як сума пропорційного, інтегрального та диференціального членів за формулою $u = e*K_c + u_i + u_d$, після

чого до нього додається значення x для покращення швидкодії. Значення інтегрального члена та помилки оновлюються для наступного циклу.

Після обчислень керуючого сигналу він обмежується до діапазону від 0 до 1. Значення $upwm = (int)(u*255 + 0.5)$ масштабоване до діапазону від 0 до 255 для виведення на ШІМ-вихід, а значення $out = (int)((e + 1)*127 + 0.5)$ використовується для іншого ШІМ-виводу.

Команди `analogWrite(U_PWMP, upwm)` і `analogWrite(Out_PWMP, out)` здійснюють виведення ШІМ-сигналів на відповідні контакти. Після цього команда `digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW)` вимикає світлодіод.

На завершення функції вводиться затримка у 1 мілісекунду за допомогою `delay(1)` перед наступною ітерацією циклу.

Дана програма реалізує ПІД-регулятор, де пропорційний термін відповідає за миттєве реагування на помилку, інтегральний термін накопичує помилку з часом і усуває постійну похибку, а диференціальний термін враховує швидкість зміни помилки, щоб зменшити перерегулювання.

3.3 Висновки по третьому розділу

В результаті виконання третього розділу кваліфікаційної роботи виконано проектування та опис схеми електричної принципової лабораторного макету. Описані особливості застосування інтегруючих RC-ланок в якості об'єкту керування. В процесі моделювання структури автоматичної системи управління буде розглядатися реакція кола інтегруючого типу на одиничний вхідний перепад з заданою амплітудою та залежність часу досягнення стійкості системи від параметрів ПІД регулятора.

Для реалізації цифрового ПІД-регулятора використано внутрішній 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач Arduino для перетворення сигналу $u(t)$, а ШІМ-модулятор використовувався як 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач для перетворення сигналу керуючої змінної.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Опис методики проведення експерименту

На рисунку 4.1 показано зовнішній вигляд зібраного макету.

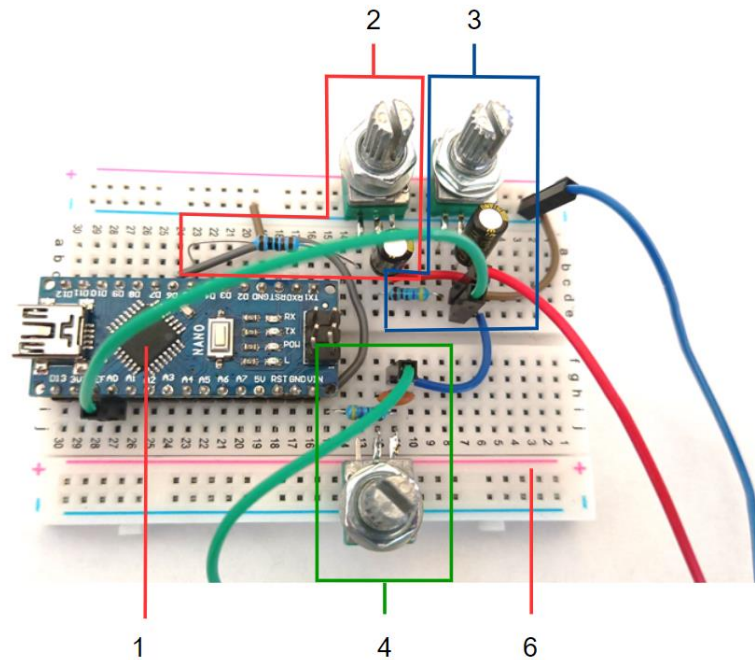


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд зібраного макету

Макет зібрано на основі Arduino Nano (1), в який завантажено програмний цифровий ПІД-регулятор. Всі деталі макету поєднані за допомогою макетної плати.

Перша RC-ланка (2) реалізована на постійному резисторі опором 1кОм та змінному резистору опором 100кОм, а також з використанням конденсатору ємністю 47мкФ. Змінний резистор дозволяє міняти параметри RC-ланки, тим самим змінюючи перехідну характеристику виконавчого елементу схеми.

Друга RC-ланка (3) має схожу реалізацію, але постійний резистор має номінал 4,7кОм. Змінний резистор та конденсатор мають такі ж самі номінали, що і в RC-ланці (1).

Перші дві RC-ланки підключені до п'ятого виводу мікроконтролера, на якому реалізовано вивід ШІМ сигналу. За структурною схемою це вихід $u(t)$. Вихід з RC-ланок, згідно функціональній схемі 3.6, це вихід $y(t)$, він підключається до аналогового входу контролеру під номером А0.

В макеті також реалізовано контрольний вихід D6 на який виводиться сигнал помилки $e(t)$ – це RC ланка (4). Виходячи з особливостей даного виходу номінал конденсатора зменшено до 100нФ.

Після включення живлення та підключення осцилографа до виходу $y(t)$ (синя лінія) та виходу D5 мікроконтролера (жовта лінія), можна побачити роботу RC-ланки в залежності від ширини вхідного ШІМ сигналу (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Приклад роботи RC-ланки

Для виконання моделювання встановимо наступні параметри подвійної RC-ланки:

- $R1 = 11,6\text{кОм}$;
- $C1 = 47\text{мкФ}$;
- $R2 = 9,4\text{кОм}$;
- $C2 = 47\text{мкФ}$.

Таким чином, перехідна характеристика подвійної RC-ланки відповідно до формули 3,3 буде записана у вигляді:

$$H(s) = \frac{1}{1+s(11600 \cdot 0,000047 + 9400 \cdot 0,000047 + 11600 \cdot 0,000047)+s^2(11600 \cdot 0,000047 \cdot 9400 \cdot 0,000047)}$$

або після виконання арифметичних операцій остаточно отримуємо

$$H(s) = \frac{1}{1+1,53 \cdot s+0,24 \cdot s^2} \quad (4.1)$$

Виконаємо моделювання ПІД-регулятора за допомогою Simulink. Для цього побудуємо наступну структурну схему замкненої системи, як показано на рисунку 4.3.

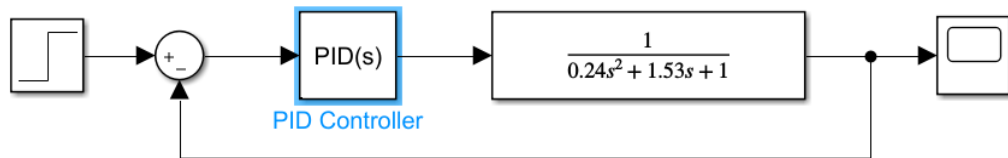


Рисунок 4.3 – Структурна схема модельованої системи

Після першого запуску симуляції роботи ПІД-контролера на виході осцилографа отримуємо наступний вигляд графіку $y(t)$ (рис. 4.4). За наведеного рисунку можна бачити, що система має властивості перерегулювання.

При моделюванні використовувались наступні параметри:

- $K_p = 2$;
- $T_i = 3$;
- $T_d = 0$.

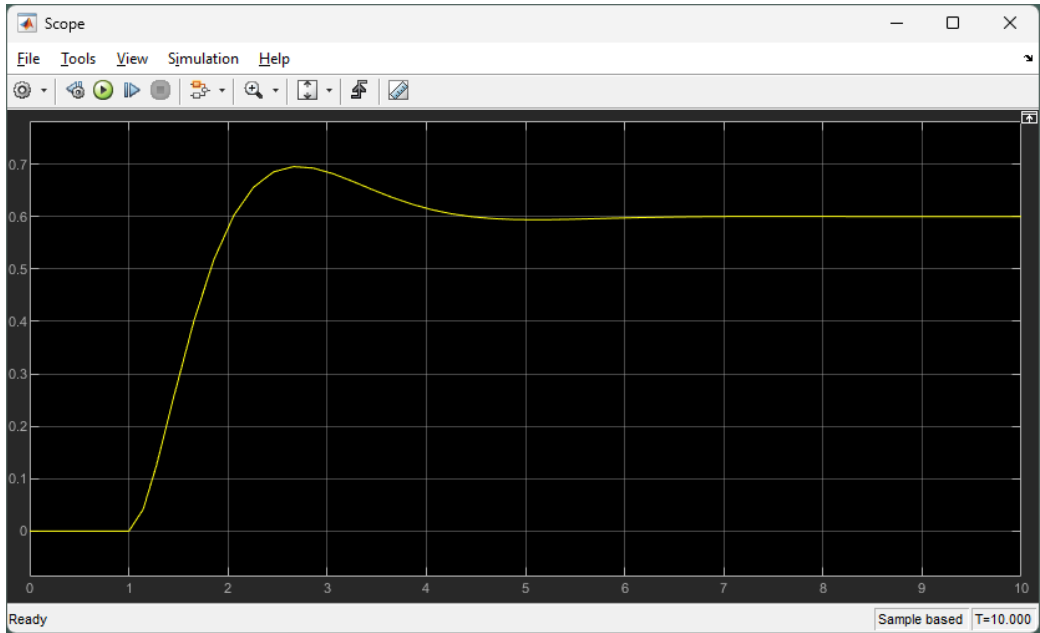


Рисунок 4.4 – Графік функції $u(t)$

Для налаштування оптимальних параметрів ПІД-контролера запустимо вбудований інструмент «PID Tuner» (рис. 4.5).

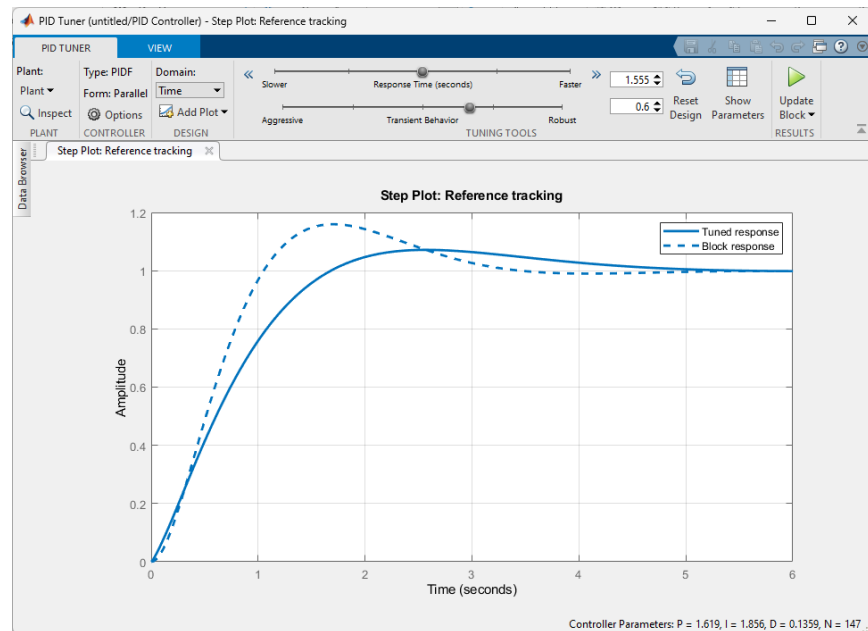


Рисунок 4.5 – Налаштування ПІД-контролера

На рисунку 4.5 пунктирною лінією показано сигнал, що моделюється при заданих параметрах, а пунктирною – налаштований ПІД-регулятор.

На рисунку 4.6 показані параметри налаштованого ПІД-регулятора.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	1.6193	2
I	1.8558	3
D	0.13586	0
N	146.9766	100
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	1.18 seconds	0.725 seconds
Settling time	4.24 seconds	3.08 seconds
Overshoot	7.15 %	16 %
Peak	1.07	1.16
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	69 deg @ 1.29 rad/s	55.2 deg @ 1.72 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 4.6 – Параметри налаштованого ПІД-регулятора

Наступним кроком виконаємо порівняння результатів роботи лабораторного макету з програмною моделлю.

При моделюванні використовуємо наступні програмні налаштування (рисунок 4.7).

```
#define fsk 10
const byte U_PWMP = 5; // Pin 5, PWM output u(t)
const byte Out_PWMP = 6; // Pin 6, PWM output,
const byte adcPin = 0; // A0 - analog input y(t)
const float fs = 1000.00; // sampling frequency
const float Ts = 1/fs; // sampling period
const float Kc = 2.0; // controller gain
const float Ti = 3.0; //2.5; // integral time
volatile float x = 0.6; //setpoint value, range 0...1
const float Td = 1.0; // derivative time
volatile float y; // measured process value, range 0...1
volatile float u; // control variable, range 0...1
volatile int upwm=0;
volatile int out=0;
volatile float e=0; // error value, range -1...1
volatile float e_1=0; // error from the previous cycle, range 0...1
volatile float ui=0; // integral value, range -1...1
volatile float ud=0; // derivative value, range
volatile float ui_1=0; // value of the integral from the previous cycle, range -1...1
```

Рисунок 4.7 – Програмні налаштування ПІД-регулятора на базі Arduino

В результаті запуску програми отримуємо наступний графік функції $y(t)$ (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Графік функції $y(t)$

З наведеного рисунку можна бачити прогнозовані ознаки перерегулювання, але менше виражені, ніж в модельованій програмній системі. Швидкість регулювання становить більше 15 секунд.

Далі виконаємо першу спробу налаштування реального ПД-регулятора. На рисунку 4.9 показані значення коефіцієнтів регулятора.

```
const float Kc = 10.0; // controller gain
const float Ti = 3.0;//2.5; // integral time
volatile float x = 0.6; //setpoint value, range 0...1
const float Td = 1.0; // derivative time
```

Рисунок 4.9 – Значення коефіцієнтів ПД-регулятора

З наведеними параметрами отримуємо наступний графік $y(t)$ (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Графік $y(t)$ ПІД-регулятора для першої спроби налаштування

З наведеного графіка можна бачити ще більші ознаки перерегулювання але зменшення часу до виходу на задане значення до 12 секунд.

На наступній спробі налаштування ПІД-регулятора визначені такі параметри:

- $K_c = 10,0$;
- $T_i = 3,0$;
- $x = 0,6$;
- $T_d = 1,0$.

На рисунку 4.11 показані значення коефіцієнтів регулятора в програмі.

```

const float Kc = 10.0; // controller gain
const float Ti = 30.0; // 2.5; // integral time
volatile float x = 0.6; // setpoint value, range 0...1
const float Td = 1.0; // derivative time

```

Рисунок 4.11 – Значення коефіцієнтів ПД-регулятора для другої спроби налаштування

В даному випадку отримуємо наступний графік функції $y(t)$ (рисунок 4.12).

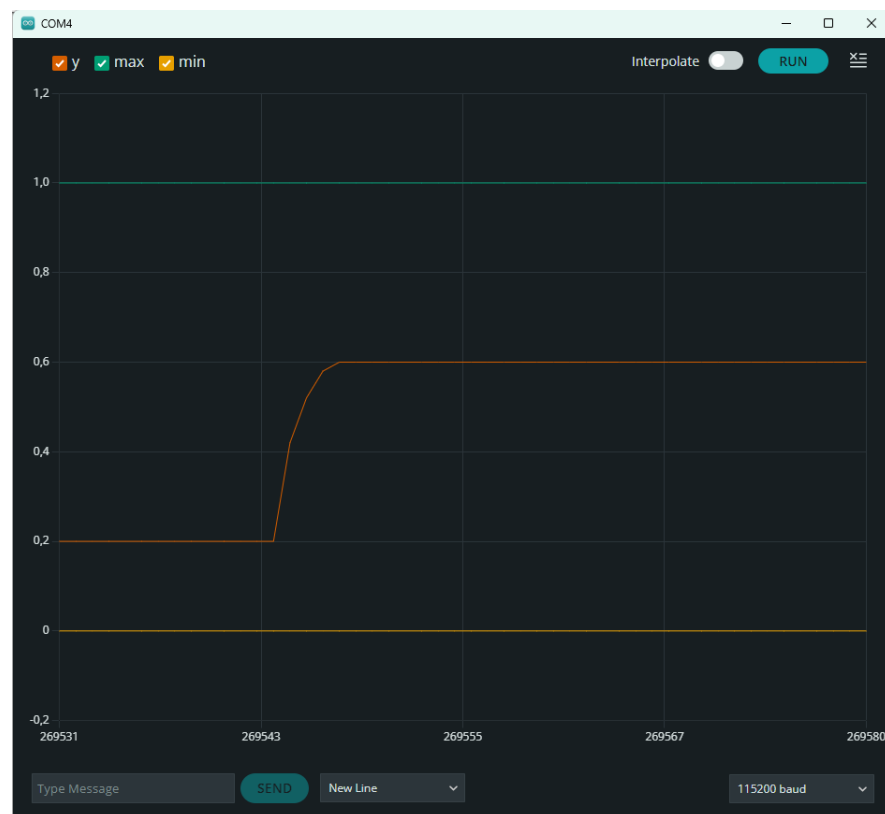


Рисунок 4.12 – Графік $y(t)$ ПД-регулятора для другої спроби налаштування

Наведений графік показує швидке регулювання – всього 1,5 секунди. Також ми бачимо рівномірне зростання функції без ознак перерегулювання.

Таким чином, можна вважати, що для заданих параметрів RC-ланки налаштування ПД-регулятора виконано.

4.2 Висновки по четвертому розділу кваліфікаційної роботи

В результаті виконання четвертого розділу кваліфікаційної роботи описано результати проведених експериментальних досліджень. Описано зібраний макет на основі Arduino Nano, в який завантажено програмний цифровий ПД-регулятор. Наведено приклади осцилограм роботи RC-ланки в якості об'єкту керування. Виконано моделювання ПД-регулятора за допомогою Simulink. Проведені експерименти для різних параметрів ПД-регулятора.

Результати моделювання показали що розроблений макет досить точно відтворює поведінку математичної моделі ПД-регулятора із заданими параметрами. Таким чином, даний лабораторний макет може використовуватись в лабораторному практикумі для підготовки здобувачів освіти за дисциплінами «Теорія автоматичного управління» та «Програмно технічні комплекси АСУ ТП».

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено лабораторний макет для дослідження характеристик ПІД регулятора на основі контролера Arduino.

Проведено аналіз переваг застосування лабораторних макетів в навчальному процесі. З'ясовано, що лабораторні макети надають можливість перевірити на практиці знання, отримані під час лекцій та семінарів.

Описані функції та призначення PID-регуляторів і наведено приклади пристроїв, де вони можуть застосовуватись.

Розглянуті схеми аналогічних лабораторних макетів для вивчення промислової автоматики. Такими макетами є аеродинамічна труба від компанії Control Engineering Innovative Energy Systems, лабораторний макет VTOL від QNET Trainer, віртуальний прилад LabVIEW для регулювання струму у лабораторному макеті QNET-VTOL. Визначені основні функції, що притаманні лабораторним макетам для вивчення основ теорії автоматичного управління та застосування її в системах автоматизації на виробництві.

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи виконана розробка структурної схеми лабораторного макету для дослідження ПІД регулятора. Проведено опис законів регулювання та автоматичних регуляторів. Наведена схема системи управління з регулюючим пристроєм та загальна блок-схема системи автоматичного керування, що реалізована в макеті. Передбачається, що для спрощення реалізації алгоритм ПІД-регулятора на базі контролера Arduino буде реалізовано з використанням арифметики з плаваючою комою.

В результаті наведена структурна схема ПІД регулятора, реалізованого у вигляді цифрового контролера. Основна частина структурної схеми буде реалізована програмно всередині контролера Arduino. Таким чином, такі блоки як: генератор ШІМ, лічильник, блок обчислень та АЦП будуть реалізовані програмно.

В результаті виконання третього розділу кваліфікаційної роботи виконано проектування та опис схеми електричної принципової лабораторного макету. Описані особливості застосування інтегруючих RC-ланок в якості об'єкту керування. В процесі моделювання структури автоматичної системи управління буде розглядатися реакція кола інтегруючого типу на одиничний вхідний перепад з заданою амплітудою та залежність часу досягнення стійкості системи від параметрів ПД регулятора.

Для реалізації цифрового ПД-регулятора використано внутрішній 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач Arduino для перетворення сигналу $u(t)$, а ШІМ-модулятор використовувався як 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач для перетворення сигналу керуючої змінної.

В результаті виконання четвертого розділу кваліфікаційної роботи описано результати проведених експериментальних досліджень. Описано зібраний макет на основі Arduino Nano, в який завантажено програмний цифровий ПД-регулятор. Наведено приклади осцилограм роботи RC-ланки в якості об'єкту керування. Виконано моделювання ПД-регулятора за допомогою Simulink. Проведені експерименти для різних параметрів ПД-регулятора.

Результати моделювання показали що розроблений макет досить точно відтворює поведінку математичної моделі ПД-регулятора із заданими параметрами. Таким чином, даний лабораторний макет може використовуватись в лабораторному практикумі для підготовки здобувачів освіти за дисциплінами «Теорія автоматичного управління» та «Програмно технічні комплекси АСУ ТП».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 55 с..

3. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320 с.

4. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf.

5. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, Г. В. Пономарьова, А. О. Функендорф; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Кривий Ріг : КК НАУ, 2018. – 332 с.

6. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації: підручник для студентів закладів вищої освіти .

Ч.1 / І. Ш. Невлюдов; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : Панов А. М., 2021. – 604 с. – ISBN 978-617-7947-67-6.

7. Rojas J. D. Industrial PID Controller Tuning [Електронний ресурс] / José David Rojas, Orlando Arrieta, Ramon Vilanova. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72311-8> (дата звернення: 16.01.2025). – Назва з екрана.

8. Control of DC Motor Using Proportional Integral Derivative (PID): Arduino Hardware Implementation [Electronic resource] / Alfian Ma'arif [et al.] // 2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE), Lombok, 20–21 October 2020. – [S. l.], 2020. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/iciee49813.2020.9277258> (date of access: 20.01.2025). – Title from screen.

9. Tec-control – Didactic resources for control engineering [Electronic resource] // tec-control – Didactic resources for control engineering. – Mode of access: <https://tec-control.reutlingen-university.de> (дата звернення s: 20.01.2025). – Title from screen.

10. Home - Quanser. – Режим доступу: <https://www.quanser.com/wp-content/uploads/2017/03/QNET-Practical-Control-Guide.pdf> (дата звернення: 12.01.2025). – Назва з екрана.

11. Sozański, K. Low Cost PID Controller for Student Digital Control Laboratory Based on Arduino or STM32 Modules. Electronics 2023, 12, 3235. <https://doi.org/10.3390/electronics12153235>

12. Astrom, K.J.; Wittenmark, B. Computer-Controlled System, Theory and Design, 3rd ed.; Prentice Hall, Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 2013.

13. Arduino Nano V3.0 AVR ATmega328P [Електронний ресурс] // Arduino в Україні. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod166-arduino-nano-v3-0-avr-atmega328p-s-raspayannimi-razemami?srsltid=AfmBOoqTK1WORKvFU5smZUQacj4FN6tWLu7D1RwNDbDi3uylgNduBucn> (дата звернення: 20.01.2025). – Назва з екрана.

14. Вікімедіа. RC-коло – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/RC-коло> (дата звернення: 21.12.2024).

15. Bhandari P. Digital implementation of the PID controller [Електронний ресурс] / Pujan Bhandari, Péter Zoltán Csursia // Software Impacts. – 2022. – С. 100306. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.simpra.2022.100306> (дата звернення: 20.01.2025). – Назва з екрана.

16. Технології Інтернету речей в управлінні пристроями на мікроконтролерах: Навчальний посібник [Електронний ресурс] / І.Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, С.П. Новоселов, О.Г. Резніченко. –Електронне видання. –Харків: ХНУРЕ, 2023. – 214 с