

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Юлія ЯМНЕНКО  
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальністю \_\_\_\_\_ 171 Електроніка  
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) \_\_\_\_\_ Електронні прилади та пристрої

на тему: Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у  
роботизованих системах

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ДЕ-391мп  
(шифр групи)

Пунов Євгеній Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц. каф. ЕПС, к.т.н., доц. Сергій МИХАЙЛОВ  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент доц. каф. АМЕС, к.т.н., доц. Кирило ТРАПЕЗОН  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант  
по нормоконтролю доц, к.т.н., Лариса БАТРАК  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет Електроніки

( повна назва )

Кафедра Електронних пристроїв та систем

( повна назва )

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні прилади та пристрої

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

Юлія ЯМНЕНКО

(підпис)

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

«    »                      2020 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Пунов Євгеній Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у роботизованих системах

науковий керівник дисертації Сергій Михайлов, к.т.н. доцент

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020 року № 3242-с

2. Термін подання студентом дисертації 7 грудня 2020  
року                     

3. Об'єкт дослідження процеси автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІД регулятора

4. Вихідні дані Система автоматичного налаштування ПІД регулятора

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Провести аналіз факторів впливу на процес налаштування ПІД регулятора 2. Дослідити існуючі системи регулювання та закони, за якими проходить процес налаштування 3. Розробити модель регулювання та врахування зовнішніх факторів, що впливають на стабільність системи 4. Створити систему автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІД регулятора.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Алгоритм роботи системи керування, структурна та принципова схема системи керування

7. Орієнтовний перелік публікацій Пунов Є. А., Михайлов С. Р. Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у роботизованих системах // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2020. — №19. [Електронний ресурс] <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/19/6562>

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання «28» жовтня 2020 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури	1.09.2020-24.09.2020	виконано
2	Аналіз факторів впливу на ПІД регулятор	25.09.2020-12.10.2020	виконано
3	Дослідження існуючих систем регулювання та налаштування коефіцієнтів	13.10.2020-27.10.2020	виконано
4	Створення системи налаштування зі зворотним зв'язком.	28.10.2020-20.11.2020	виконано
5	Порівняння методів налаштування ПІД коефіцієнтів.	21.11.2020-26.11.2020	виконано
6	Розробка стартап-проекту	26.11.2020 – 03.12.2020	виконано

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Євгеній ПУНОВ  
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сергій МИХАЙЛОВ  
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Метою представленої магістерської дисертації є реалізація системи автоматичного налаштування коефіцієнтів ПД регулятора, що використовується у роботизованих системах.

Основним завданням роботи є виявлення факторів, що впливають на стабільність системи, що керується ПД регулятором та вирішення питання налаштування коефіцієнтів при зміні цих факторів. Аналіз та побудова системи автоматичного налаштування коефіцієнтів. Пошук способів отримання даних зі зворотного зв'язку та регулювання цих даних. Створення реального прототипу системи керування на базі мікроконтролера та реалізація програмного забезпечення для роботи системи, що здатна автономно налаштовувати ПД коефіцієнти у реальному часі. В роботі досліджено вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на стабільність системи, обрано необхідні зворотні зв'язки для отримання даних до мікроконтролеру та створено програмне забезпечення роботи системи. Дана робота може бути застосована у промисловості та прототипуванні для швидкого та якісного налаштування коефіцієнтів ПД регулятору.

**Ключові слова:** ПД регулятор, роботизована система, адаптивний регулятор, мікроконтролер, зворотній зв'язок.

## ANNOTATION

The purpose of the submitted master's thesis is the implementation of a system for automatic tuning of the PID controller coefficients, which is used in robotic systems.

The main task of the work is to determine the factors influencing the stability of the system, which are controlled by the PID controller and to solve the issue of adjusting the coefficients when these factors change. Analysis and construction of a system for automatic adjustment of coefficients. Finding ways to get data from feedback and regulate this data. Creation of a real prototype of a control system based on a microcontroller and implementation of software for the operation of a system capable of autonomously adjusting PID coefficients in real time. In the work, the influence of external and internal factors on the stability of the system was investigated, the necessary feedback was chosen to receive data to the microcontroller, and the software for the operation of the system was created. This work can be used in industry and prototyping for fast and high-quality adjustment of the PID controller coefficients.

**Key words:** PID controller, robotic system, adaptive controller, microcontroller, feedback.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. 8	
1.1 Теоретичні відомості про ПІД-регулятори	8
1.2 Модифікації ПІД-регуляторі	11
1.2.1 Регулятор з ваговими коефіцієнтами при уставці	11
1.2.2 Регулятор з формуючим фільтром для сигналу уставки	12
1.3 Якість регулювання	13
1.4 Класичні методи налаштування коефіцієнтів	16
1.4.1 Метод Циглера-Нікольса, який використовує автоколивання	17
1.4.2 Метод Циглера-Нікольса, який використовує розгінну характеристику об'єкта	18
1.4.3 Ручне налаштування ПІД регулятора	19
1.4.4 Методи оптимізації	20
1.5 Рівняння цифрового ПІД регулятора	21
1.6 Проблеми використання ПІД регуляторів	23
Висновки до першого розділу	25
2. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА	26
2.1 Види адаптивних ПІД-регуляторів	26
2.2 Нечітка логіка в ПІД-регуляторах	30
2.3 Адаптивні ПІД регулятори на основі нейронних мереж	33
Висновки до другого розділу	37
3. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ	38
3.1 Опис роботизованих систем, що використовують ПІД-регулятор	38
3.2 Зворотні зв'язки у ПІД-регуляторах	40
3.3 Регулятори обертів моторів	42

3.3 Алгоритм роботи адаптивного ПД-регулятора	43
3.3.1 Алгоритм для формування керуючого сигналу	45
3.3.2 Алгоритм обробки даних зворотного зв'язку	46
3.3.3. Алгоритм отримання даних від користувача	48
Висновки до третього розділу	50
4. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ	52
4.1 Розробка загальної структурної схеми роботизованої системи, що використовує адаптивний ПД-регулятор	52
4.3 Розробка загальної схеми електричної принципової	54
4.3.1 Розробка стабільного джерела струму	54
4.3.2 Проектування ІЧ датчиків відстані	56
4.3.3 Проектування схеми керування моторами	58
4.3.4 Проектування схеми вводу та виводу інформації	59
4.4 Макет практичної роботи	60
Висновки до четвертого розділу	61
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	62
5.1 Етапи розроблення стартап-проекту	62
5.2. Опис ідеї проекту	64
5.2.1 Технологічний аудит ідеї проекту	66
5.2.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	66
5.2.3 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	71
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
ABSTRACT	78

## **ВСТУП**

**Актуальність роботи.** Системи автоматичного управління використовуються у різних сферах промисловості. Великого розповсюдження, наразі, набувають роботизовані системи, що керуються пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором. Це різного роду безпілотні автомобілі, літаки, промислові роботи та ін. При створенні такої системи, що керується ПД регулятором, виникає необхідність складного та ретельного налаштування коефіцієнтів, щоб система працювала стабільно. У випадку зміни зовнішніх або внутрішніх факторів, необхідно налаштовувати коефіцієнти регулятора заново, що тягне за собою втрати часу та грошей.

Існують роботизовані системи, де налаштування коефіцієнтів ПД регулятора у реальному часі є необхідністю. Роботи, які отримують інформацію з різного роду оптичних приладів, залежать від освітленості. Також, кожна система змінює свої внутрішні параметри з часом в силу старіння електроніки. Система автоматичного налаштування коефіцієнтів ПД регулятора має забезпечити стабільну роботу, незважаючи на фактори, що впливають на неї. Окрім цього, процес первинного налаштування коефіцієнтів також цілком бере на себе адаптивний регулятор.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація була підготовлена відповідно до науково-дослідного плану кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є створення адаптивного ПД регулятора із можливістю задання вхідних параметрів системи, з подальшою автоматизацією процесів налаштування ПД коефіцієнтів.

### **Основними завданнями є:**

1. Пошук та аналіз існуючих рішень для побудови адаптивних систем автоматичного управління.



2. Створення алгоритму, програмного забезпечення та електричної схеми для побудови власної системи, що керується адаптивним ПІД регулятором.

**Об'єкт дослідження.** Процеси автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІД регулятора.

**Предмет дослідження.** Система автоматичного налаштування ПІД регулятору.

**Методи дослідження.** При розв'язанні поставлених у роботі задач для реалізації адаптивного ПІД регулятора було проведено аналіз факторів, що впливають на роботу регулятора та пошук способів автоматизації процесу налаштування ПІД коефіцієнтів. Реалізація роботи проведена на базі мікроконтролера STM32F405RGT6 у програмному середовищі uVision Keil.

**Наукова новизна досліджень полягає у наступному:**

1. Розроблено алгоритм автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІД регулятора в залежності від внутрішніх та зовнішніх факторів, що впливають на систему.

2. Удосконалено електричну схему системи, у котрій використовується ПІД регулятор. Додано зворотній зв'язок, що дає можливість отримати інформацію не про вихідні сигнали регулятора, а про реакцію системи загалом.

**Практичне значення отриманих результатів:**

1. Забезпечена можливість налаштування вхідних параметрів системи за допомогою користувацького інтерфейсу.

2. Адаптивний регулятор реалізований на мікроконтролері із можливим подальшим використанням у різноманітних роботизованих системах.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи були представлені на науково-практичній конференції обдарованої учнівської та студентської молоді «НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОГО СУСПІЛЬСТВА 2020».

**Публікації за темою.** Пунов Є. А., Михайлов С. Р. Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у роботизованих системах // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2020. — №19. [Електронний ресурс] <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/19/6562>

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 25 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 81 сторінку у тому числі, 78 сторінок основного тексту, 38 рисунків та 13 таблиць.

# 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПІД РЕГУЛЯТОРІВ

## 1.1. Теоретичні відомості про ПІД-регулятори

Системи автоматичного управління (САУ) призначені для автоматичної зміни одного або декількох параметрів об'єкта керування з метою встановлення необхідного режиму його роботи[1]. САУ забезпечує підтримання сталості заданих значень регульованих параметрів або їх зміну по заданому закону, або оптимізує певні критерії якості управління. Наприклад, до таких систем відносяться:

- системи стабілізації;
- системи програмного управління;
- системи стеження та ін.

Класична система автоматичного управління представлена на рис. 1.1.

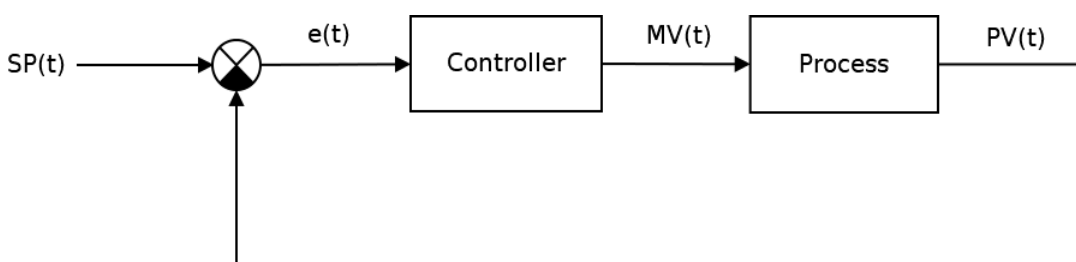


Рис 1.1. Структурна схема системи автоматичного управління

Ключовим елементом будь-якої САУ є регулятор, що являє собою пристрій, який стежить за станом об'єкта управління і забезпечує необхідний закон управління. Процес управління включає в себе: обчислення помилки управління або сигналу неузгодженості  $e(t)$  як різниці між бажаною установкою (set point або SP) і поточною величиною процесу (process value або PV), після чого регулятор виробляє керуючі сигнали (manipulated value або MV) .

Наразі, найбільшого розповсюдження набув ПІД-регулятор, що використовується при розробці квадрокоптерів, літаків, 3D-принтерів, нагрівних систем та багато іншого. Приблизно 90-95% САУ, що

використовуються у наші дні, використовують ПІД-регулятор[2]. Причинами такої великої популярності є простота побудови, здатність до вирішення більшості задач і низька вартість. Сама ідея ПІД регулятора не є новою, та являється базовим методом теорії автоматичного регулювання. Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор формує сигнал, який є сумою трьох складових: пропорційної, інтегральної і диференціальної (рис. 1.2).

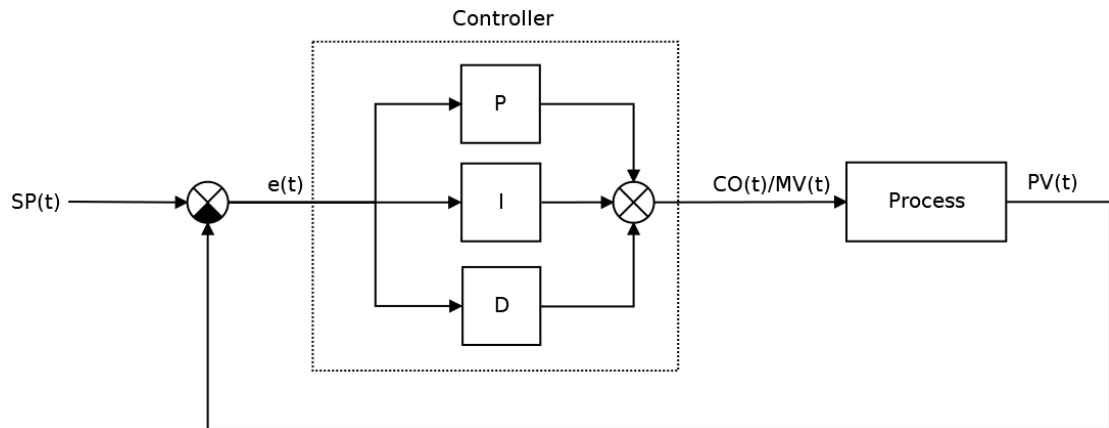


Рис 1.2. САУ з ПІД регулятором

На рис. 1.2  $e(t)$  - помилка неузгодженості,  $P = K_p \cdot e(t)$  - пропорційна,

$I = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt$  - інтегральна,  $D = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$  - диференціальна складові (терми)

закону керування, який в підсумковому вигляді описується наступними формулами:

$$e(t) = SP(t) - PV(t) \quad (1.1)$$

$$MV(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Пропорційна складова  $P$  відповідає за так зване пропорційне керування, сенс якого в тому, що вихідний сигнал регулятора, протидіє відхиленню регульованої величини (помилки неузгодженості) від заданого значення. Чим більше помилка неузгодженості, тим більше командне відхилення регулятора. Це найпростіший і очевидний закон управління. Недолік пропорційного закону

управління полягає в тому, що регулятор ніколи не стабілізується в заданому значенні, а збільшення коефіцієнта пропорційності завжди призводить до автоколивань. Саме тому разом з пропорційним законом управління доводиться використовувати інтегральний і диференціальний.

Інтегральна складова  $I$  накопичує (інтегрує) помилку регулювання, що дозволяє усувати статичну помилку (сталу помилку, залишкову неузгодженість). Або іншими словами: інтегральна ланка завжди вносить деякий зсув і якщо система схильна до деяких постійних помилок, то вона їх компенсує (за рахунок свого зміщення). А ось якщо ж цих помилок немає або вони зневажливо малі, то ефект буде зворотним - інтегральна складова сама буде вносити помилку зсуву. Саме з цієї причини її не використовують, наприклад, в задачах надточного позиціонування. Ключовим недоліком інтегрального закону керування є ефект насичення інтегратора.

Диференціальна складова  $D$  пропорційна темпу зміни відхилення регульованої величини і призначена для протидії відхилень від цільового значення, які прогнозуються в майбутньому. Диференціальне регулювання особливо ефективно для процесів, які мають великі запізнювання. Недоліком диференціального закону керування є його нестійкість до впливу шумів.

Після появи дешевих мікропроцесорів і аналого-цифрових перетворювачів в промислових ПД регуляторах використовуються автоматичне налаштування параметрів, адаптивні алгоритми, нейронні мережі, що навчаються, генетичні алгоритми, методи нечіткої логіки. Ускладнилася структура регуляторів: з'явилися регулятори з двома осями свободи, із застосуванням принципів розімкнутого управління в поєднанні зі зворотним зв'язком. Крім функції регулювання, в ПД-контролер були введені функції аварійної сигналізації, контролю розриву контуру регулювання, виходу за межі динамічного діапазону та ін.

Незважаючи на довгу історію розвитку і велику кількість публікацій, залишаються проблеми в питаннях усунення інтегрального насичення, регулювання об'єктів з гістерезисом і нелінійностями, автоматичним

налаштуванням та адаптацією. Практичні реалізації ПД-контролерів не завжди містять фільтри, надмірний шум і зовнішні збурення ускладнюють налаштування параметрів. Проблеми ускладнюються тим, що в сучасних системах управління динаміка часто невідома, регульовані процеси не можна вважати незалежними, результати вимірювання сильно зашумлені, навантаження непостійне, технологічні процеси безперервні.

Якщо розглядати використання ПД регулятора у роботизованих системах, вище перераховані фактори ускладнюються постійним рухом системи та зміною параметрів навколишнього середовища.

## **1.2 Модифікації ПД-регуляторів**

Описаний в попередньому підрозділі ПД-регулятор і його окремі випадки є теоретичними ідеалізаціями реальних регуляторів, тому для їх практичної розробки необхідно врахувати обмеження, що накладаються реальними умовами і технічною реалізацією. Крім цього, наявність в ПД-регулятор всього лише трьох регульованих параметрів ( $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) в ряді випадків виявляється недостатнім для отримання заданої якості регулювання, особливо для систем, в яких потрібні одночасно висока якість стеження за уставкою і висока якість ослаблення зовнішніх збурень. Постійно зростаючі вимоги ринку до якісних показників ПД-контролерів ініціюють появу безлічі нових модифікацій ПД-регуляторів.

### **1.2.1 Регулятор з ваговими коефіцієнтами при уставці**

У класичному ПД-регулятор сигнал помилки  $e$  є дорівнює різниці між заданою дією  $r$  і вихідною змінною об'єкта  $y$ :  $e = r - y$ . Однак якість регулювання можна поліпшити, якщо помилку обчислювати окремо для пропорційної, диференціальної і інтегральної складових:

$$e_p = br - y, e_d = cr - y, e_i = r - y, \quad (1.3)$$

де  $e_p, e_d, e_i$  - помилки для пропорційної, диференціальної і інтегральної складових відповідно;  $b, c$  - налагоджувальні вагові коефіцієнти. Структурна схема такого регулятора наведена на рис. 1.3.

Рівняння такого регулятора аналогічно (1.2).

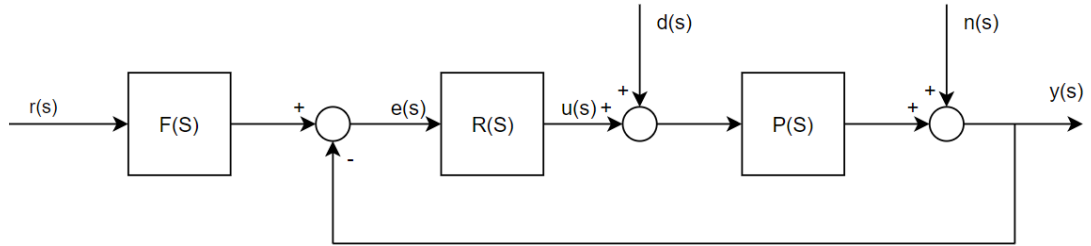


Рис 1.3. ПІД регулятор з ваговими коефіцієнтами

Відзначимо, що ваговий коефіцієнт інтегральної складовою відсутній, що необхідно для забезпечення нульової помилки в сталому режимі.

### 1.2.2 Регулятор з формуючим фільтром для сигналу уставки

Подальшим удосконаленням регулятора зі структурою, показаною на рис. 1.3, є застосування фільтра в блоці  $F(s)$ , передавальна функція якого набуває вигляду[3]:

$$F(s) = \frac{bK + \frac{1}{sT_i} + csT_d}{K + \frac{1}{sT_i} + sT_d} \cdot F_r(s), \quad (1.4)$$

де

$$F_r(s) = \frac{1}{1 + iT_r}, \quad (1.5)$$

Тут  $T_r$  – постійна часу фільтру, котру обирають рівною

$$T_r = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{m_r^2 - 1}, \quad (1.6)$$

де  $m_r$  - показник коливання системи без фільтру.

Приклад реакції системи з регулятором, що використовує формуючий фільтр, наведено на рис. 1.4

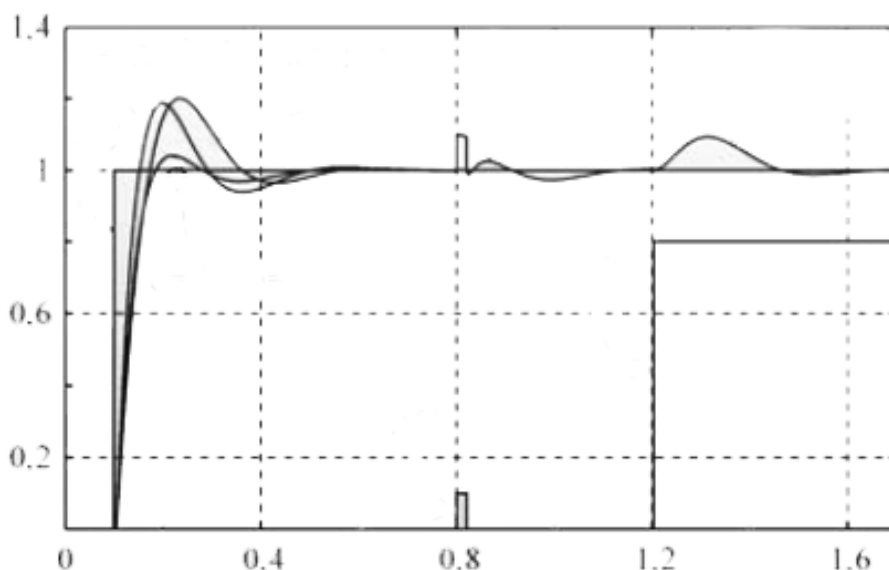


Рис 1.4. Приклад реакції системи з регулятором, що використовує формуючий фільтр

### 1.3 Якість регулювання

Вибір оцінки якості регулювання дуже сильно залежить від задачі, для вирішення котрої, використовується регулятор. Такою задачею може бути:

- встановлення необхідної температури;
- стеження за положенням у просторі (квадрокоптери);
- керування мотором верстату і т.д.

Наступні фактори можуть бути найважливішими для виконання цих завдань:

- відгук на зміну зовнішніх факторів (перерегулювання, недорегулювання, коефіцієнт згасання, час встановлення та ін.);
- реакція на шуми, що впливають на систему;
- реакція системи при досягненні сигналу уставки;
- робастність;
- мінімізація шумів, наведень вимірювань та ін.



Для звичайного ПД-регулятора параметри, які найкраще підходять для моніторингу заданого значення, зазвичай відрізняються від параметрів, що є найкращими для зменшення впливу зовнішніх факторів, що впливають на стан системи. Щоб досягти ситуації у котрій обидва параметри будуть оптимальними, можна використовувати ПД-регулятори з двома осями свободи.

Наприклад, точне відстеження зміни заданого параметра системи, необхідно в система, що мають фізичний рух, в робототехніці. У системах керування технологічними процесами, де задані параметри системи, зазвичай, залишається без змін, потрібне максимальне ослаблення впливу зовнішніх факторів.

Щоб оцінити якість роботи ПД-регулятора у замкненій системі, зазвичай, використовують ступеневий вхідний вплив та ряд критеріїв, що дозволяють відстежити форму перехідного процесу (рис. 1.5):

- максимум помилки регулювання:

$$e_{\max} = \max_{0 < t < \infty} |e(t)| \quad (1.7)$$

і момент часу  $T_{\max}$ , при якому помилка досягає цього максимуму;

- інтегрована абсолютна помилка:

$$e_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1.8)$$

- інтеграл від квадрата помилки

$$e_{IAE} = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (1.9)$$

• декремент згасання  $d$  - відношення першого максимуму до другого (рис. 1.5, рис. 1.6) (типове значення і більше):

$$d = \frac{a}{b} \quad (1.10)$$

Треба відмітити, що зустрічаються й інші визначення декременту загасання, зокрема, як  $b/a$  або як коефіцієнт в показнику ступеня експоненти, яка описує оминаючу згасаючих коливань у системі.

- статична помилка  $e$  - постійна помилка в усталеному режимі системи;
- час встановлення  $T_r$  із заданою похибкою  $e_s$  (час з моменту запуску регулювання, після якого похибка регулювання не перевищує заданого відхилення). Зазвичай  $e_s = 1\%$ , рідше -  $2\%$ ,  $5\%$ . Відповідно, час стабілізації позначають  $T_{0.01}, T_{0.02}, T_{0.05}$ ;
- перерегулювання  $e_{\max}$  - перевищення значення функції при першому викиді над встановленим значенням змінної;
- час наростання  $T_r$  - інтервал часу, протягом якого вихідна змінна наростає від  $10\%$  до  $90\%$  від свого встановленого значення;
- період згасаючих коливань  $T_p$ . В кінці-кінців, затухаючі коливання не є періодичними, тому тут під періодом розуміється відстань між двома сусідніми максимумами.

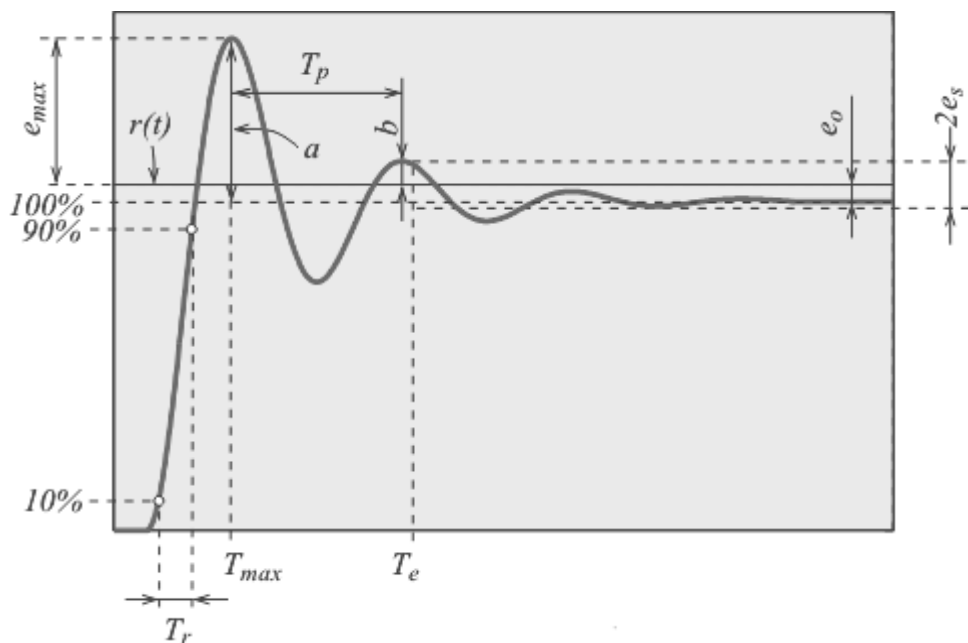


Рис 1.5. Критерії якості регулювання в часовій області

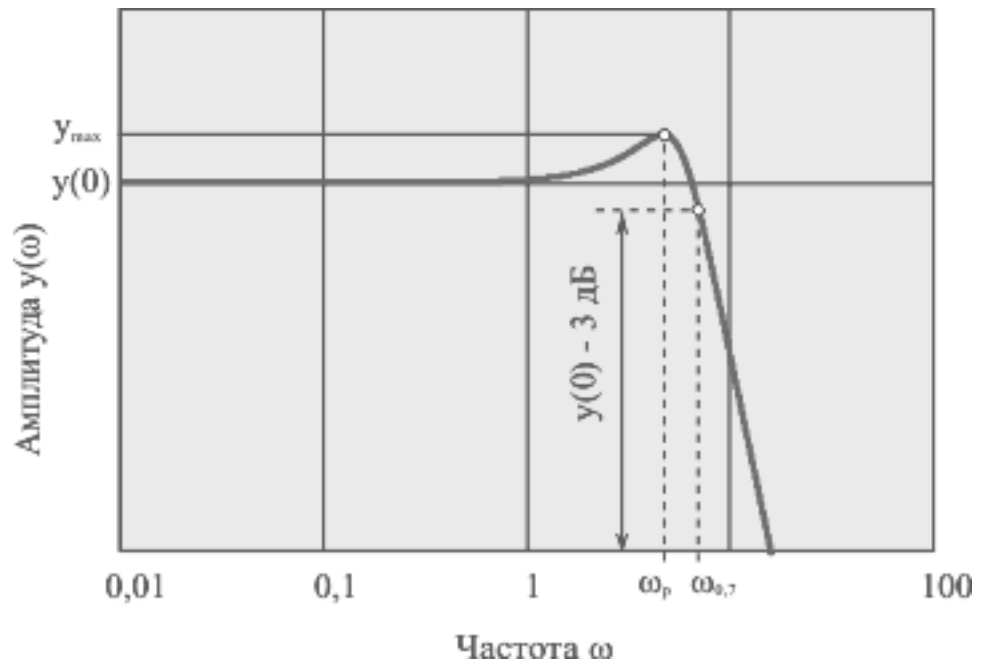


Рис 1.6. Критерії якості регулювання в частотній області

Для систем керування рухом, в якості тестового сигналу, частіше за все використовують лінійно наростаючий сигнал, оскільки електромеханічні системи, зазвичай, мають обмеження у вигляді швидкості реакції на значення регулятора.

Наведені вище критерії можуть використовуватися як для оцінки якості реакції на зміну заданого порогового значення, так і на вплив зовнішніх факторів, таких як, шумів вимірювань.

#### 1.4 Класичні методи налаштування коефіцієнтів

У теорії автоматичного управління (ТАУ) структура регулятора обирається спеціально під конкретний об'єкт керування. При цьому, чим складніший об'єкт керування, тим складнішим буде регулятор, що керує цим об'єктом. У цій роботі структура регулятора вже відома - ПІД-регулятор, причому ця структура є однією з найпростіших. Таким чином, ПІД-регулятори – не найточніші регулятори, але, незважаючи на це, в переважній більшості промислових систем, використовують саме їх.

Першу методику розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора запропонували Зіглер і Нікольс в 1942 році[4]. Ця методика дуже проста, проте має свої недоліки, а саме якість розрахунку параметрів. Незважаючи на це, ця методика дуже часто використовується на практиці і по цей день, хоча з тих пір з'явилося безліч точніших методів розрахунку коефіцієнтів ПД-регулятора.

Зазвичай, після налаштування параметрів, проводять більш точне налаштування вручну. Ручне налаштування коефіцієнтів теж відбувається за рядом теоретичних правил.

Теорія автоматичного управління пропонує декілька методів, серед яких метод призначення полюсів та декілька алгебраїчних методів. Їх також можна використовувати для налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора. У літературі можна зустріти багато інших методів, які мають свої переваги та недоліки в порівнянні з розглянутими. У розділі наведено лише найвідоміші та найрозповсюдженіші методи.

Всі аналітичні (формульні) методи налаштування регуляторів засновані на апроксимації динаміки об'єкта, що використовує модель першого або другого порядку з затримкою. Причиною цього є неможливість аналітичного рішення систем рівнянь, яке необхідно при використанні моделей більш високого порядку. Тому в останні роки, в зв'язку з появою потужних контролерів і персональних комп'ютерів, отримали розвиток і поширення чисельні методи оптимізації. Вони є гнучким інструментом для оптимальної настройки параметрів регулятора для моделей будь-якої складності і легко враховують нелінійність об'єкта управління і вимоги до робастності.

#### **1.4.1 Метод Циглера-Нікольса, який використовує автоколивання**

Розглянемо замкнуту систему з ПД-регулятором. Коефіцієнти при інтегруванні і диференціюванні в регуляторі виводяться в нуль (регулятор стає пропорційним - П-регулятор). Підвищенням коефіцієнта посилення домагаються автоколивань, при цьому коефіцієнт приймає деяке значення  $K_u$ . Фактично даний метод знаходить такий П-регулятор, при якому годограф

системи проходить через критичну точку  $(-1; j0)$  комплексної площини. Замірюється період автоколивань  $T_u$ . Налаштування регулятора далі знаходяться за емпіричними формулами.

Метод Зіглера-Нікольса ніяк не враховує вимоги до запасу стійкості системи, що є другим його недоліком. Судячи з повільного згасання перехідного процесу в системі, цей метод дає дуже малий запас стійкості (рис. 1.7).

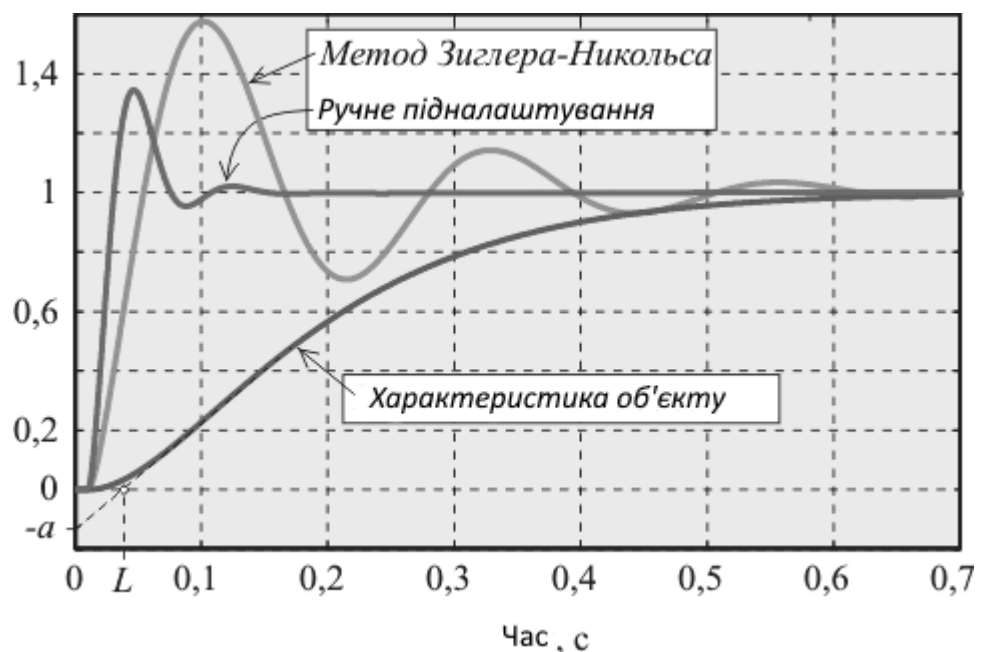


Рис 1.7. Результат налаштування ПІД-регулятора за методом Зіглера-Нікольса для об'єкта другого порядку

#### 1.4.2 Метод Циглера-Нікольса, який використовує розгінну характеристику об'єкта

Даний спосіб також отримано напівемпірично і полягає в знятті перехідної (розгінної) характеристики розімкнутого об'єкта. За графіком замірюється максимальна швидкість наростання характеристики  $R$  і затримка  $L$ . Коефіцієнти регулятора далі знаходяться за емпіричними формулами. Для типових промислових об'єктів (асимптотичний перехідний процес з малим по відношенню до постійної часу значенням запізнювання) метод Циглера-

Нікольса забезпечує коефіцієнт загасання перехідного процесу близько 0,25. Таким чином, фактично об'єкт апроксимується моделлю першого порядку з транспортним запізненням.

Недолік даного методу - неможливість виведення об'єкта нижче третього порядку і об'єктів з інтегратором в режим автоколивач (годограф не перетинає негативну частину уявної осі комплексної площини).

### **1.4.3 Ручне налаштування ПІД регулятора**

Частіше за все, розрахунок параметрів за формулами не може дати точного результату, виходячи з недосконалості математичних моделей, що є дуже спрощеними порівняно з реальними. Дуже часто у таких моделях не враховують нелінійність обмеження керуючого впливу. Крім того, математичні моделі використовують параметри, які заздалегідь отримані з деякими погрішностями в силу не ідеальності вимірювальних приладів. Тому після розрахунку коефіцієнтів необхідно підлаштовувати регулятор вручну. Підстроювання виконується на основі правил, які використовуються для ручного налаштування. Ці правила отримані та виведені з досвіду налаштування регуляторів. Їх можна описати наступним чином:

- при збільшенні пропорційного коефіцієнта, збільшується швидкодія, проте знижується запас стійкості системи;
- при зменшенні інтегральної складової, помилка регулювання з часом зменшується швидше;
- при зменшенні інтегральної складової зменшується запас стійкості системи;
- при збільшенні диференціальної складової, збільшується запас стійкості системи і швидкодія регулювання.

Перераховані правила застосовуються також для регуляторів, що використовують методи нечіткої логіки та експертних систем. Ручне налаштування за допомогою правил зручно виконувати із застосуванням інтерактивного програмного забезпечення на комп'ютері, тимчасово

включеному в контур управління. Для оцінки реакції системи на зміну уставки, зовнішні впливи або шуми вимірювань подають штучні впливу і спостерігають реакцію на них. Після встановлення значення коефіцієнтів регулятора записують в пам'ять ПІД-контролера, а комп'ютер видаляють. Відзначимо, що застосування правил можливо тільки після попередньої настройки регулятора за формулами. Спроби налаштувати регулятор без початкового приблизного розрахунку коефіцієнтів можуть бути безуспішними. При регулюванні теплових процесів налаштування за правилами може зайняти неприпустимо багато часу.

#### **1.4.4 Методи оптимізації**

Методи оптимізації для знаходження параметрів регулятора концептуально дуже прості і аналогічні чисельних методів ідентифікації параметрів об'єкта. Вибирається критерій мінімізації, в якості якого може бути один з показників якості або комплексний критерій, складений з кількох показників з різними ваговими коефіцієнтами. До критерієм додаються обмеження, що накладаються вимогами робастності. Таким шляхом виходить критеріальна функція, що залежить від параметрів ПІД-регулятора. Далі використовуються чисельні методи мінімізації критеріальною функції з заданими обмеженнями, які і дозволяють знайти шукані параметри ПІД-регулятора.

Методи, засновані на оптимізації, мають такі переваги:

- дозволяють отримати оптимальні значення параметрів, які не потребують подальшої підстроювання;
- не вимагають спрощення моделі об'єкта, модель може бути як завгодно складною;
- дозволяють швидко досягти кінцевого результату (уникнути процедури тривалої підстроювання параметрів).

●Однак реалізація даного підходу пов'язана з великими проблемами, які не один десяток років є предметів наукових досліджень. До цих проблем належить:

●низька надійність методу (у багатьох випадках обчислювальний процес може розходитися і шукані коефіцієнти будуть знайдено);

●низька швидкість пошуку мінімуму для з декількома мінімумами.

Проте, методи оптимізації є потужним засобом налаштування ПД-регуляторів за допомогою спеціально розробленого для цього програмного забезпечення.

### **1.5 Рівняння цифрового ПД-регулятора**

Постійні змінні використовують для аналізу и моделювання ПД-регуляторів. Проте, для технічного втілення потрібно перейти до дискретної форми рівнянь, оскільки обрахунок параметрів чисельними методами є занадто довгим, та не підходить для реалізації реальних ПД-регуляторів. Так, основою всіх регуляторів є контролер, який оперує зі змінними, отриманими із аналогових сигналів. Після цього, сигнали дискретизуються та використовуються у обчисленнях.

Треба відмітити, що при обрахуванні керуючого сигналу виникає затримка, що дорівнює сумі часу отримання сигналу (затримка на АЦП) та часу обчислення. Така затримка є небажаною так як вона збільшує затримку в контурі регулювання, що впливає на стійкість системи. Таким чином, при розробці ПД-регулятора необхідно враховувати цю затримку, а також робити обчислення через рівні проміжки часу. Найчастіше, цю проблему вирішують, використовуючи переривання від таймеру.

Також, дуже часто, при розробці ПД-регуляторів, можна зіткнутися з так званими аліасними частотами в спектрі квантованого сигналу. Такий ефект отримується в разі недостатньо високої частоти дискретизації. Частоту аліасного сигналу можна обрахувати як різницю між частотою перешкоди і частотою дискретизації.



Для усунення аліасного ефекту необхідно провести фільтрацію аналогового сигналу перед АЦП, яка і послаблювала заваду хоча б на порядок на частоті, яка дорівнює половині частоти дискретизації. Ще одним варіантом вирішення цієї проблеми є збільшення частоти дискретизації так, щоб вона принаймні в 2 рази (теорема Котельникова) була вище ніж максимальна частота спектру завади.

Щоб перейти до декретної форми ПІД-регулятора, необхідно замінити розрахунки похідних і інтегралів дискретними аналогами. При записі рівняння в операторній формі, для початку слід виконати перехід з області зображень в область оригіналів. При цьому оператор диференціювання замінюється похідною, оператор інтегрування - інтегралом.

У чисельних методах існує велика кількість способів апроксимації похідних і інтегралів до дискретних аналогів. В побудові ПІД-регуляторів для похідну апроксимують кінцевою різницею, а інтеграл – кінцевою сумою, що є найпростішим методом переходу.

Грунтуючись на викладеному вище, рівняння дискретного ПІД-регулятора може приймати різні види, але найпоширенішим є наступний вигляд:

$$U_{i+1} = Ke_i + I_i + U_{Di}, \quad (1.11)$$

де  $i$  - номер поточного такту. Величини  $I_i$  та  $U_{Di}$  обчислюють за виразами (1.12) та (1.13). Для початку роботи алгоритму найчастіше обирають  $U_{D0} = 0$ ,  $I_0 = 0$ ,  $e_0 = 0$ , однак можуть бути і інші початкові умови. Все залежить від завдання регулювання.

$$I_i = I_{i-1} + \frac{\Delta t}{T_i} e_{i-1}; \quad (1.12)$$

$$U_{Di} = \left( \frac{T_d}{T_d + N\Delta t} \right) \cdot U_{Di-1} + \frac{NT_d}{T_d + N\Delta t} (e_i - e_{i-1}). \quad (1.13)$$

Треба відмітити, що алгоритм, отриманий шляхом простої заміни похідної і інтегралу

$$U_{i+1} = Ke_i + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^i e_i + T_d \frac{e_{i+1} - e_i}{\Delta t}, \quad (1.14)$$

де  $k$ - індекс підсумовування відліків від початку процесу до поточного  $i$ -того часового такту) має погану стійкість і низьку точність. Однак, збільшення частоти дискретизації майже стирає відмінність між звичайною та дискретною формами.

## 1.6 Проблеми використання ПД регуляторів

При використанні ПД регулятора найбільшою проблемою є те, що при змінні якихось параметрів системи, потрібно заново налаштовувати усі коефіцієнти, тобто перероблювати математичну модель системи, проводити необхідні розрахунки, або проводити налаштування практично, вводячи нові коефіцієнти та дивлячись на реакцію системи. Особливо багато часу займає налаштування ПД коефіцієнтів під час прототипування систем, коли до системи щоразу додаються або змінюються параметри (кількість датчиків та їх розміщення, контролер, живлення, електрорушійні елементи та інше).

Ряд сучасних мікропроцесорних приладів автоматично розраховують коефіцієнти настройки регуляторів, такі регулятори називаються адаптивними. Адаптація виробляється:

1) У процесі виведення стану об'єкту на нову задану точку SP. У цьому випадку говорять про самоналаштування або самооптимізацію;

2) В процесі стабілізації стану об'єкта. У цьому випадку говорять про адаптивне управління. Адаптивне управління, яке, за самим визначенням цього терміна, має забезпечити стеження параметрів налаштування регулятора за властивостями об'єкта управління, що постійно змінюються. Адаптивні регулятори дозволяють поліпшити якість регулювання температури, наприклад, при зміні завантаження печі і зміні стану нагрівального елементу в процесі експлуатації.

Однак можна відзначити і недоліки адаптивних систем:

- у разі дуже великих впливів, параметри налаштування можуть збитися і система на деякий час може перейти в коливальний режим із значеннями перевищують межі регульованої величини  $PV$ ;
- вбудовані алгоритми адаптації проводять ідентифікацію не всіх типів об'єктів управління;
- методи зміни вихідного сигналу в процесі ідентифікації об'єкта можуть мати незворотні наслідки для технологічного процесу.

У будь-якому випадку для установки адаптивних систем (деяких виробників) потрібне хоча б грубе задання деяких параметрів:

- частоти опитування;
- максимального і мінімального значення регульованої величини;
- часу регулювання;
- заданого значення перерегулювання;
- допустимого значення зміни вихідного сигналу;
- зони нечутливості та ін.

Наразі, цю проблему намагаються вирішити за допомогою нейронних мереж, які будуть навчатися налаштовувати ПІД коефіцієнти безпосередньо під час роботи системи. Таке керування отримало назву «гібридне нейро-ПІД управління»[5]. Структурна схема такого регулятора показана на рис. 1.8.

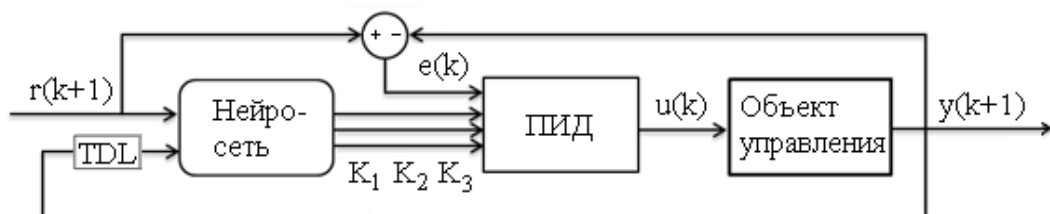


Рис 1.8. Гібридне нейро-ПІД управління

Навчання нейромережі відбувається в режимі реального часу за помилкою зворотного зв'язку, методом найшвидшого спуску.

Незважаючи на бурхливий розвиток нейронних мереж, при пошуці існуючих рішень, не було знайдено конкретних прикладів реалізації та застосування цього типу регулювання.

### **Висновки до першого розділу**

Отже, ПД-регулятори мають багато переваг. Можна відмітити велику різноманітність видів ПД-регуляторів, що дає змогу підібрати потрібний майже під будь-яку систему. Однак, при збільшені видів регулятора, збільшується и кількість способів їх налаштування. Як було сказано вище, обрахунок параметрів регулятора займає дуже багато часу на етапах розробки, тестування та налагодження роботизованих систем. Таким чином, під будь-яку систему, можна сказати, розробляється новий ПД-регулятор, що враховує кількість та вид датчиків, особливості руху та форми системи, внутрішні фактори (живлення, шуми, тощо), а також обчислюється діапазон похибок, які обробляє система. Адаптивні ПД-регулятори вже існують і використовуються у промисловості, але вони налаштовані на роботу з конкретними приладами та системами.

Тому метою роботи є розробка адаптивного ПД-регулятора, котрий може підлаштуватися на роботу з більшістю роботизованих систем, що використовують оптичні датчики для орієнтації у просторі.

## **2. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА**

### **2.1 Види адаптивних ПІД-регуляторів**

Розвиток комерційних ПІД-регуляторів потребує розробки методів, що дозволяють знизити витрати людських ресурсів на їх налаштування та обслуговування. Незважаючи на те, що багато методів автоматичного налаштування та адаптації ПІД-регуляторів, що використовуються у наш час, були розроблені ще в 60-х роках, в промислових контролерах адаптивна техніка почала використовуватися тільки з середини 80-х. Це пов'язано з технічною складністю реалізації адаптивних алгоритмів на елементній базі, яка існувала до появи мікроконтролерів.

Налаштування регулятора може виконуватися повністю вручну або автоматично (автоналаштування).

Автоналаштування регулятора може виконуватися повністю автоматично (система сама виявляє момент часу, коли потрібно провести налаштування). Також є системи, у яких людина повинна викликати налаштування. Повністю автоматичне налаштування системи може викликатися у разі настання заздалегідь заданої умови, наприклад, при зміні похибки регулювання, при зміні зовнішніх впливів, або безперервно в часі. Автоматичне налаштування, що виконується без участі людини, називається адаптацією. Прикладом адаптації може бути автоналаштування при зміні кількості води у бойлері, або зміні навантаження на мотор верстату. Іноді під терміном "адаптація" розуміють, процес пристосування та налаштування регулятора до реального об'єкту на стадії побудови та введення системи в експлуатацію.

Одним з видів адаптації є розімкнуте керування коефіцієнтами регулятора (табличне автоналаштування), у цьому випадку, коефіцієнти обираються з таблиці, у якій є відповідність коефіцієнтів та умов, при яких, вони повинні бути встановлені.

Треба відмітити, що регулятори, налаштовані в автоматичному режимі, частіше мають гіршу якість, ніж регулятори налаштовані вручну.

На даний момент відсутні надійні, прості і загальноприйняті методи автоматичного налаштування.

Всі види автоматичного налаштування використовують три принципово важливих етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора, настройка. Часто кінцевий етап включає етап підстроювання (заклучна оптимізації настройки). Оптимізація налаштування необхідна в зв'язку з тим, що методи розрахунку параметрів регулятора за формулами є спрощеними, не враховують нелінійність об'єкта, зокрема, завжди присутню нелінійність типу "обмеження", а ідентифікація параметрів об'єкта виконується з деякою погрішністю. Налаштування регулятора може бути пошукове (без ідентифікації об'єкта, шляхом пошуку оптимальних параметрів) і безпошукове (з ідентифікацією). Пошукова ідентифікація базується зазвичай на правилах ручного налаштування або на ітераційних алгоритмах пошуку мінімуму критеріальною функції. Найбільш поширений пошук оптимальних параметрів за допомогою градієнтного методу пошуку. Для цього знаходять похідні від критеріальної функції по параметрах ПІД-регулятора, які є компонентами вектора градієнта[6]. Далі проводиться зміна параметрів відповідно до напрямку градієнта.

Важливо підкреслити, що незважаючи на наявність "автоматичного" підстроювання, контролер може не дати необхідної якості регулювання з причин, не залежних від якості закладених в нього алгоритмів. Наприклад, об'єкт управління може бути погано спроектований (залежні контури регулювання, велика затримка, високий порядок об'єкта); об'єкт може бути нелінійним; датчики можуть бути розташовані не в тому місці, де потрібно і мати поганий контакт з об'єктом, рівень перешкод в каналі вимірювання може бути неприпустимо великим; роздільна здатність датчика може бути недостатньо високою; джерело вхідного впливу на об'єкт може мати занадто велику інерційність або гістерезис; можуть бути також помилки в монтажі

системи, погане заземлення, обриви провідників і т.д. Тому перш ніж починати автоматичне налаштування, необхідно переконатися у відсутності перелічених проблем. Наприклад, якщо внаслідок зносу механічної системи з'явився непередбачений проектом гистерезис і тому система знаходиться в режимі коливань, підстроювання регулятора може не дати бажаного результату, поки не усунена причина проблеми.

Структурна схема системи, що автоматично налаштовується приведена на рис. 2.1. Автоналаштування практично не має ніяких особливостей в порівнянні з описаними раніше методами, за винятком того, що воно виконується в автоматичному режимі. Основним етапом автоматичного налаштування та адаптації є ідентифікація моделі об'єкта. Вона виконується в автоматичному режимі звичайними методами. Автоматичне налаштування може виконуватися і без ідентифікації об'єкта, ґрунтуючись на правилах ручного налаштування або пошукових методах.

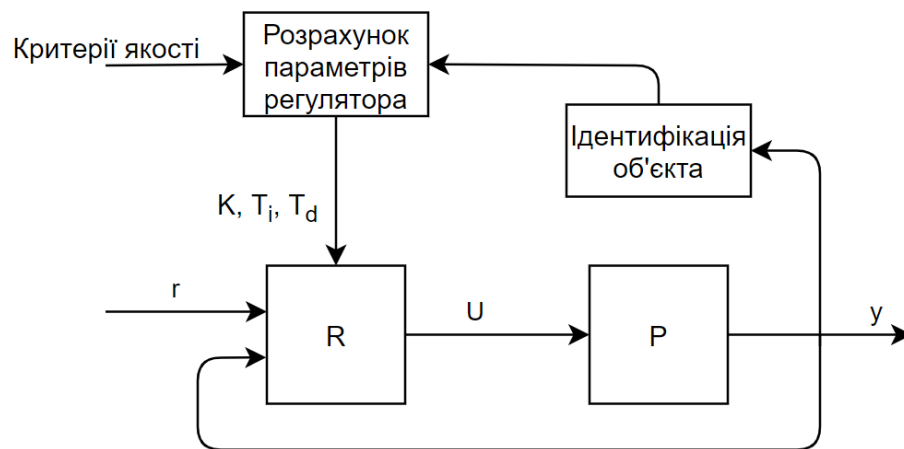


Рис 2.1. Загальна структура системи з автоматичним налаштуванням

Одним за найбільш простих методів адаптації ПД-регулятору до зміни навколишніх факторів, є табличне налаштування. Його можна використовувати не тільки для автоматичного налаштування, а й як самостійний метод регулювання відносно простих процесів у яких потрібно змінювати параметри системи в залежності від якихось умов.

Принцип табличного керування дуже простий (рис. 2.2). Знаючи можливі зміни режимів роботи системи, що використовує регулювання (наприклад, варіанти дорожньої розмітки для безпілотного автомобіля), виконують налаштування об'єкту для цих режимів роботи (використовуючи стандартні методи налаштування). Отримані значення цих параметрів записують в таблицю. Під час роботи системи вимірюється фактор, що впливає на зміну режиму роботи і в залежності від значень цього фактору, обираються коефіцієнти ПІД-регулятора з таблиці.

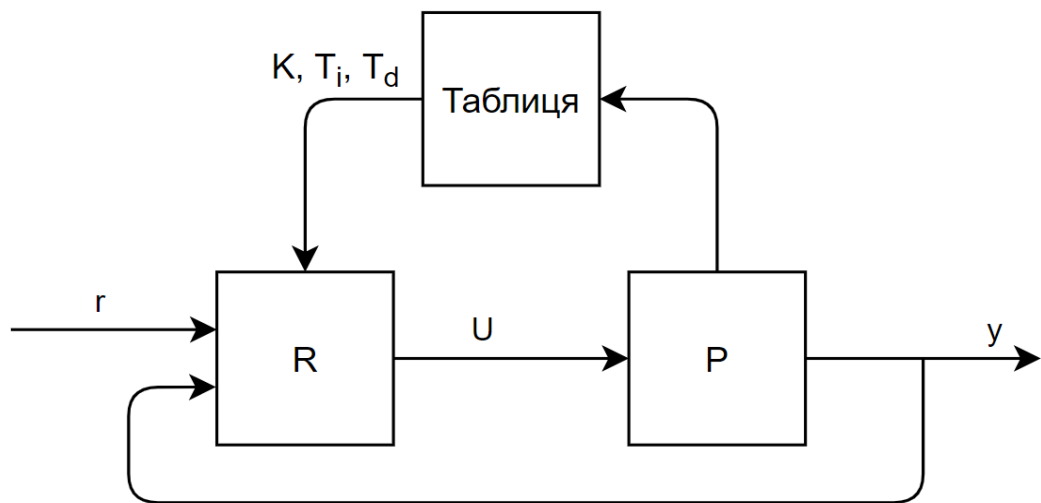


Рис 2.2. Адаптивне управління за допомогою параметрів, заздалегідь записаних в таблицю

Таку систему можна розглядати як систему з двома контурами регулювання. Але контур, що використовується для адаптації у цій системі є розімкнутим. Так, табличне керування має наступні переваги: висока швидкодія, відсутність помилкового спрацьовування (не враховуючи помилки людини при створенні таблиці).

Для вирішення деяких задач, таблиця може бути багатовимірною; для зниження необхідної розмірності таблиці можна використовувати інтерполяцію даних.

Однак, незважаючи на всі переваги, одним з найбільших недоліків є якраз великі затрати людських ресурсів на попереднє налаштування та



створення таблиці станів об'єкту. Однак, ця проблема частково вирішується використанням програмного забезпечення для автоматичної адаптації регулятора, після виконання яких, об'єкт доналаштовується вручну, а після цього створюється таблиця станів.

Таким чином, адаптивні ПД-регулятори на основі табличного керування можна використовувати, якщо заздалегідь відомі можливі зміни дестабілізуючих факторів, що впливають на регулятор.

## **2.2 Нечітка логіка в ПД-регуляторах**

Нечітке управління (управління на основі методів теорії нечітких множин) можна використовувати при недостатній кількості інформації про об'єкт керування та при достатньому досвіді експерта керування такою системою. Так, нечітке управління найчастіше використовується у нелінійних системах, реалізація яких занадто складна.

ПД-регулятори з нечіткою логікою являються одними з найпоширеніших у наш час. Вони використовуються в системах для наведення телекамер, що транслюють спортивні події, для керування плавним стартом двигуна автомобіля, для налаштування потоку повітря кондиціонерів, для керування температурою у інкубаторах і в інших областях.

Вся інформація, що поступає від експерта виражається словами. Таким чином, необхідно привести її у такий вигляд, при котрому її можна буде використовувати у ПД-регуляторах. Для цього використовують лінгвістичні змінні і теорію нечітких множин, яка була розроблена Л. Заде в 1965 році. Цю теорію можна описати наступним чином. Наприклад, існує система, що слідкує за температурою води. Так, елемент «температура 50 градусів» може належати безлічі "температура гарячої води" або не належати їй. При цьому вводиться поняття приналежності. Тепер описати стан системи можна якось так: "елемент 1 належить множині 1 з коефіцієнтом приналежності  $n$ ", де  $1 > n > 0$ .

Нечітку логіку зазвичай використовують для початкового налаштування системи та для налаштування системи у реальному часі. Обидва варіанти можуть бути реалізовані у одному ПІД-регуляторі[7].

Одна з найпоширеніших структур нечіткого регулятора (нечіткого ПІ-регулятора) показана на рис. 2.3. У такому регуляторі помилка приходить на вхід регулятора, після чого обчислюється її похідна. Після цього проходить процес фазифікації цих величин (помилки та похідної). Фазифікація – це процес перетворення в нечіткі змінні. Далі, вже нечіткі змінні використовуються в блоці нечіткого логічного висновку – блок, що виявляє приналежність стану до якоїсь множини та підбирає керуючий вплив на об'єкт. Після цього проходить процес дефазифікації – зворотного процесу отримання керуючого сигналу з нечіткого вигляду. Останнім етапом є подання керуючого сигналу на вихід регулятора для впливу на систему.

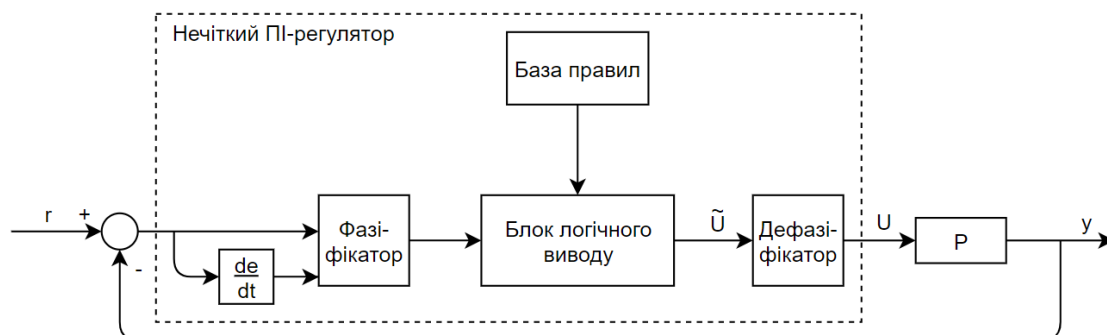


Рис 2.3. Структура нечіткого ПІ-регулятора

Налаштування регулятора, виконане методами, викладеними у попередніх розділах, не є оптимальним і може бути поліпшене за допомогою подальшого підстроювання. Підстроювання, зазвичай, виконується оператором, який враховує правила налаштування регулятора, або автоматично, за допомогою блоку нечіткої логіки (рис. 2.4). Фазі-підстроювання у багатьох випадках дозволяє значно покращити якість ПІД-регулятора, а саме: зменшити перерегулювання, знизити час встановлення та ін.

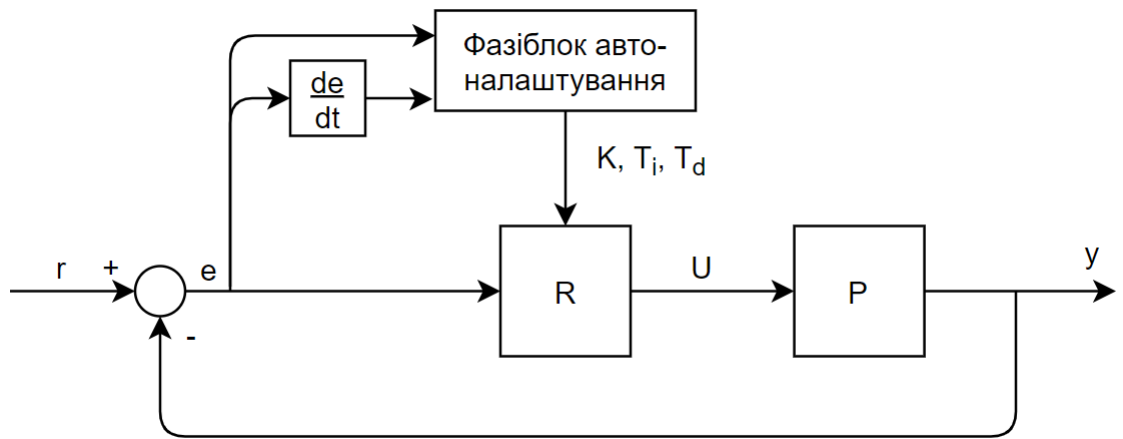


Рис 2.4. Структура ПІД-регулятора з блоком автоналаштування на основі нечіткої логіки

Для початку процесу автоналаштування методом на основі нечіткої логіки необхідно початкові значення наближень коефіцієнтів ПІД-регулятора. Зазвичай, для цього використовують метод Зіглера-Нікольса. Далі необхідно сформулювати так звану критеріальну функцію, що буде шукати оптимальні значення параметрів.

Процес налаштування регулятора можна розбити на декілька етапів. Для початку слід обрати діапазони вхідних і вихідних сигналів блоку автоналаштування, правила нечіткого виведення, форму функцій приналежності шуканих параметрів, діапазони масштабних множників, метод дефазифікації, механізм логічного висновку, які необхідні для перетворення чітких змінних в нечіткі.

Для пошуку параметрів регулятора використовують методи оптимізації. Для цього обирається цільова функція як інтеграл від суми квадратів помилки регулювання і часу встановлення.

Як параметри, що необхідно знайти, обирають локальні максимуми функцій приналежності (рис. 2.5) і коефіцієнти на вході і виході фазі-блоку[7].

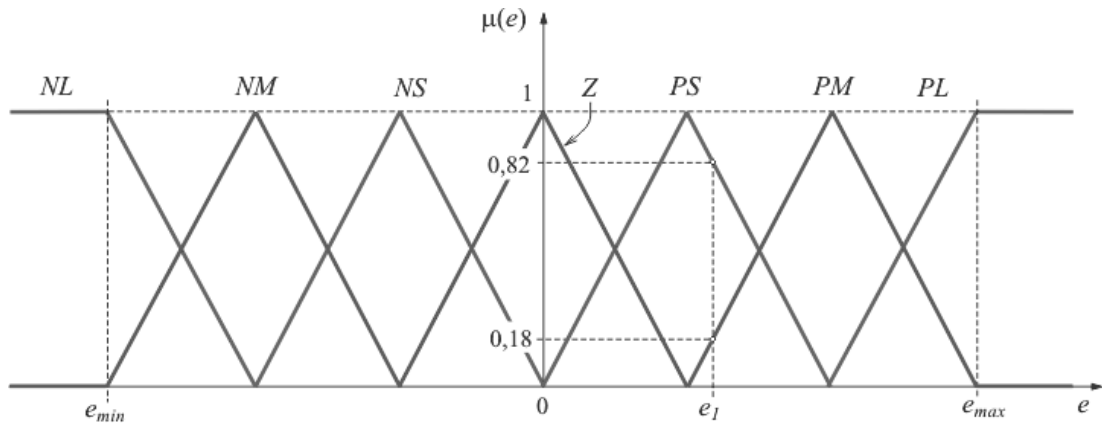


Рис 2.5. Розподіл області зміни змінної на множини NL, NM, NS і т.д. з функціями належності  $\mu(e)$  трикутної форми

Треба відмітити, що у ситуаціях, коли достатньо інформації для побудови точної та повної математичної моделі керуючого об'єкта, класичний регулятор буде якісніше нечіткого, так як при побудові нечіткого регулятора вихідні дані є занадто наближеними в силу особливості даного типу регуляторів.

### 2.3 Адаптивні ПД регулятори на основі нейронних мереж

Нейронні мережі так само як і нечітку логіку зазвичай використовують для початкового налаштування системи та для налаштування системи у реальному часі у блоці автоналаштування. Нейронні мережі можна використовувати у випадку коли є багато схожих систем, що використовують ПД-регулятори, але які відрізняються вхідними параметрами[8]. Так, експерт може показати нейронній мережі, як варто налаштовувати регулятор не декількох системах, після чого нейронна мережа «навчиться» налаштовувати схожі регулятори. Можна помітити схожість регулятора, побудованого на нейронній мережі та регулятора з табличним керуванням. Вони відрізняються спеціально розробленими для нейронних мереж методами «навчання» та формування власних коефіцієнтів для різних ситуацій. Один з варіантів структури нейронної мережі, що використовується у блоці автоналаштування показаний на рис. 2.6.

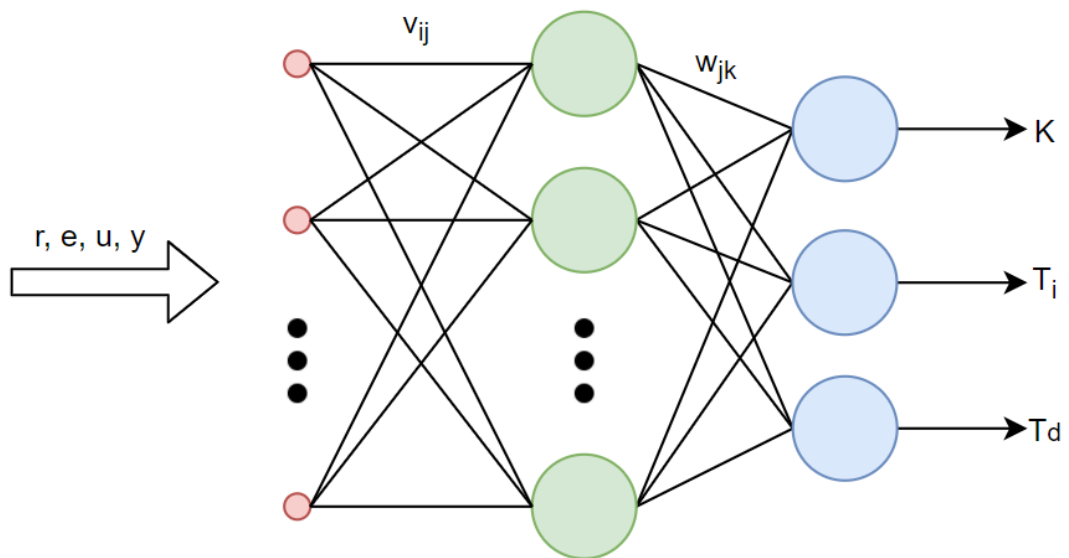


Рис 2.6. Структура нейронної мережі в блоці автоналаштування

Якщо порівнювати нечітку логіку та нейронні мережі, то можна зробити висновок, що при використанні нейронної мережі витрачається набагато менше людських ресурсів, оскільки експерт не повинен самостійно прописувати лінгвістичні змінні та формувати правила фазіфікації та дефазіфікації. Достатньо кілька разів самостійно налаштувати систему під час «навчання» нейронної мережі.

Нейронна мережа складається зі штучних нейронів – персептронів, що можна описати у вигляді функціонального блоку з одним виходом і входами, який, в загальному випадку, реалізує якесь нелінійне перетворення

$$y = F\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right), \quad (2.1)$$

де  $w_i$  - вагові коефіцієнти (параметри) вхідних змінних  $x_i$ ;  $b$  - постійний зсув;  $F()$  - функція активації персептрона, вона обирається залежно від призначення нейронної мережі. Нейронна мережа (рис. 2.6) складається з великої кількості, пов'язаних між собою, персептронів.

Структура системи адаптивного ПІД-регулятора на основі нейронної мережі, що виконує роль блоку автоналаштування, наведена на рис. 2.7.

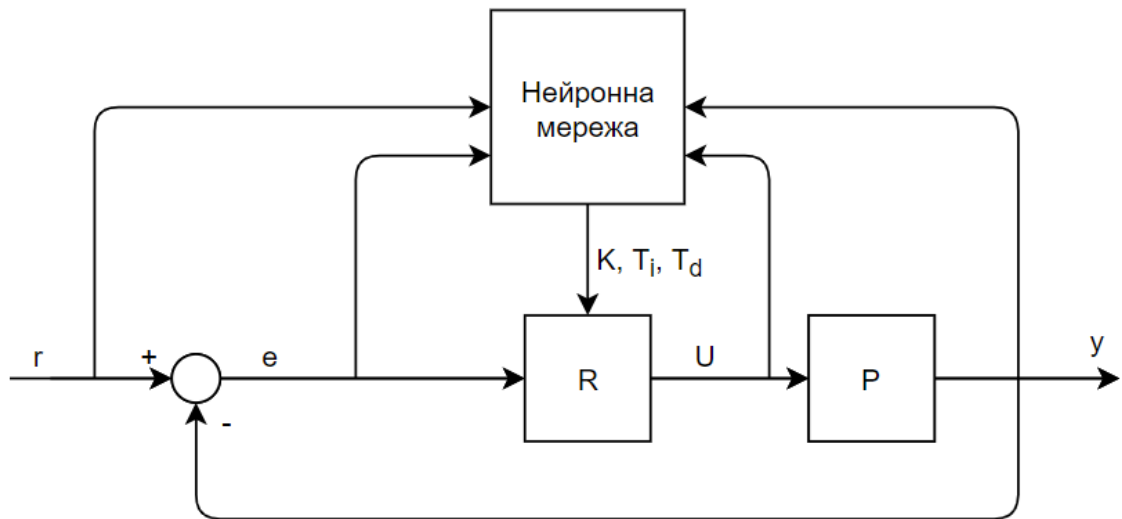


Рис 2.7. Структура ПІД-регулятора з блоком автоналаштування на основі нейронної мережі

При проектуванні адаптивних регуляторів на основі нейронних мереж, найскладнішою частиною є «навчання». «Навчання» полягає в знаходженні невідомих параметрів пересептронів  $w_i$ ,  $b$  та  $a$ . Одним з найпоширеніших методів навчання нейронних мереж є метод градієнтного спуску, що шукає глобальний мінімум критеріальної функції, яка, в свою чергу, залежить від параметрів пересептронів. Процес пошуку є поступовим, на кожній ітерації знаходяться всі коефіцієнти мережі. Та з кожною ітерацією перераховуються, використовуючи спеціальні алгоритми. Пошук коефіцієнтів починається з вихідного шару пересептронів і рухається до першого шару (метод зворотного розповсюдження помилки).

Процес навчання нейронної мережі відображено на рис. 2.8. Експертів підлаштовує параметри регулятора в системі, постійно змінюючи вхідні фактори, що впливають на стабільність системи. Для навчання нейромережі потрібно обирати експерта, що має великий досвід у налаштуванні різного роду регуляторів. Діаграми змінних  $r$ ,  $e^*$ ,  $u^*$ ,  $y^*$ , що отримуються під час налаштування, записуються в архів і потім подаються на нейронну мережу, у якості навчального набору(рис. 2.8). Нейронна мережа налаштовує вагові коефіцієнти таким чином, щоб мінімізувати отриману похибку між значенням,

що отримала вона та значенням, отриманим експертом. Після «навчання» вагові коефіцієнти нейронної мережі заносяться в блок автоналаштування (рис. 2.7). Після цього, навчена нейронна мережа повинна налаштовувати коефіцієнти так само, як це зробив би експерт. Окрім цього, така нейронна мережа може обробляти такі ситуації вхідних даних, котрі не були пророблені експертом, що дає змогу налаштовувати схожі системи дуже швидко.

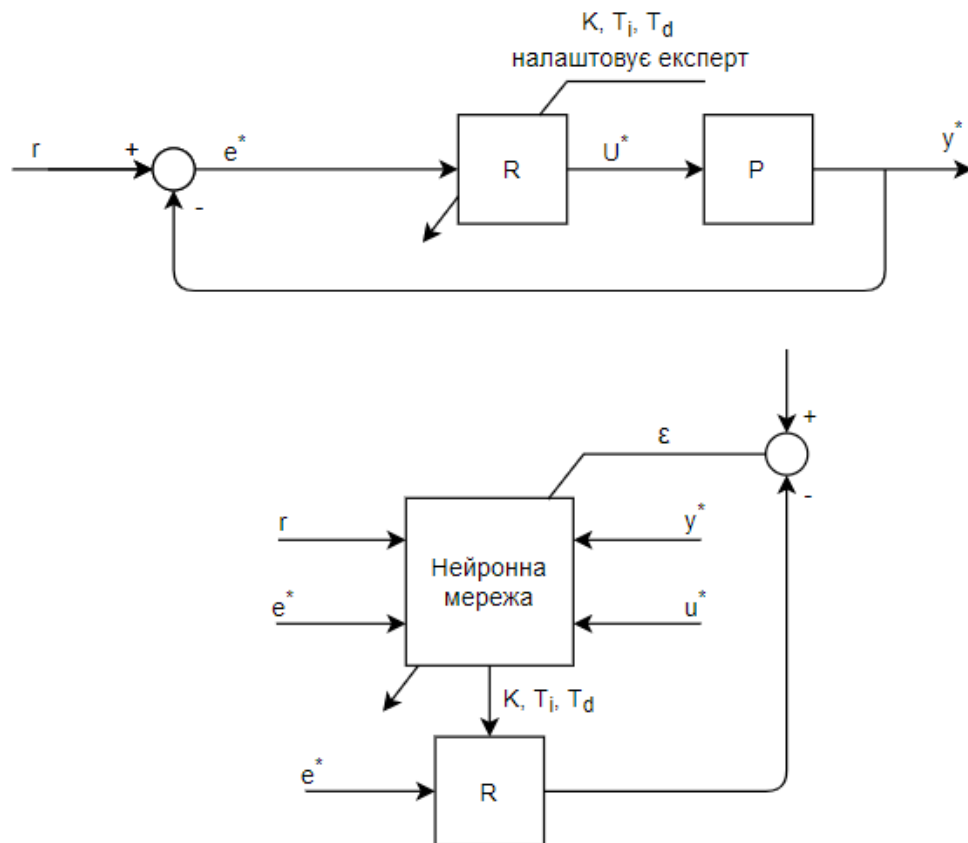


Рис 2.8. Схема навчання нейронної мережі в блоці автоналаштування

Саме через великий час навчання досі не має можливості широко використовувати дану технологію та використовувати її у промислових масштабах. Ще одним недоліком нейронних мереж є неможливість коректного опрацювання похибок регулювання для факторів, що не входили в вибірку при навчанні. Також, слід відмітити, що в процесі написання магістерської дисертації не було виявлено публікації у яких досліджували робастність або запас стійкості регулятора, побудованого на нейронних мережах.

## **Висновки до другого розділу**

Отже, наразі, існує велика кількість готових рішень адаптивних ПІД регуляторів. Майже всі вони використовують зворотній зв'язок з виходу регулятора. Також, при аналізі існуючих методів адаптивного регулювання було виявлено, що всі методи так чи інакше залежать від людини. Таким чином, ще раз підтвердилася актуальність проведених досліджень, метою яких є побудова системи, що адаптується під різні види роботизованих систем, маючи тільки інформацію про саму систему.

Також, варто відмітити, що всі вивчені джерела звертають увагу на те, що будь-яка система, що була налаштована за допомогою адаптивного ПІД регулятора, має меншу точність, ніж система, що налаштована чисельними методами та доналаштована вручну. Таким чином, варто розглядати адаптивні ПІД-регулятори як інструмент швидкого та грубого налаштування системи для зменшення часу при розробці та тестуванні цих систем з подальшим доналаштуванням вручну.



### 3. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

#### 3.1 Опис роботизованих систем, що використовують ПІД-регулятор

Більшість роботизованих систем, що керуються САУ мають об'єкт керування, що впливає на рушійні елементи. Таким чином, абстрактна модель роботизованої системи представлена на рис. 3.1.

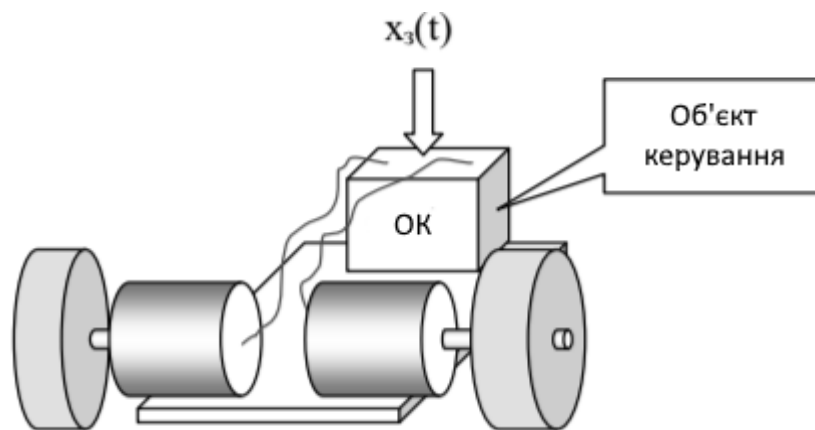


Рис 3.1. Модель роботизованої системи

На рис. 3.1  $X_3(t)$  – відхилення роботизованої системи від нульової помилки. Таким чином майже всі схожі системи мають структурну схему, показану на рис. 3.2.

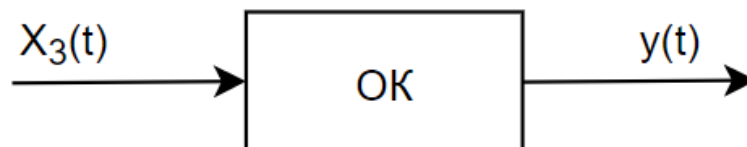


Рис 3.2. Структурна схема роботизованої системи, що використовує САУ

На будь-яку роботизовану систему впливають зовнішні та внутрішні фактори. Такими факторами можуть бути: нерівність поверхні, неоднаковість моторів, старіння елементів схеми та ін. Усі ці фактори відхиляють систему від

нульового положення. Завдання ПД-регулятора повернути систему у почтаковий стан за найкоротший час.

Для прикладу розглянемо робота, що повинен їздити по чорній лінії. Такі роботи широко використовуються у промисловості (роботи-грузчики для яких можна намалювати маршрут руху), розважальній сфері (роботи-офіціанти, роботи-прибиральники), та системах безпілотного транспорту (рух по дорожній розмітці). Модель робота, що їздить по чорній лінії представлена на рис. 3.3, його структурна схема на рис. 3.4.

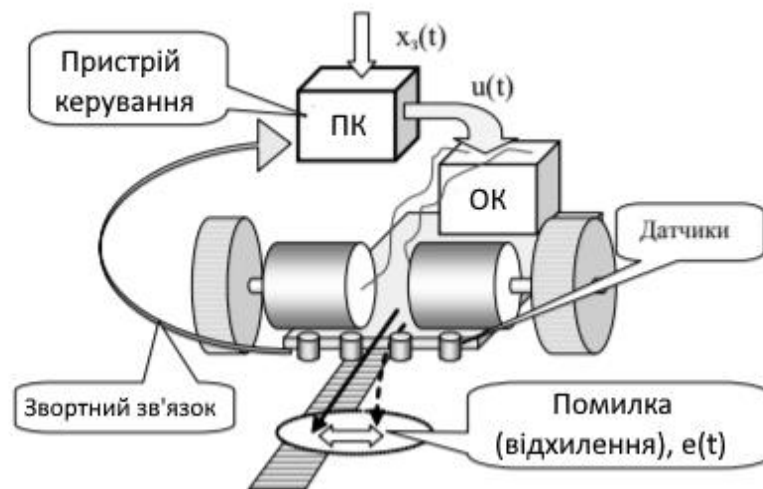


Рис 3.3 Модель робота, що їздить по чорній лінії

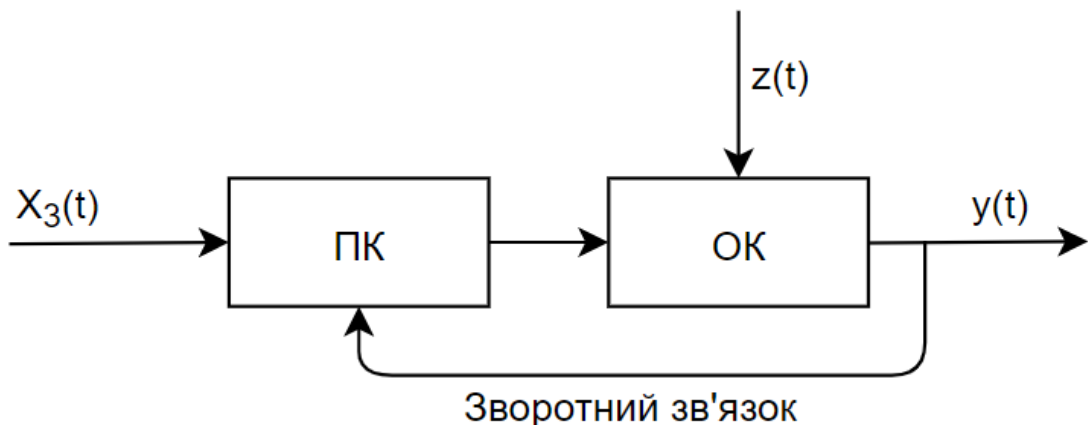


Рис 3.4 Структурна схема робота, що використовує ПД-регулятор

### 3.2 Зворотні зв'язки у ПІД-регуляторах

В основі реалізації системи адаптивного ПІД регулятора лежить зворотній зв'язок. На відмінну від вже існуючих систем зі зворотнім зв'язком, у розробленій системі використовується не сигнал виходу самого регулятора (рис.3.5), а сигнал додаткового незалежного сенсора (рис. 3.6).

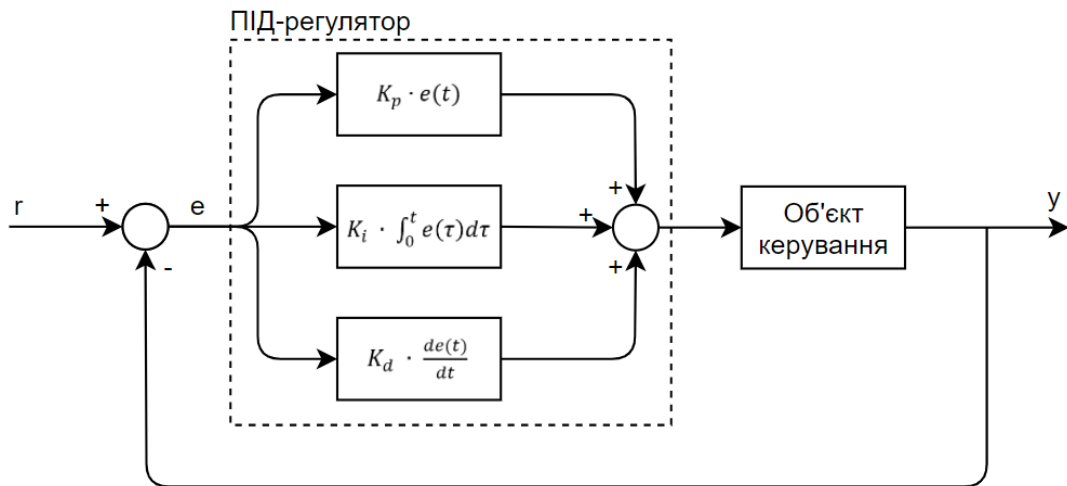


Рис 3.5. Існуюча модель ПІД регулятора зі зворотнім зв'язком

Дані моделі регулятора, показані на рис.3.5, не використовують отриману інформацію зворотного зв'язку для налаштування коефіцієнтів, що змушує користувача самостійно налаштовувати їх. Тобто у цій моделі, зворотній зв'язок не використовується, як складова для обрахунку коефіцієнтів. Він впливає лише на початкову помилку. Окрім цього, у даному прикладі, зворотній зв'язком є вихідний сигнал об'єкту керування, а не реакція усієї системи на зміни.

При використанні додаткового сенсора, у випадку розроблюваної системи - гіроскопа, ми маємо змогу проаналізувати не самі значення, що генеруються ПІД регулятором, а те, як вплинули конкретні значення на всю систему загалом. Це дає нам змогу оцінити всі коефіцієнти та підправити їх. На основі нових даних, знов отримати інформацію про стан системи, та знову підправити

коефіцієнти. Так може продовжуватися до того часу, поки система не вийде на, встановлений користувачем, час стабілізації системи.

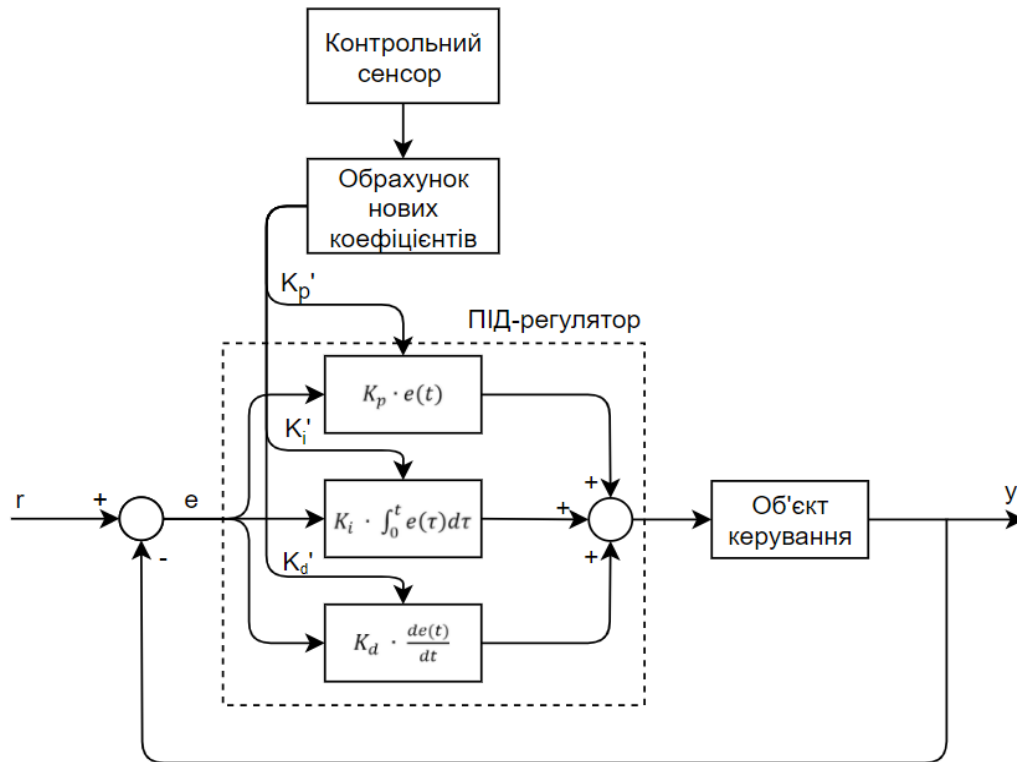


Рис 3.6. Модель ПІД регулятора зі зворотним зв'язком контрольного сенсора

Слід відмітити, що у якості контрольного сенсора, для різних видів роботизованих систем потрібно використовувати різні датчики. Наприклад, якщо система орієнтується у просторі за допомогою оптичних датчиків і фізично змінює своє положення, то в якості контрольного сенсору потрібно обрати гіроскоп, що надасть можливість слідкувати за реакцією системи на розрахунки ПІД-регулятора. За допомогою такого сенсора, та правильно написаного алгоритму можна отримати інформацію про стан системи цілком, наприклад, чи є вона перерегульована, або навпаки. Таким чином, таке регулювання буде схоже на ручне налаштування, так як за зміну коефіцієнтів відповідає незалежний блок, що «спостерігає» за системою ззовні.

### 3.2 Регулятори обертів моторів

Для керування рухом роботизованої системи найчастіше використовують ШІМ сигнал, що дає змогу плавно змінювати швидкість обертів моторів, кут сервомоторів, яскравість світлодіодів та багато іншого.

ШІМ (Широтно-імпульсна модуляція) - процес керування шириною (тривалістю) високочастотних імпульсів за законом, який задає низькочастотний сигнал (рис. 3.7). Усі сучасні контролери здатні генерувати ШІМ заданої частоти та скважності.

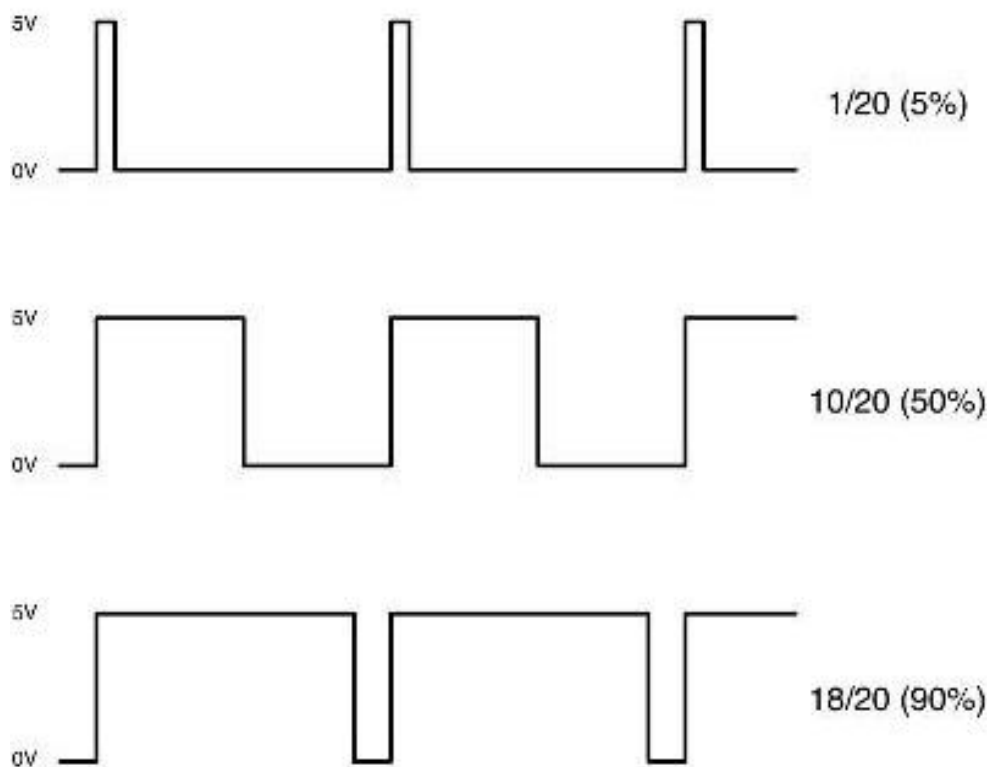


Рис 3.7. Широтно-імпульсна модуляція

У системі, що розробляється вид ШІМ сигналу не має значення, таким чином у роботі використовується стандартний ШІМ сигнал, що генерується на портах контролеру. Для зворотнього зв'язку, що йде на блок обрахунку помилки слід обрати кількість обертів моторів за хвилину, та як усі мотори мають різні характеристики та різну швидкість обертання при подачі на них

однакового ШІМ сигналу. Таким чином слід використовувати мотори, що оснащені енкодерами для отримання коректних даних о швидкості системи.

### **3.3 Алгоритм роботи адаптивного ПІД-регулятора**

У даній моделі використовується поетапний алгоритм налаштування коефіцієнтів. Диференційний та інтегральний коефіцієнти виставляються в нуль, тим самим забираючи відповідні складові. Пропорційний коефіцієнт виставляємо в 1. Далі система самостійно досягає найбільшої помилки, що можлива, та запам'ятовує положення, в якому вона знаходиться. Дуже важливо при виставленні стенду, розмістити його у положення 0-ї похибки, так як програма бере її в якості відправної точки. Далі система налаштовує пропорційний коефіцієнт до тих пір, поки час, за який система досягає 0-ї похибки не стає найменшим. Як правило коефіцієнт виставляється таким чином, щоб було легке перерегулювання системи, що надалі можна буде виправити іншими коефіцієнтами. У цей час основну роботу виконує блок обрахунку коефіцієнтів, так як він аналізує показання гіроскопу та робить висновки, збільшити, чи зменшити коефіцієнт. Коли система помічає рівномірні мінімальні зміни кута (задаються програмно), що передає гіроскоп, програма очікує команди для переходу до налаштування диференційної складової.

Далі, програма поступово збільшує диференційну складову до тих пір, поки час стабілізації системи не почне збільшуватися. Це означатиме, що диференційний коефіцієнт став з великим і його значення буде повернуто у те, при якому час стабілізації був найменшим.

Останнім налаштовується інтегральна складова, що відповідає за статичну похибку. Наразі, алгоритм налаштування останнього коефіцієнта є не реалізованим.

Додавши у створену систему блок, що відповідає за налаштування значень помилки, в залежності від зовнішніх параметрів (освітленість, кількість датчиків та інше) можна створити цілком автономну систему налаштування

ПІД регулятора. Система повинна відстежувати початкові показання системи в момент запуску та порівнювати їх з вже записаними у пам'яті контролеру. Якщо значення відрізняються, наприклад, показання всіх датчиків стали більшими, то система підлаштовує обраховані значення помилки та адаптує їх під нові значення датчиків.

Алгоритм роботи програми показаний на рис. 3.8.

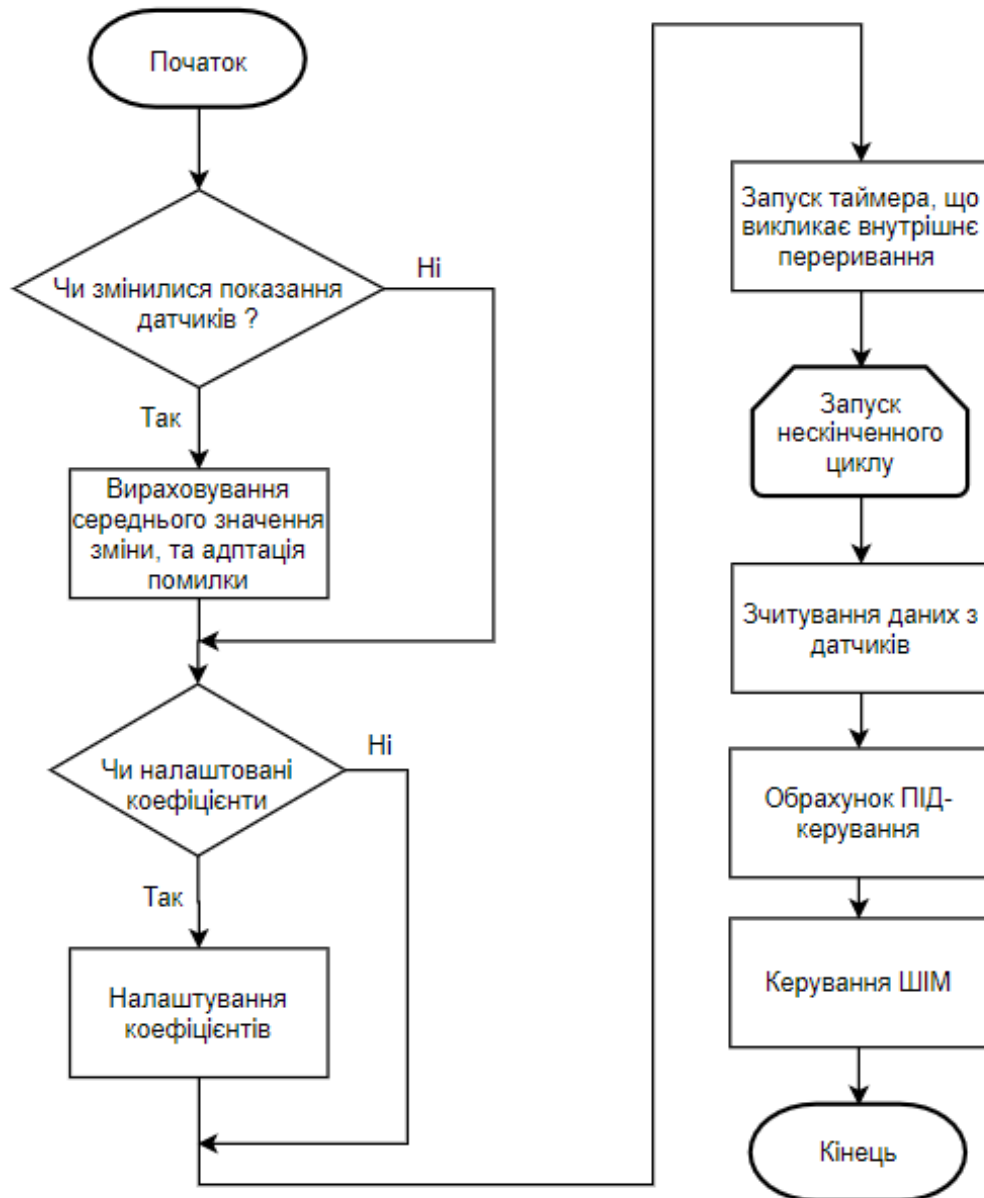


Рис 3.8. Алгоритм основної програми

Усі процеси обрахунків у програмі налаштовані на рівні проміжки часу за допомогою налаштування внутрішніх переривань. Таким чином у розрахунках

ми можемо оцінити пройдений час, наприклад, з моменту початку регулювання системи, до її повної стабілізації.

### **3.3.1 Алгоритм для формування керуючого сигналу**

У якості керуючого сигналу у системі використовується ШІМ сигнал. Тому, програма повинна змінювати значення скважності ШІМ сигналу на моторах в залежності від значення помилки та значення, обчисленого ПІД-регулятором. Варто зазначити, що в якості ШІМ сигналу ми не можемо задавати від'ємні значення. Таким чином, для вибору режиму (сповільнення, або пришвидшення) мотора варто використовувати знак похибки. Алгоритм формування керуючого сигналу показний на рис. 3.9.



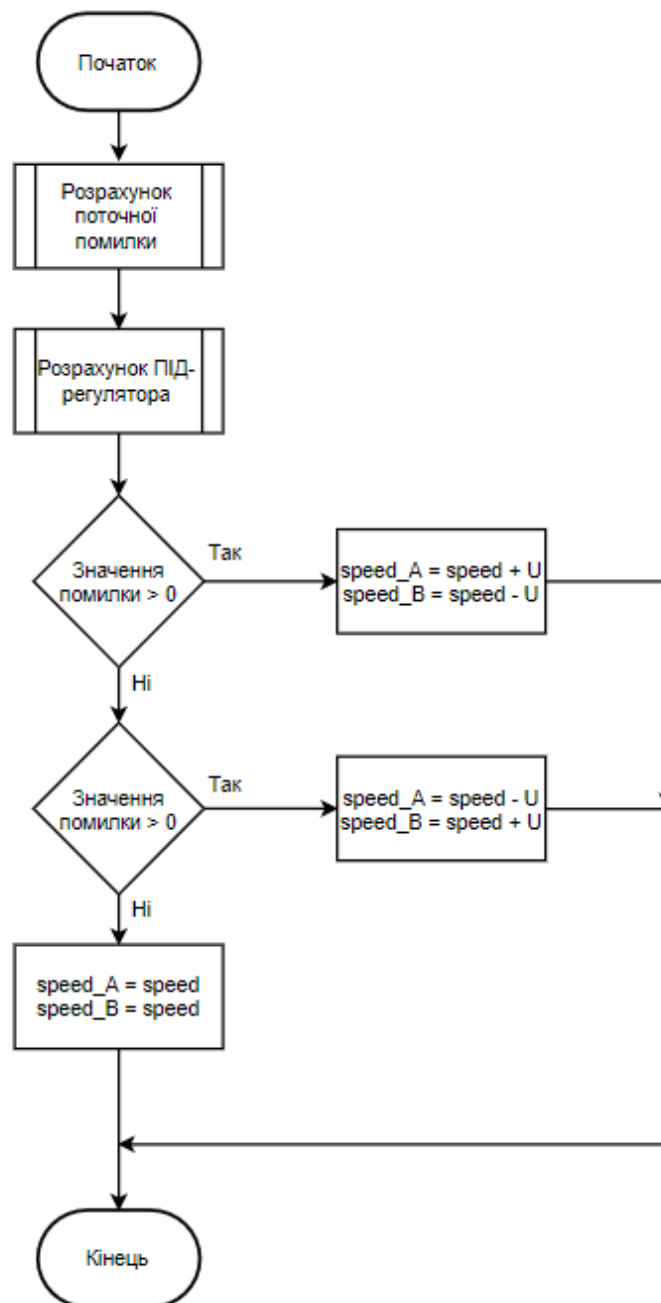


Рис 3.9. Алгоритм формування керуючого сигналу

### 3.3.2 Алгоритм обробки даних зворотного зв'язку

Алгоритм програми, що виконується під час внутрішнього переривання від таймеру показаний на рис. 3.10. Загалом, даний алгоритм є головним у всій програмі, адже саме у ньому відбувається налаштування коефіцієнтів. У реалізованому прикладі використовується найпростіша методика налаштування параметрів (збільшення або зменшення параметрів системи на задану константу), але можна запрограмувати будь-який метод знаходження коефіцієнтів.

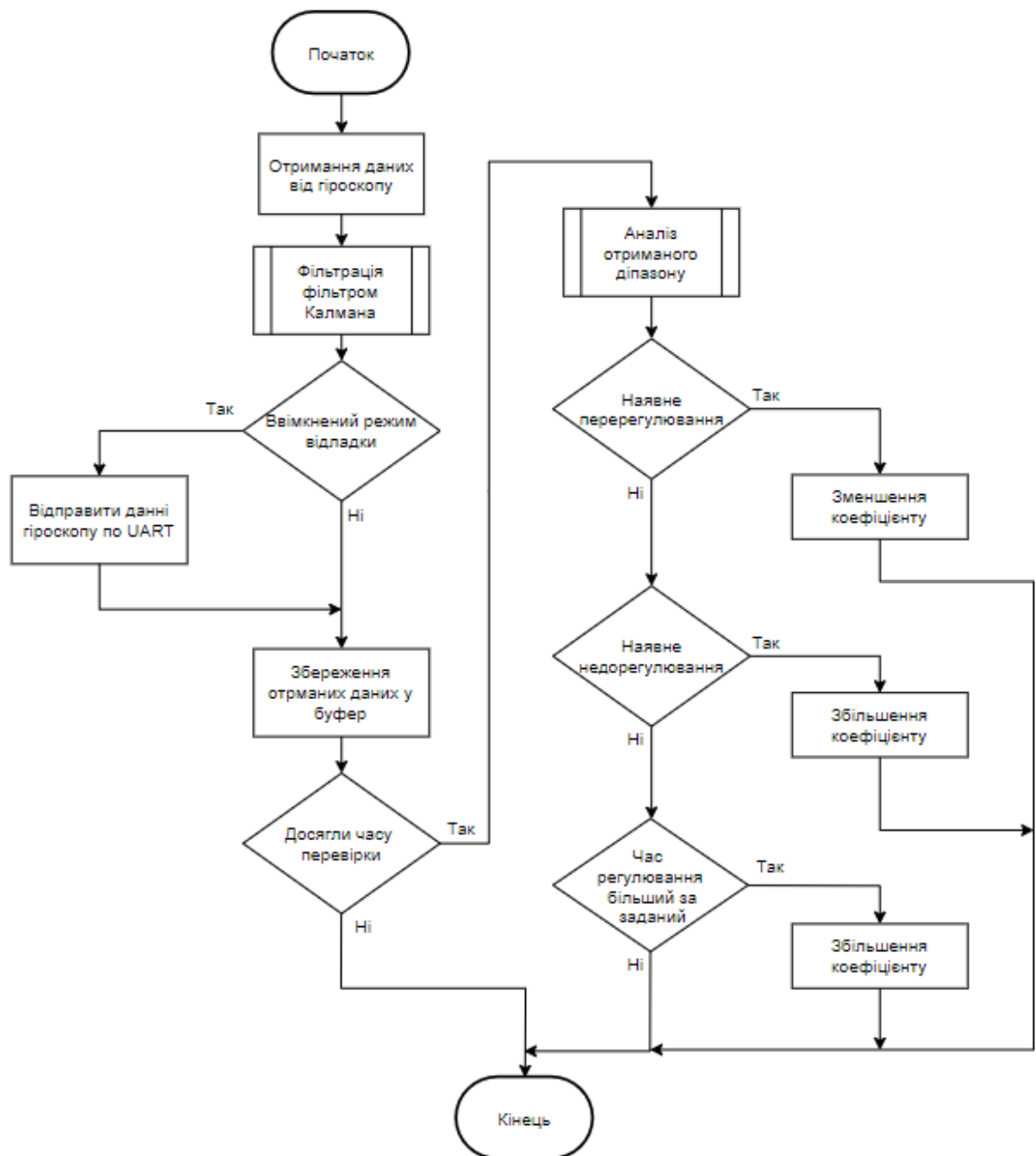


Рис 3.10. Алгоритм обробки зворотного зв'язку

Перш за все, дані отримані з контрольного сенсору – гіроскопу, фільтруються задля забезпечення більш стабільного сигналу та фільтрації шумів. У даному прикладі використовується фільтр Калмана, оскільки, при роботі, на гіроскоп можуть вливати різні зовнішні фактори, такі як удари, або вібрації. Фільтр Калмана - це алгоритм, що аналізує послідовності вимірювань протягом часу, які містять шум, й видає результат, що є точнішим за базовий. У фільтрі Калмана є можливість задати апріорну інформацію про характер системи, зв'язку змінних і на підставі цього будувати більш точну оцінку.

Другим етапом є накопичення отриманих даних у буфері до того моменту, поки не пройде час регулювання. Час регулювання задається під час налаштування базових параметрів. Час регулювання – це час, який повинен пройти між підналаштуванням коефіцієнтів. Цей параметр необхідно вибирати виходячи із самої системи, так як дуже малий час не дасть набратися достатній кількості даних для подальшої оцінки, що може привести до неправдивих результатів. Наприклад, щоб побачити динаміку системи з заданими параметрами, необхідно, щоб ПІД-регулятор зробив декілька коливань. Якщо зробити висновок лише на тому, функція пішла вгору, чи вниз, можна отримати невірні висновки про подальше налаштування коефіцієнтів. Якщо ж зробити час регулювання дуже великим, то система буде налаштовуватися занадто довго.

У ситуації у якій система досягла часу регулювання, отриманий масив даних передається у функцію, що аналізує отримані значення функції. Дані значення розбиваються на десять піддіапазонів (рис. 3.11), та у кожного діапазону обирається локальний мінімум на локальний максимум. Далі аналізується зміна локальних мінімумів та максимумів, а також різниця між ними, що дає змогу оцінити поточний стан системи та зробити висновки щодо коефіцієнтів.

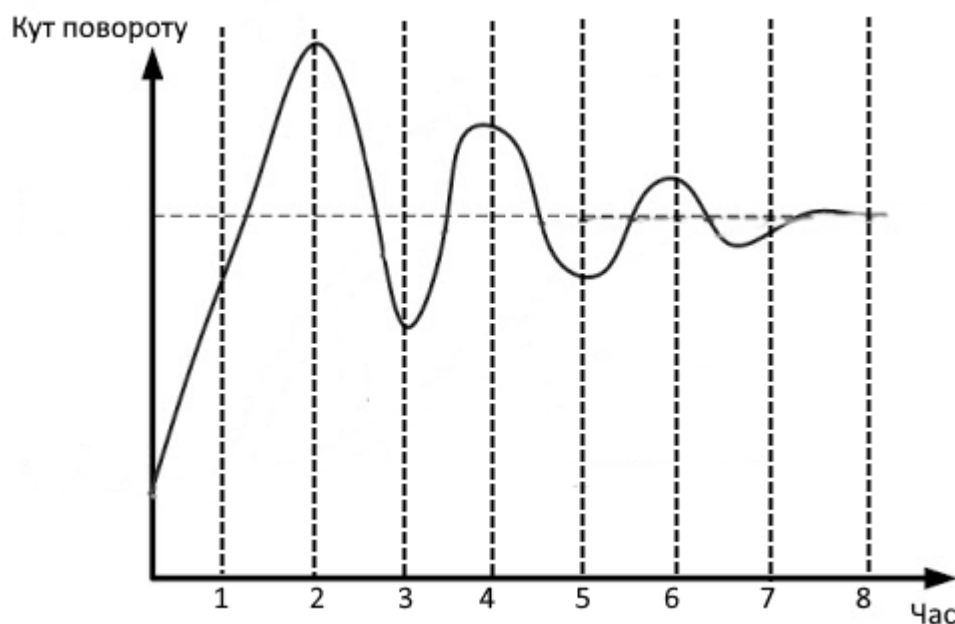


Рис 3.11. Візуалізація оцінки поточного стану системи

Таким чином, якщо помічається постійна зміна максимумів і мінімумів і при цьому різниця між ними зростає, то можна зробити висновок, що система знаходиться у стані перерегулювання. Якщо різниця між екстремумами зменшується, то в такому випадку вважаємо, що коефіцієнти підібрані вірно і очікуємо повної стабілізації системи.

Як тільки отримуємо результат, що система стабілізувалася, порівнюється час, котрий пройшов з моменту запуску процесу налаштування до моменту стабілізації, та порівнюємо його з тим, що був заданий при базовому налаштуванні. Якщо час стабілізації більший ніж заданий, то програма збільшує коефіцієнти та запускає процес налаштування спочатку.

### **3.3.3. Алгоритм отримання даних від користувача**

Однією з найважливіших речей є введення початкових даних системи, адже саме по ним буде орієнтуватися система при підборі коефіцієнтів. Наразі у програмі присутні такі налаштування:

- кількість датчиків;
  - вагові коефіцієнти кожного датчика;
  - максимальне та мінімальне значення, що видають датчики;
  - бажаний час регулювання системи;
  - максимальне значення відхилення від нульової похибки, у якому система вважається регульованою;
  - максимальна швидкість моторів (коефіцієнт заповнення ШІМ сигналу);
- Весь алгоритм відображено на рис. 3.12.

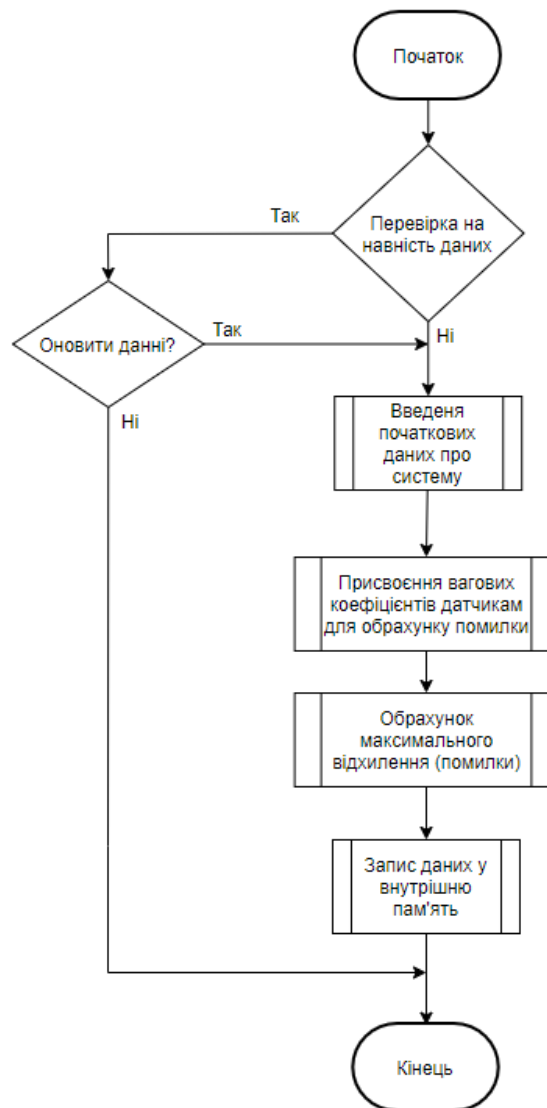


Рис 3.12. Алгоритм вводу початкових даних системи

На початку програми перевіряється, чи являється система наразі відрегульованою, іншими словами можна сказати, що це перевірка на перший запуск. Так, чи інакше, користувач може обрати, чи потрібно налаштувати систему заново. Далі користувач вводить початкові дані системи, що враховуються при налаштуванні або адаптації системи.

Один з етапів введення базових параметрів – розподілення вагових коефіцієнтів сенсорів. Помилка, що обраховується контролером на основі сенсорів, являє собою алгебраїчну суму значень кожного сенсора помноженого на його ваговий коефіцієнт. Таким чином, система обраховує максимальне відхилення системи від нульового положення.

### **Висновки до третього розділу**

У третьому розділі були розроблені алгоритми керування системою. Загалом, програма має декілька головних алгоритмів: введення даних, обробка сигналу зворотного зв'язку, формування керуючого зв'язку. Самі алгоритми можна наповнювати функціями в залежності від потреб користувача. Таким чином можна обрати зручну модель ПД-регулятора, обрахунку коефіцієнтів, обравши один з класичних методів підбору та ін.

Слід зазначити, що сам алгоритм підбору коефіцієнтів, на даному етапі схожий на нейронну мережу навчанням по градієнтному спуску, так як кожен раз, як алгоритм знаходить рішення, що не задовольняє початковій умові, виникає переналаштування коефіцієнтів ПД-регулятора. У нейронній мережі таким же чином проходить перерозподілення ваг вхідних умов.

## **4. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ**

### **4.1 Розробка загальної структурної схеми роботизованої системи, що використовує адаптивний ПІД-регулятор**

Система побудована на базі контролера STM32F405RGT6[9]. Датчики відстані побудовані на ІЧ світлодіодах SFH4545, та ІЧ фотодіодах TEFT4300, та являють собою звичайну оптопару. Кожною оптопарою можна керувати окремо, вмикаючи і вимикаючи її через транзисторний ключ, що дало змогу провести дослідження при різній кількості датчиків, не змінюючи друковану плату.

Виведення інформації зі стенду реалізовано трьома способами:

- UART інтерфейс[11] – дозволяє передавати дані на комп'ютер та будувати графіки у режимі реального часу для проведення досліджень. Також, через нього можна встановлювати різноманітні налаштування;

- LCD дисплей SSD1306[12] – має свій власний контролер, так керується через інтерфейс I<sup>2</sup>C[13]. На нього виводиться поточний стан системи, ПІД коефіцієнти, котрі налаштувала система, інформація про заряд акумулятора та інше. Також, за допомогою кнопок, через дисплей можна налаштовувати різноманітні базові параметри системи, вмикати та вимикати датчики, змінювати максимальну швидкість та інше;

- bluetooth модуль HC-05 – дозволяє отримувати дані на смартфон по протоколу Bluetooth[14]. Наразі, розроблений додаток, що дозволяє зчитувати усі параметри системи ті відображати на смартфоні.

Для можливості додання функції адаптивного налаштування ПІД коефіцієнтів, до системи був доданий гіроскоп та акселерометр MPU6500, що виконує роль зворотного зв'язку системи. Сенсор має два інтерфейси для взаємодії: SPI та I<sup>2</sup>C. Для більш швидкого опитування гіроскопу було прийнято рішення використовувати SPI інтерфейс[15].

Джерело живлення схеми використовує декілька імпульсних стабілізаторів напруги на 5В, та на 3.3В для забезпечення стабільної напруги на ключові елементи схеми. Це дуже важливо, тому що при керуванні великим навантаженням, в нашому випадку, моторами постійного струму, просідання напруги може суттєво вплинути на роботу контрольного сенсору, датчиків та самого контролера.

Структурна схема роботизованої системи показана на рис. 4.1.

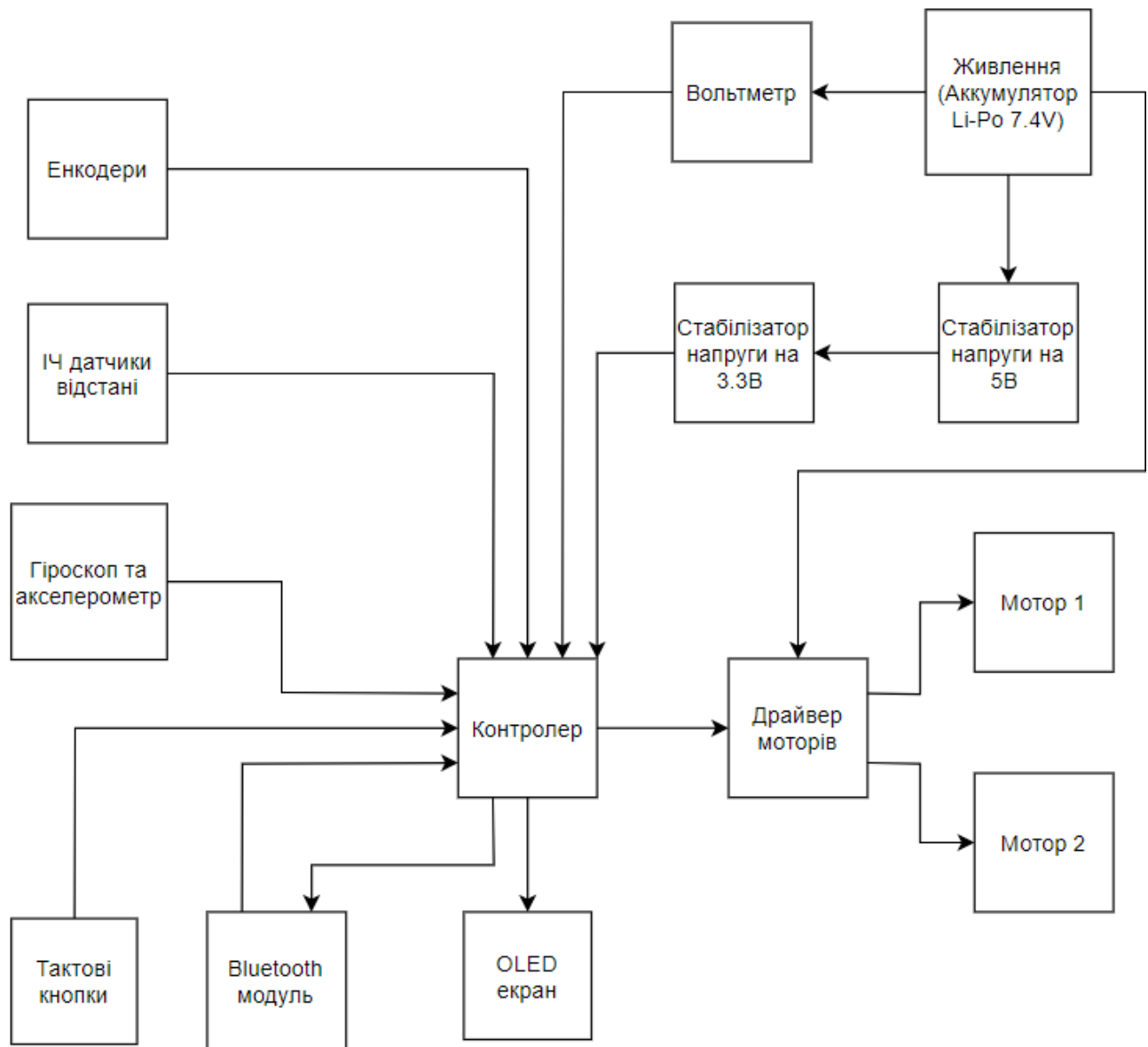


Рис 4.1. Структурна схема роботизованої системи



## 4.3 Розробка загальної схеми електричної принципової

### 4.3.1 Розробка стабільного джерела струму

При проектуванні силової частини схеми, перш за все було вирішено питання отримання стабільного та потужного джерела струму для роботизованої системи (рис. 4.2). Стабілізатор на 5В побудований на мікросхемі LMZ21701, що являється імпульсним стабілізатором напруги з максимальним вихідним током 5А. Також, напруга з акумулятору фільтрується через котушку індуктивності задля забезпечення стабільної напруги на вході стабілізатору та на порту мікроконтролера, що використовується у якості вольтметра, реалізованого через дільник напруги.

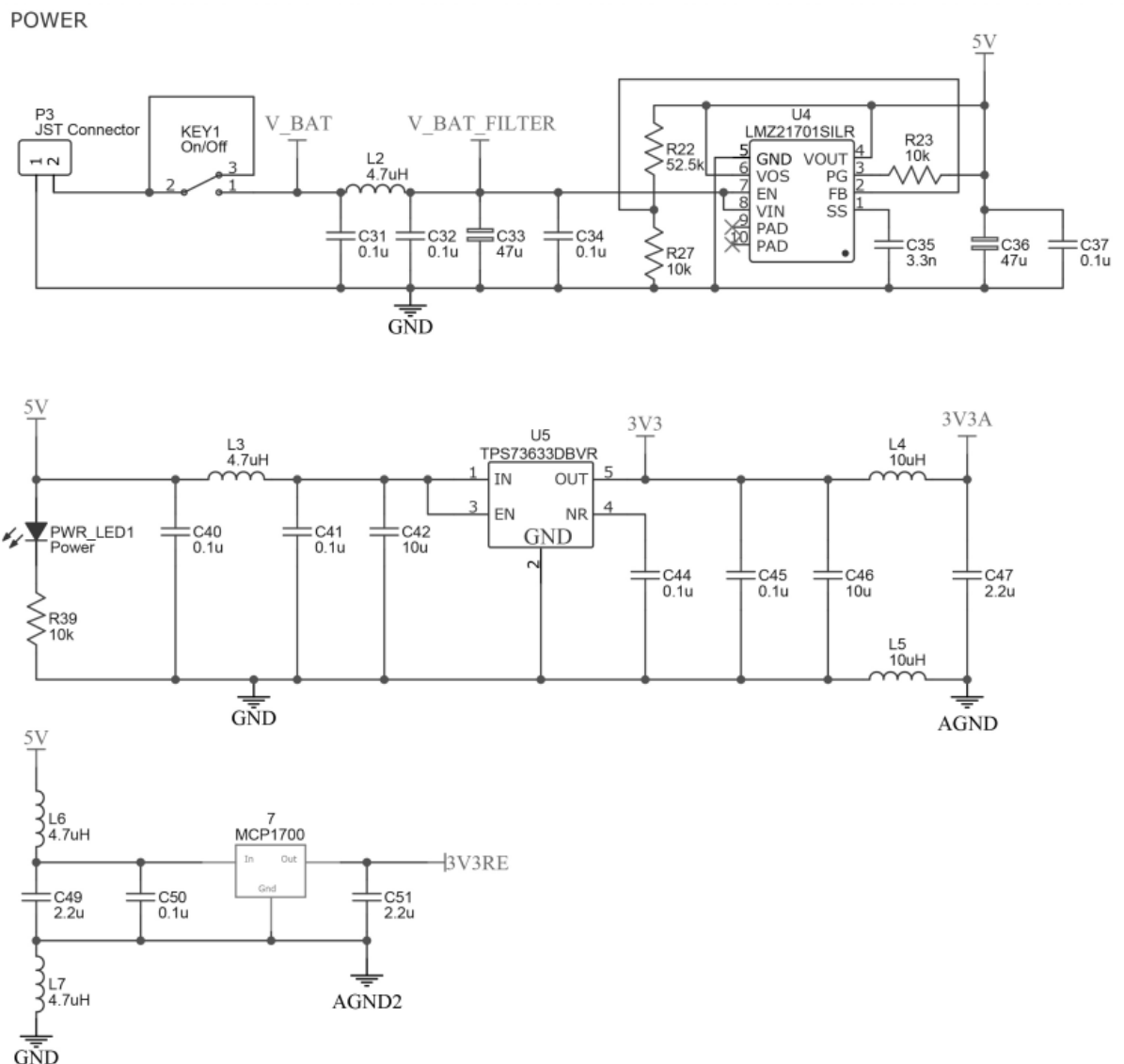


Рис. 4.2 Стабілізатори напруги, що використовуються у системі

Після стабілізатора напруги на 5В присутні два стабілізатори напруги на 3.3В. Перший живить усі компоненти схеми та має два виходи: аналогові та цифрові 3.3В для живлення різних компонентів схеми.

У системах зі змішаними сигналами з великим числом цифрових схем дуже бажано фізично відокремити чутливі аналогові компоненти від шумлящих цифрових компонентів. Також піде на користь використання роздільних заземлюючих поверхонь для аналогових і цифрових схем. Ці поверхні не повинні перекриватися для того, щоб зменшити ємнісний зв'язок між ними. Роздільні аналогова і цифрова заземлюючі поверхні продовжуються на об'єднуючій платі з використанням або заземлюючої поверхні плати, або "екрануючого заземлення", яке виконується за допомогою проводів заземлення, що чергуються в роз'ємі з сигнальними проводами.

Другий стабілізатор живить ІЧ датчики відстані, так як кожен датчик споживає 100мА, що впливає на стабільність роботи системи при використанні одного стабілізатора. Окрім цього, при використанні окремого стабілізатора напруги для датчиків підвищується стабільність роботи самих сенсорів відстані.

Окреме аналогове живлення живить аналогову частину мікроконтролеру (АЦП, ЦАП, опорна напруга та ін.), а також схему підключення гіроскопу, що являється аналоговим датчиком, що керується по SPI інтерфейсу (рис. 4.3)[16].

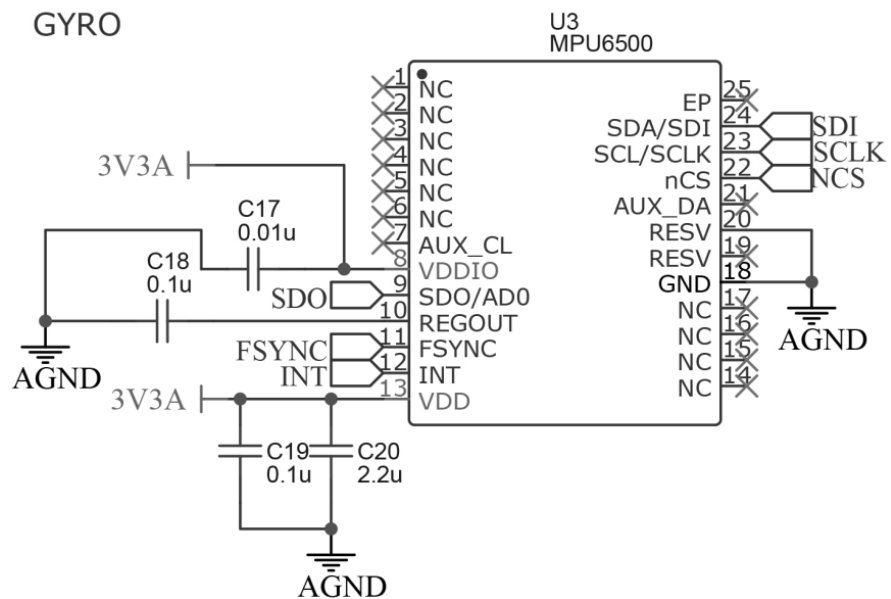


Рис 4.3. Підключення контрольного сенсору

#### 4.3.2 Проектування ІЧ датчиків відстані

Датчики відстані побудовані на ІЧ світлодіодах SFH4545, та ІЧ фотодіодах TEFT4300, та являють собою звичайну оптопару[17]. Кожною оптопарою можна керувати окремо, вмикаючи і вимикаючи її через транзисторний ключ, побудований на транзисторі BSS138, що дало змогу провести дослідження при різній кількості датчиків, не змінюючи друковану плату. Схему приймачів ІЧ випромінювання наведено на рис. 4.4.

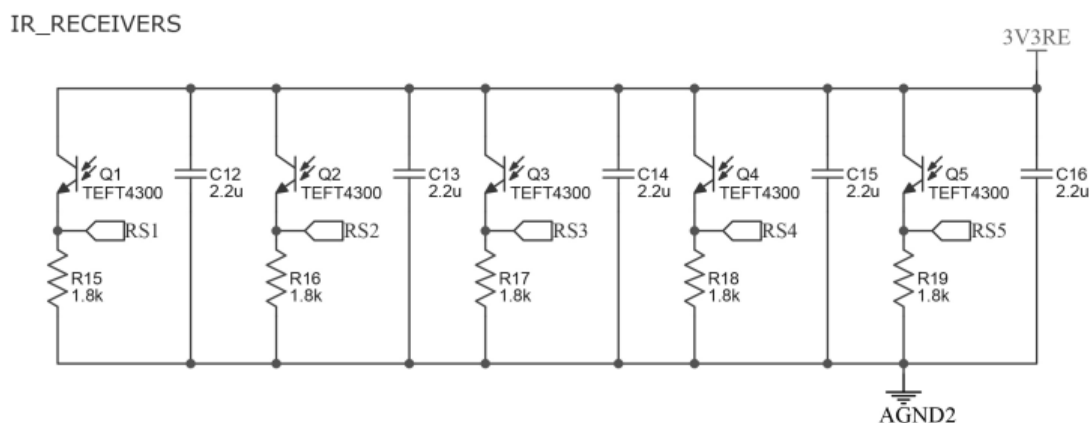


Рис 4.4. Приймачі ІЧ випромінювання

Схему ІЧ випромінювачей наведено на рис. 4.5.

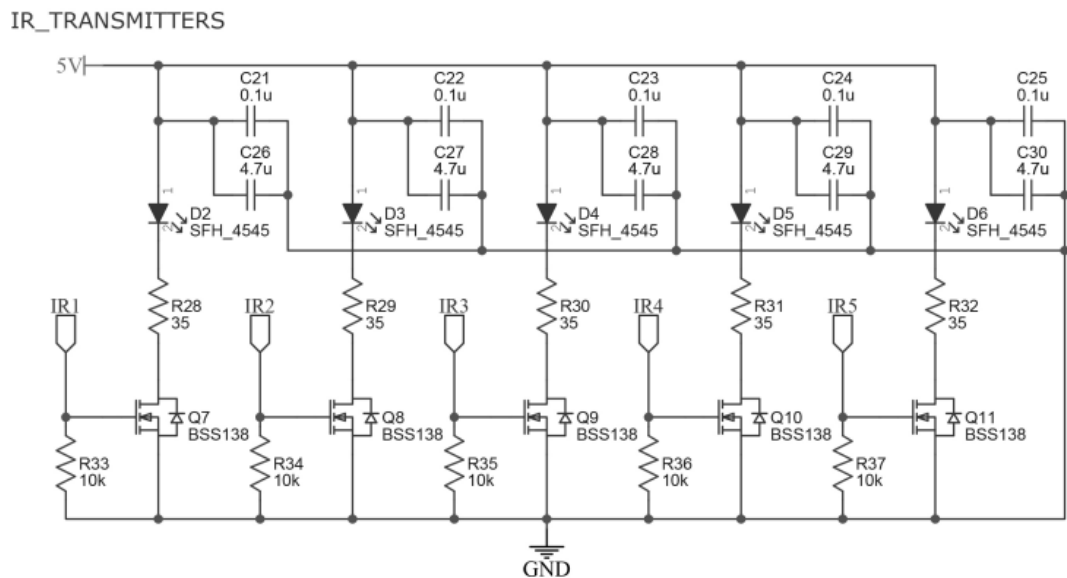


Рис 4.5. Випромінювачі ІЧ випромінювання

Також, керування кожною оптопарою окремо, дає змогу отримати більш «чисті» значення з датчиків, так як сусідні датчики не впливають один на одного. Графік сумісної та роботи датчиків відображено на рис. 4.6.

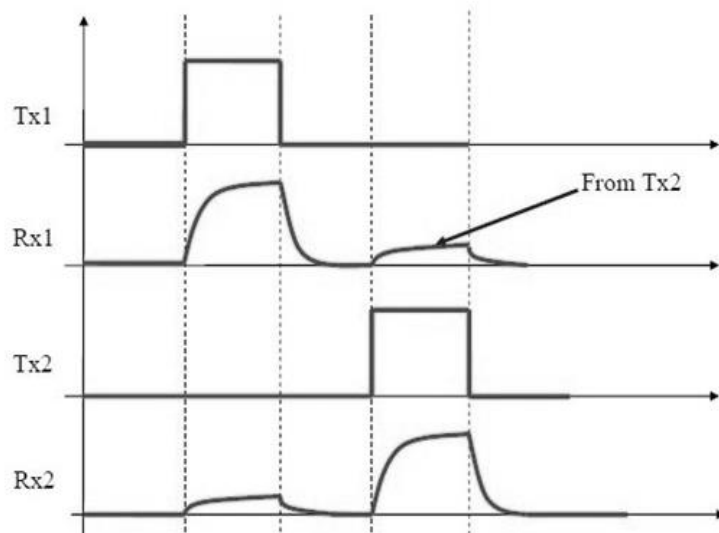


Рис 4.6. Вплив сусіднього датчика

На виході кожного датчика відстані отримуємо напругу, що обернено пропорційна відстані до об'єкта. Виходи кожного датчика підключені до портів контролера, що підтримують АЦП[19].

В STM32F405RGT6 вбудований АЦП має наступні параметри[20]:

- напруга живлення та зчитування від 1.8 В до 3.6В;
- розрядність 6, 8, 10 або 12біт;
- незалежних АЦП;
- наявність регулярного і інжектованого каналів;
- декілька режимів одночасної роботи;
- можливість роботи з прямим доступом до пам'яті.

Налаштування АЦП для роботи системи відбуватиметься наступним чином. Робота буде з 12-ти бітним АЦП, так як точність даних буде найвища[23]. Опитування АЦП буде постійним із подальшим записом до регістру. Вирівнювання бітів відбувається по правому краю. Обираємо роботу з регулярним каналом, так як зчитування буде тільки одного роду даних. Для роботи обирається один АЦП і використовується два канали. Наступним кроком є обробка цифрового сигналу, що поступає до пам'яті. За формулою:

$$ADC_{vol} = \frac{ADC_{val} \cdot ADC_{max}}{ADC_{12bit}}, \quad (4.1)$$

де  $ADC_{vol}$  - конвертоване значення напруги у вольтах;  $ADC_{val}$  - значення отримане з АЦП;  $ADC_{max}$  - максимальне значення напруги АЦП;  $ADC_{12bit}$  - значення дискретизації АЦП (в нашому випадку АЦП має 12-ти бітну розрядність, що дорівнює 4096).

Отримані дані необхідно запам'ятати та вивести на екран аби можна було порівняти з еталонними значеннями, які були задані.

Для запису и зчитування даних використовується прямий доступ до пам'яті, або DMA (Direct Memory Access), з якого легко можна зчитати дані та передати їх з допомогою шини I<sup>2</sup>C до екрану[24].

### 4.3.3 Проектування схеми керування моторами

Швидкість обертів моторів керується за допомогою ШІМ сигналу. Для того, щоб керувати достатньо великим навантаженням у вигляді моторів постійного струму треба використовувати схему Н-мосту. У даному проекті

використовується драйвер мотору L298P. Схема підключення моторів наведена на рис. 4.7.

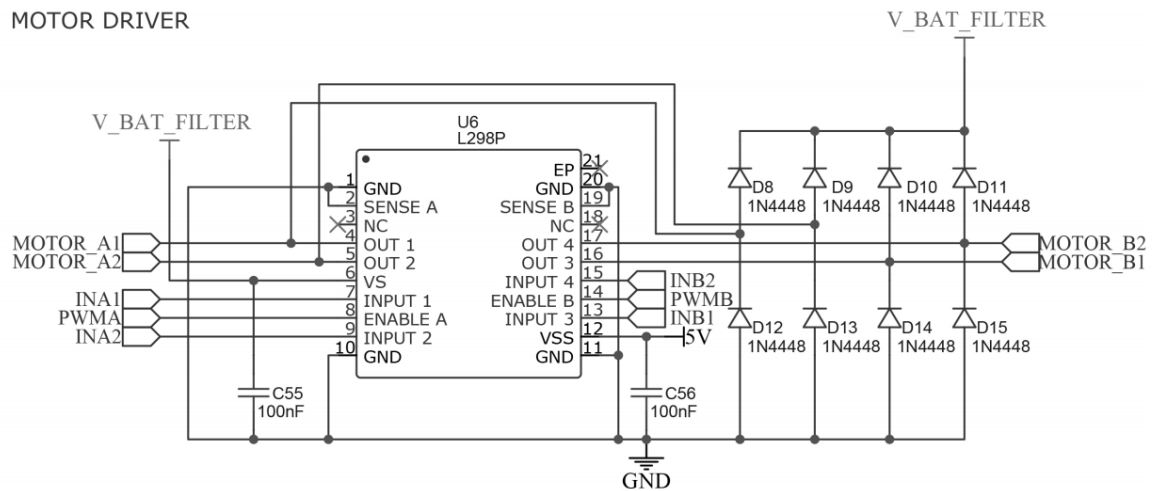


Рис 4.7. Схема підключення драйверу моторів

#### 4.3.4 Проектування схеми вводу та виводу інформації

Для ведення або виведення інформації можна використовувати один з трьох доступних способів.

У саму систему вбудований OLED екран, що керується по інтерфейсу I<sup>2</sup>C (рис. 4.8). Також, поруч з ним наявні три тактові кнопки, через які можна вводити інформацію.

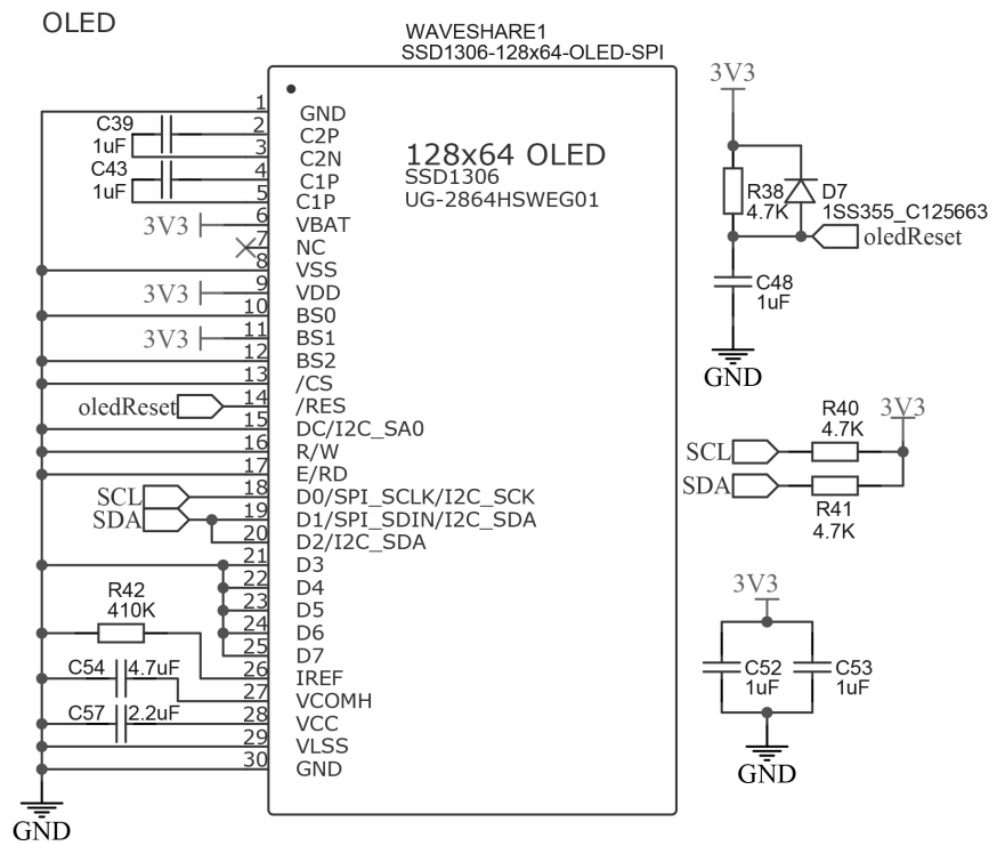


Рис 4.8. Схема підключення OLED екрану

Через екран можна налаштовувати базові параметри системи та отримувати інформацію про поточний стан коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Також у системі є можливість слідкувати за її станом через UART інтерфейс, або по протоколу Bluetooth (рис. 4.9).

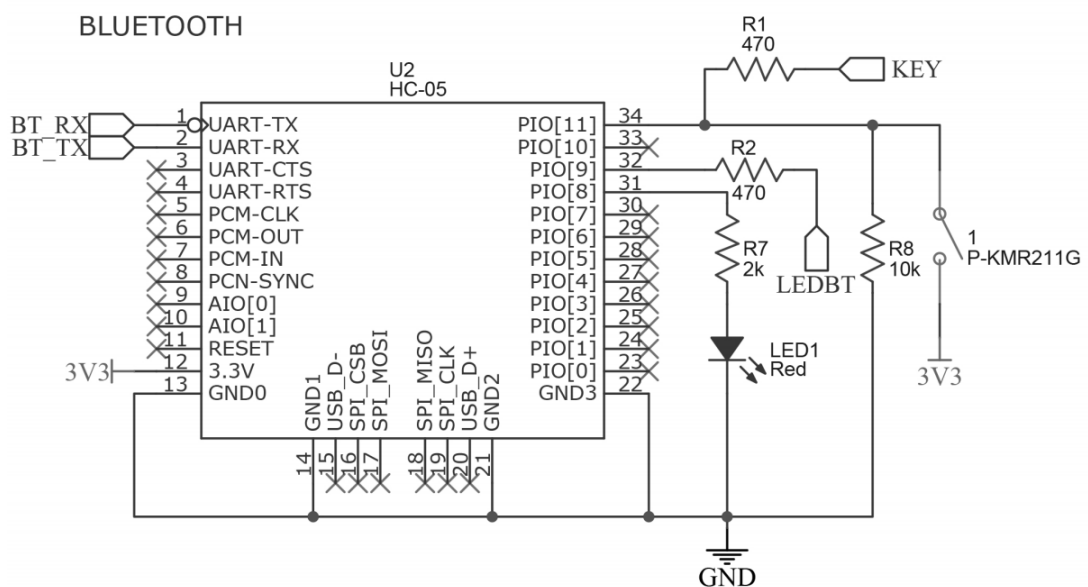


Рис 4.9. Підключення Bluetooth модулю

#### 4.4 Макет практичної роботи

По схемі електричній принциповій було розроблено друковану плату та стенд для проведення експериментів, що показаний на рис. 4.10.

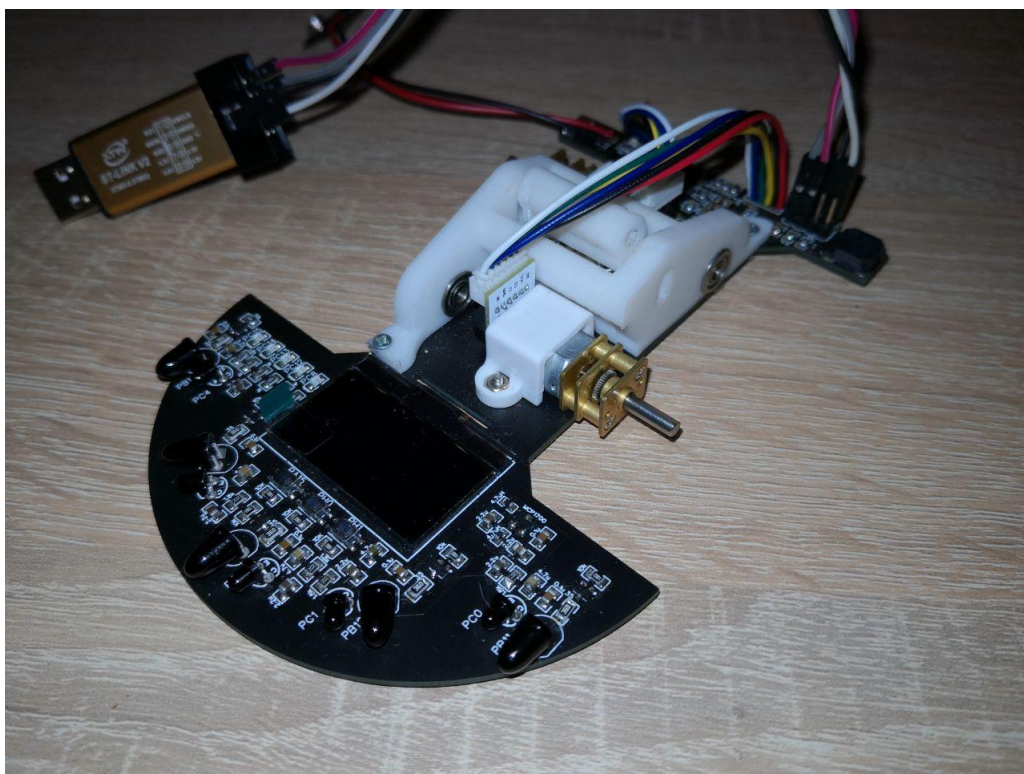


Рис 4.10 Стенд для проведення експериментів

#### Висновки до четвертого розділу

При розробці схеми електричної принципової та друкованої плати в першу чергу було зроблено акцент на стабільність та завадостійкість пристрою. Було відокремлено цифрове та аналогове живлення пристроїв, що дало змогу отримувати більш точні дані від контрольних сенсорів, що являються аналоговими пристроями. Отриманий пристрій дуже добре підходить в якості стенду для досліджень різних процесів, що виникають у системі, так як має змогу використовувати декілька способів введення та виведення інформації, може налаштовуватися під різні задачі (змінювати кількість працюючих датчиків) та проводити різноманітні тести, не змінюючи самої конструкції.



Таким чином, отримана система дозволила дослідити можливості адаптивного ПД-регулятора та провести досліди при різних вхідних даних. Також, слід відзначити, що даний стенд можна використовувати для навчання студентів при роботі з мікроконтролерами сімейства ARM, так як він має все необхідне для цього.

## **5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ**

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

### **5.1 Етапи розроблення стартап-проекту**

#### ***1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту***

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

## **2. Організація стартап-проекту**

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

## **3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту**

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

## **4. Заходи з комерціалізації проекту**

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.
- Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту. [25]

## 5.2 Опис ідеї проекту

Перед початком розробки проекту стартапу необхідно визначити сферу в якій буде поширений готовий продукт та яку вигоду для користувача він буде нести. В табл. 5.1 наведені основні ідеї стартап-проекту.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап - проекту		
<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Зміст ідеї: Створення адаптивного ПД-регулятора для роботизованих систем	1. Промислова робототехніка	1. Швидке налаштування системи, що розробляється
	2. Розважальна робототехніка	2. Відображення реальних показань зі зворотних зв'язків
	3) Безпілотний транспорт	3. Можливість налаштувати більшість початкових параметрів системи через зручний інтерфейс
	4) Учбова робототехніка	4. Використання одного пристрою для регулювання на різних роботизованих системах
		5. Можливість розмістити систему на великій кількості різноманітних роботизованих систем

Для оцінки потенціалу стартап-проекту та його успішності на ринку, необхідно провести аналіз сильних, нейтральних та слабких сторін проекту у порівнянні із конкурентами. Необхідний аналіз характеристик проведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту					
<i>№ п/</i>	<i>Техніко-економічні</i>	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>	<i>W (слабк</i>	<i>N (нейтр</i>	<i>S (сил</i>

<i>n</i>	<i>характеристик и ідеї</i>	<i>Мій проект</i>	<i>Конкуре нт1</i>	<i>Конкур ент2</i>	<i>Конку- рент3</i>	<i>а сторо на)</i>	<i>альна сторо на)</i>	<i>ьна сто рона )</i>
1.	Зміна параметрів системи автоматично	Автоматичне налаштування ПД коефіцієнтів зі зворотнім зв'язком усієї системи	Адаптивне налаштування коефіцієнтів на основі нейромережі	Можливість задання параметрів вручну	Можливість задання параметрів вручну			+
2.	Регулювання сигналу керування	Можливість встановлення свого закону регулювання	Можливість редагування заданого сигналу	Можливість вибору заданих сигналів	Можливість налаштування вручну параметрів		+	
3.	Відображення даних для користувача	Присутнє	Присутнє	Присутнє	Присутнє		+	
4.	Можливість підлаштувати регулятор під конкретну систему	Присутнє	Не має	Не має	Не має			+

### 5.2.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Необхідно провести аудит технологічної частини проекту для отримання більш точної оцінки важливості стартап-проекту. Аналіз проведено у табл. 5.3

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступніс ть технологій</i>
1	Проведення аналізу	Розробка,		

	ринку готових приладів для їх удосконалення	дослідження, програмування;	Наявна	Доступна
2	Надання можливості адаптивного налаштування ПІД коефіцієнтів на основі зворотного зв'язку системи	Створення програмного забезпечення для адаптивного ПІД-регулювання	Не наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: самостійна розробка на основі дослідження				

Із табл. 5.3 можна зробити висновок, що реалізувати систему керування можна за допомогою існуючих технологій та систем, проте з іншою частиною необхідні додаткові дослідження та розробка.

### 5.2.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В табл. 5.4 приведена характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 5.4.  
Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2500
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутність масового виробника
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	50

На сьогоднішній день, ринок систем, що виробляють адаптивні ПД-регулятори активно прогресує. Не існує виробників монополістів, що завоювали увесь ринок. При запуску виробництва рентабельність проекту для даної галузі складатиме 50%.

В табл. 5.5 наведено характеристику потенційних клієнтів стартап-проекту та загальну цільову аудиторію на яку буде орієнтована розробка та виробництво стартап-проекту.

Таблиця 5.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
Швидкість налаштувань систем, що використовують ПД-регулятори; Можливість до швидкої базових параметрів системи;	Промислова робототехніка; Сфера обслуговування, що використовує роботів; Розробники роботів; Навчальна робототехніка;	Експлуатація як у динаміці так і у статичі, в різних, як складних, так і у умовах спокою; Врахування різних параметрів зворотного зв'язку для отримання якісних значень.	- до продукції: Точність; Надійність; Дешевизна; Якість; Швидкість. - до компанії-постачальника: Точність;

Цільовою аудиторією для використання системи керування є виробники промислових роботів та роботів у сферах послуг (роботи-офіціанти, тощо). Також даний проект буде цікавий іншим стартапам, що працюють у сфері робототехніки, так як даний стартап дає змогу швидко налаштовувати і налагоджувати нові роботизовані системи. Щоб проект продавався на ринку основним критерієм є: точність та дешевизна. В табл. 5.6 наведені різні фактори загроз, що можуть повпливати на процес реалізації проекту.

Таблиця 5.6.

Фактори загроз			
<i>№ n/ n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Вартість виробництва	Складність випробовування якості роботи системи. Необхідний підбір персоналу для створення системи керування.	Запустити виробництво оптом для здешевлення вартості. Найм кваліфікованих працівників.
2	Конкуренція		
3	Можливість програмування та розрахунку системи		

Основною загрозою реалізації стартапу є складність опису основного алгоритму програми та оцінки всіх можливих видів роботів, датчиків та інших базових параметрів системи для подальшого адаптивного налаштування системи. Таким чином, варто розраховувати одразу, що для даної системи необхідно буде постійний супровід та оновлення, а також треба бути готовими до налаштування алгоритмів під конкретні види роботів та систем, які використовує виробник.

Отже, для успішного розвитку стартапу необхідно найняти одразу багато персоналу, що буде працювати над доданням нових систем, що підтримуються.

В табл. 5.7 наведено фактори можливостей стартап-проекту.

Таблиця 5.7.

Фактори можливостей			
<i>№ n/ n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Достовірність і надійність	Переваги налаштування системи під різні режими роботи користувачем, та подальше зберігання параметрів.	Зроблений упор на маркетинг та рекламу у цих напрямках для рекомендації себе, як компанії, на ринку;
2	Адаптивність		



Оскільки розроблення стартап-проекту буде використовувати можливості мікроконтролеру прилад буде достатньо точним та швидким у реакції під час циклу зварювання. Необхідно зробити акцент на рекламі та інформуванні щодо переваг даного стартапу.

В табл. 5.8 наведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку та фактори що можуть по впливати на діяльність підприємства.

Таблиця 5.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: чиста	В кого краще - в того купують	Покращення товару та сфери обслуговування
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальна	Належить до промислового ринку збуту;	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Притаманна різним галузям застосування;	Розширення функціоналу та галузей застосування
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова та товарно-видова	Належить до аналізаторів стану людини	Розширення функціоналу пристрою
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше; Чим краще – тим рентабельніше;	Покращення цінової політики та якості товару
6. За інтенсивністю: не марочна	Не жорстка конкуренція	Агресивні та не агресивні форми піару

Конкуренція на продаж запропонованого стартапу в Україні не є великою, вартість готового товару можна виставляти більшою за вартість конкурентів, так як запропонований стартап має більшу точність та переваги у налаштуванні.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та

слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.9).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

В табл. 5.9 наведено аналіз стартапу за чотирма основними чинниками: сильною стороною, слабкою стороною, можливостями та загрозами. Такий аналіз називається SWOT-аналіз.

Таблиця 5.9.

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Можливість задання закону налаштування коефіцієнтів; Можливість враховувати та аналізувати стан системи так, ніби це робить людина без її участі;	Слабкі сторони: Адаптивні ПІД-регулятори менш точні, ніж регулятори, що налаштовані вручну; Велика варіативність роботизованих систем робить складним процес прорахування всіх можливих варіантів систем.
Можливості: Зміна параметрів системи ; Надійність та адаптивність системи;	Загрози: Вартість виробництва ; Конкуренція

### 5.2.3 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

В табл.5.10 наведено визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 5.10.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/	Чи є проект «періопрохідце»	Чи буде компанія шукати нових	Чи буде компанія копіювати	Стратегія конкурентної
---------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------

<i>n</i>	<i>м» на ринку?</i>	<i>споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>поведінки*</i>
----------	---------------------	---	---	-------------------

Продовження таблиці 5.10

1	З погляду наявності системи керування імпульсом для контактного зварювання та його стабілізації під час процесу зварювання	Буде шукати нових розширяючі функціонал і потенціал продукту, а також існуючі клієнти у конкурентів самовільно будуть використовувати більш кращий продукт	Буде збільшувати параметрів для врахування процесу зварювання	Помірна, місцями агресивна
---	--	--	---	----------------------------

Продукт не є новиною на ринку в цілому, проте з точки зору універсальності для використання із машинами контактного зварювання із різними джерелами живлення розробка являє собою повністю унікальний продукт, що може привести увагу існуючих клієнтів, що побажають удосконалити та оновити своє виробництво.

В табл.5.11 наведено ключові переваги концепції потенційного товару.

Таблиця 5.11.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/ n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Виготовлення більш дешевого адаптивного	Швидке налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора для нових	Створення надійного бренду; Постійний розвиток та апгрейд системи та компанії у всіх напрямках;

	ПІД регулятора для роботизованих систем	роботизованих систем; Можливість адаптивного налаштування коефіцієнтів під час безпосередньої роботи сиситеми	Заняття усіх можливих ніш у галузі електронних систем керування для створення монополії; Дотримуватися схеми ціна – якість;
--	---	--	--

В табл.5.12 наведено межі встановленої ціни.

Таблиця 5.12.

Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/ п</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	130-150% від ціни нашого продукту	170-180% від ціни нашого продукту	200000 - 500000 грн зі 100 проданих од.	100/250 у.од.

В табл.5.13 наведено формування системи збуту внаслідок реалізації стартап-проекту.

Таблиця 5.13.

Формування системи збуту

<i>№ п/ п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Задоволення потреб, спрощення деяких функцій розробників промислових та інших робіт	Збут товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Власна
2		Збут та реклама товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Залучена

## Висновки до п'ятого розділу

Згідно проведеного аналізу розроблюваний проект має можливість ринкової комерціалізації. Зростання попиту на аналогічні товари додає масовості придбання подібних приладів, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок, де динаміка ринку доволі сприятлива до розроблюваного проекту.

Проект має високі перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, якими виступають промислова, розважальна, та обслуговуюча робототехніка. Бар'єрами входження на ринок можуть бути відсутності масового виробника, сильний конкурентний тиск з боку великих фірм аналогічних продуктів. Але якщо вести агресивну боротьбу в конкурентному середовищі, проект має великі шанси та можливість зарекомендувати бренд, де в подальшому здобудеться місце на ринковій економіці.

Подальша імплементація проекту є доцільною та рентабельною.

## ВИСНОВКИ

В дипломному проєкті було спроектовано мікропроцесорну систему адаптивного ПІД-регулятора на основі мікроконтролера STM32F405RGT6. Актуальністю даної модернізації є можливість враховувати реакцію самої системи на обрахунки, проведені ПІД-регулятором за допомогою зовнішнього незалежного сенсору, котрий підбирається індивідуально під різні роботизовані системи. Перевагою даної розробки є те, що для налаштування такої системи не потрібно розраховувати заздалегідь параметри регулятора. Достатньо знати базові параметри системи, описані у третьому розділі. Система має зворотні зв'язки для регулювання вихідного сигналу, з метою отримання найбільш точних та актуальних коефіцієнтів ПІД-регулятора. Обрана система має перспективи для подальшого розвитку адаптивних ПІД-регуляторів.

У процесі виконання дипломного проєкту було проведено огляд основних проблем адаптивних ПІД-регуляторів та питань стосовно модернізації та автоматизації системи. Наразі існує декілька алгоритмів роботи адаптивних регуляторів, найперспективнішим з яких є система, що використовує нейронні мережі для налаштування початкових коефіцієнтів та адаптації під час роботи самої установки. При огляді було зроблено висновок, що усі адаптивні регулятори так, чи інакше потребують постійного контролю та правок зі сторони людини.

Також, даний пристрій може буде модернізовано до універсального приладу, що можна підключити до будь-якої роботизованої системи, що початково не використовувала ПІД-регулятор для стабілізації своєї роботи.

Також на основі вже розробленої системи можна додатково додавати параметри, та налаштовувати базові алгоритми підбору коефіцієнтів та керування вихідним сигналом. Іншою перевагою є те, що у пристрої, котрий розроблювався, присутнє налаштування параметрів по бездротовому каналу, що дає змогу керувати роботизованою системою на дистанції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Власов К.П. [Текст]: Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета / Власов К.П.: Навчальний посібник, 2-е видання, 2013, 531с., ISBN 978-966-8324-84-0.
2. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. [Текст]: Основы теории автоматического управления / Лазарева Т.Я.: Навчальний посібник, 2-е видання, вид. Тамб. дер. техн. ун-та, 2004, 352с., ISBN 5-8265-0149-9
3. Hogenauer E.[Текст]: An economical class of digital filters for decimation and interpolation. / Acoustics, Speech, and Signal Processing [see also IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 29, No. 2, 1981. - p. 155 - 162.
4. Huang Y., Yasunobu S.[Текст]: A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control. / The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ IEEE 2000, vol. 2, 2000, p. 969 - 972.
5. Yang Y., Wang W.-G., Yu D.-J., Ding G.. A fuzzy parameters adaptive PID controller design of digital positional servo system. - 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 1, 2002, p.310 - 314.
6. Huang Y., Yasunobu S.[Текст] A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID con'trol. - The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ IEEE 2000, vol. 2, 2000, p. 969 - 972.
7. Pereira , D.S.; Pinto, J.O.P. [Текст] Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control. - Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. 2005, p.801 - 806.

8. M., Yamamoto T., Oki T., Kaneda M. [Текст]: A design of neural-net based predictive PID controllers. - 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 4, 1999, p. 1113 - 1118.
9. Trevor Martin, [Текст]: The Insider`s Guide To The STM32 ARM Based Microcontroller/ Trevor Martin: вид. University Of Warwick Science Park, 2018, 96с, ISBN: 0-9549988-8
10. STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation [Электронный ресурс]: User manual – режим доступа: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00104712-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00104712-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf), вільний
11. UART [Электронный ресурс]: опис основних положень – режим доступа: [http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Универсальный\\_асинхронный\\_приемопередатчик](http://www.ru.wikipedia.org/wiki/Универсальный_асинхронный_приемопередатчик), вільний.
12. I<sup>2</sup>C [Электронный ресурс]: опис основних положень – режим доступа: [https://uk.wikipedia.org/wiki/I<sup>2</sup>C](https://uk.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C), вільний
13. SSD1306 [Электронный ресурс]: Advance Information– режим доступа: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>, вільний
14. SPI [Электронный ресурс]: опис основних положень – режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://ru.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface), вільний
15. Bluetooth Low Energy [Электронный ресурс]: опис основних положень – режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth\\_Low\\_Energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy), вільний
16. MPU-6500 Register Map and Descriptions [Электронный ресурс]: Revision 2.1 – режим доступа: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6500-Register-Map2.pdf>, вільний
17. К.И. Билибин, А.И. Власов и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры – М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2002.



18. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И.Билибин, А.И.Власов, Л.В.Журавлева и др. Под общ. ред. В.А.Шахнова. - М.: Изд-во МГТУ им.Баумана, 2002. - 528 с.
19. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Дэвид М. Харрис, Сара Л. Харрис, изд. Morgan Kaufman, 2003, 1662с
20. STM32F405 [Электронный ресурс]: datasheet – режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>, вільний
21. STM32: эпоха 32-битных микроконтроллеров наступила [Электронный ресурс] - <http://www.compel.ru/lib/ne/2011/2/3-stm32-epoha-32-bitnyih-mikrokontrollerov-nastupila>
22. Technical Reference manual RM0900, ST.- Rev 14, 2017.
23. АЦП в STM32 [Электронный ресурс] - <http://easystm32.ru/for-beginners/18-adc-in-stm32-part-1>
24. STM32 → DMA [Электронный ресурс] – [http://catethysis.ru/stm32\\_dma/](http://catethysis.ru/stm32_dma/)
25. Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології) [Электронный ресурс] <https://infopedia.su/14x1475b.html>

## ABSTRACT

**Urgency of work.** Automatic control systems are used in various industries. Robotic systems controlled by a proportional-integral-differential regulator are now becoming widespread. These are all kinds of unmanned vehicles, aircraft, industrial works, etc. When creating such a system, which is controlled by the controller, there is a need for complex and careful adjustment of the coefficients so that the system works stably. In case of change of external or internal factors, it is necessary to adjust the coefficients of the regulator again, which entails a loss of time and money.

There are robotic systems where the adjustment of the coefficients of the controller in real time is necessary. The work that will receive information from, various kinds of optical devices, depends on the lighting. Also, each system replaces its internal parameters over time due to the aging of electronics. The system of automatic adjustment of coefficients PID of the regulator should provide stable work, despite the factors influencing it. In addition, the process of initial adjustment of the coefficients is also fully assumed by the adaptive regulator.

Connection of work with scientific programs, plans, topics.

The dissertation was prepared in accordance with the research plan of the Department of Industrial Electronics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the dissertation is to create an adaptive PID controller with the ability to set the input parameters of the system, followed by automation of the process of adjusting the PID coefficients.

**The purpose and tasks of the research.:**

- 1) Search and analysis of existing solutions for building adaptive automatic control systems.
- 2) Creation of algorithm, software and electrical circuit for building your own system, controlled by an adaptive PID controller.

**The object of study.** Processes of automatic adjustment of coefficients under the regulator.

**Subject of research.** System of automatic adjustment UNDER the regulator.

**Research methods.** Research methods. In solving the tasks set in the work for the implementation of the adaptive PID controller, an analysis of the factors influencing the operation of the controller and the search for ways to automate the process of adjusting the PID coefficients. The work was implemented on the basis of the STM32F405RGT6 microcontroller in the uVision Keil software environment.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

- 1) The algorithm of automatic adjustment of coefficients under the regulator depending on the internal and external factors influencing system is developed.
- 2) Improved the electrical circuit of the system, which uses the PID controller. Feedback has been added, which makes it possible to obtain information not about the output signals of the controller, but about the reaction of the system as a whole.

**The practical value of the results obtained:**

- 1) It is possible to configure the input parameters of the system using the user interface.
- 2) The adaptive controller is implemented on a real microcontroller with possible further use in various robotic systems.

**Approbation of work results.** The results of the work were presented at the scientific-practical conference of gifted pupils and students "LATEST TECHNOLOGIES OF MODERN SOCIETY 2020".

**Publications on the topic.** Пунов Є. А., Михайлов С. Р. Адаптивний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у роботизованих

системах // International scientific journal "Internauka". — 2020. — №19.  
[Electronic resource] <https://www.inter-nauka.com/issues/2020/19/6562>

**Structure and volume of the dissertation.** The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of used sources of 25 titles. The total volume of the dissertation is 81 pages, including 78 pages of the main text, 38 figures and 13 tables.