

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»**  
**Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна**

Кафедра \_\_\_\_\_ АМтаЕТ \_\_\_\_\_

До захисту допущено  
**Завідувач кафедри**

(підпис)

\_\_\_\_\_ д.т.н., професор Канюк Г.І. \_\_\_\_\_  
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
 робототехніка

освітньо-професійна програма \_\_\_\_\_

тема «Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора»

**Виконав (ла)**

студент (ка) групи ДЕА-23мг \_\_\_\_\_  
 (шифр групи)

\_\_\_\_\_ **МАКСИМЕНКО Артем Сергійович**  
 (ім'я, прізвище)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ к.т.н., Мезеря А.Ю.  
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

**Рецензент роботи**

\_\_\_\_\_ к.т.н., Буданов П.Ф.  
 (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

**Консультант** \_\_\_\_\_

(назва розділу)

\_\_\_\_\_ (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі  
 немає цитат та вилучень з  
 праць інших авторів без відповідних  
 посилань

студент(ка) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (підпис)

Харків – 2024

Кафедра АМтаЕТ  
Спеціальність 174  
Освітньо-професійна програма магістр

**Завідувач кафедри**

(підпис)

д.т.н., професор Канюк Г.І. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« » 20 p.

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу  
рівня вищої освіти

студенту (ці) МАКСИМЕНКО Артем Сергійович  
(ім'я, прізвище)

1. Тема **Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора**

затверджена наказом по академії № 4801-5/3704 від «21» 11 2024р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 28 » 11 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Існуючі схеми автоматичного керування обладнанням нафтовидобувної галузі та їх конструкції, методи керування обладнанням нафтовидобувної галузі, математичні моделі

4. Зміст роботи (перелік питань, які належить розробити):

Аналіз нечіткого псевдолінійного регулятора, аналіз недоліків та переваг існуючих нечітких псевдолінійних регуляторів. Синтез нечіткого псевдолінійного регулятора, дослідження перспективних напрямків розвитку, висновки

- 5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Актуальність теми, існуючі нечіткі псевдолінійні регулятори, типи нечітких псевдолінійних регуляторів, недоліки та переваги нечітких псевдолінійних регуляторів, синтез регуляторів, висновки.

## 6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата      |                     | Оцінка<br>(бали) |
|--------|-------------|-------------------|---------------------|------------------|
|        |             | Завдання<br>видав | Завдання<br>прийняв |                  |
|        |             |                   |                     |                  |

7. Дата видачі завдання « 14 » 09 2024 р.

Керівник

 (підпис) \_\_\_\_\_  
Мезеря А.Ю. (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

 (підпис) \_\_\_\_\_  
Максименко А.С. (ім'я, прізвище)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної роботи

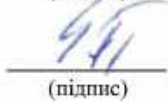
| №<br>з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------|
| 1        | Аналіз існуючих систем керування                                                | 14.10-28.10      | виконано                                 |
| 2        | Аналіз характеристик систем керування в різних режимах роботи                   | 28.10-05.11      | виконано                                 |
| 3        | Порівняльний аналіз                                                             | 05.11-14.11      | виконано                                 |
| 4        | Експериментальні дослідження                                                    | 14.11-28.11      | виконано                                 |
| 5        | Висновки                                                                        | 28.11            | виконано                                 |

Студент (ка)

 (підпис)

\_\_\_\_\_ Максименко А.С.  
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

 (підпис)

\_\_\_\_\_ Ключка Є.П. \_\_\_\_\_  
(ім'я, прізвище)

## Зміст

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Позначення та скорочення .....                                                                                                      | 7  |
| Вступ .....                                                                                                                         | 8  |
| Розділ 1. Аналітичний огляд коригувальних пристроїв .....                                                                           | 10 |
| 1.1. Пристрої лінійної корекції .....                                                                                               | 10 |
| 1.2. Пристрої нелінійної корекції .....                                                                                             | 11 |
| 1.3. Псевдолінійні коригувальні пристрої .....                                                                                      | 13 |
| 1.3.1. Коригуючий пристрій з амплітудним придушенням .....                                                                          | 13 |
| 1.3.2. Двоканальний коригуючий пристрій .....                                                                                       | 14 |
| 1.3.3. Коригуючий пристрій із запам'ятовуванням екстремуму .....                                                                    | 14 |
| 1.3.4. Коригуючий пристрій із фазовим випередженням .....                                                                           | 15 |
| Розділ 2. Нечіткі множини, логіка та їх теоретичні основи. Структура систем автоматичного регулювання з нечіткими регуляторами..... | 16 |
| 2.2. Нечітка множина, його основні властивості та характеристики ..                                                                 | 17 |
| 2.2. Лінгвістичні змінні та нечіткі числа .....                                                                                     | 19 |
| 2.3. Нечітка логіка та її основні властивості (нечіткі висновки).....                                                               | 22 |
| 2.4. Структури систем автоматичного регулювання з нечіткими регуляторами та математичний апарат їх опису.....                       | 24 |
| Розділ 3. Дослідження та синтез псевдолінійного КУ в середовищі Matlab .....                                                        | 27 |
| 3.1. Дослідження властивостей коригуючого пристрою з фазовим випередженням.....                                                     | 27 |
| 3.2. Моделювання в середовищі MatLab роботи ПКУ сфазовим випередженням.....                                                         | 31 |
| Розділ 4. Програмна реалізація псевдолінійного коригуючого пристрої на                                                              |    |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| контролери Simatic S7-300 .....                                                                                         | 53 |
| 4.1. Склад контролера SIMATIC S7-300.....                                                                               | 53 |
| 4.2. Програмний пакет STEP7.....                                                                                        | 53 |
| 4.3. Програмний пакет Simatic WinCC .....                                                                               | 54 |
| 4.4. Програмна реалізація нечіткого псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням у пакеті STEP7..... | 57 |
| 4.3.1. Блок передавальної функції КУ.....                                                                               | 60 |
| 4.3.2. Блок передавальної функції ОУ .....                                                                              | 64 |
| 4.3.3. Блок визначення сигналу .....                                                                                    | 64 |
| 4.3.4. Блок фазового КУ .....                                                                                           | 65 |
| 4.3.5. Блок обчислення інтегралу .....                                                                                  | 67 |
| 4.3.6. Блок ПД-регулювання.....                                                                                         | 69 |
| 4.3.7. Блок перемикача.....                                                                                             | 69 |
| 4.3.7. Блок шматково-лінійної функції .....                                                                             | 70 |
| 4.3.9. Блок нечіткої логіки.....                                                                                        | 71 |
| 4.3.10. Блок обчислення інтегральної квадратичної помилки .....                                                         | 71 |
| 4.4. Розробка панелі візуалізації процесу у Simatic WinCC .....                                                         | 72 |
| Розділ 5. Ресурсоефективність і ресурсозбереження .....                                                                 | 76 |
| 5.1. Організація та планування робіт .....                                                                              | 76 |
| 5.1.1. Визначення тривалості етапів робіт.....                                                                          | 77 |
| 5.2. Складання кошторису витрат на розробку проекту .....                                                               | 79 |
| 5.2.1. Матеріали та покупні вироби .....                                                                                | 80 |
| 5.2.2. Основна заробітна плата .....                                                                                    | 81 |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 5.2.3. Додаткова заробітна плата .....                  | 82 |
| 5.2.4. Витрати на обладнання для виконання робіт.....   | 82 |
| 5.2.5. Розрахунок амортизаційних витрат .....           | 83 |
| 5.2.6. Інші прямі витрати.....                          | 84 |
| 5.2.7. Розрахунок загальної собівартості розробки ..... | 85 |
| 5.2.8. Прибуток.....                                    | 85 |
| 5.2.8. ПДВ.....                                         | 85 |
| 5.2.9. Ціна розробки НДР .....                          | 85 |
| 5.3. Оцінка економічної ефективності проекту .....      | 86 |
| Висновки .....                                          | 87 |

**Позначення та скорочення**

**ПЛК**- логічний контролер, що програмується;

**АСУ ТП**- Автоматизована система управління технологічним процесом;

**КУ**- Корируючий пристрій;

**ЛКУ**- Лінійний коригуючий пристрій;

**ПКУ**– нелінійний коригуючий пристрій; **ПКУ** - псевдолінійний коригуючий пристрій; **ОУ** – об'єкт управління;

**САР**– система автоматичного регулювання; **САУ** – система автоматичного управління;

**АЧХ**- Амплітудно-частотна характеристика;

**ФЧХ**- Фазо - частотна характеристика;

**ПД-регулятор** -пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

## Вступ

Нині одним із головних питань проектування систем автоматичного регулювання (САР) є проектування структурної схеми, що забезпечує високі показники якості регулювання – точність та швидкодія.

На даний момент у промисловій області поширене ПД-регулювання. Це його простотою, відносною дешевизною і ефективністю під час управління у лінійних системах. Однак ефективність забезпечується лише в об'єктах керування зі статичними параметрами. Якщо система невідомо точний опис математичної моделі чи є невизначеності, то якість регулювання значно падає.

З метою підвищення якості регулювання в таких системах використовуються коригувальні пристрої, які забезпечують зміну характеристик з урахуванням вимог. Коригувальні пристрої додаються САР з метою забезпечення необхідного запасу стійкості, підвищення точності та поліпшення якості перехідного процесу в цілому.

Можна виділити кілька груп коригувальних пристроїв: лінійні, нелінійні, псевдолінійні. Найбільшого поширення набули лінійні коригувальні пристрої, але останнім часом застосування нелінійних коригувальних пристроїв, що реалізують нелінійні закони управління, набирає дедалі більшого розмаху. У багатьох випадках дані пристрої дозволяють значно покращити властивості систем керування, а в деяких є єдиним способом досягти необхідних властивостей системи.

Однак навіть такі пристрої не завжди задовольняють вимогам – при розробці систем управління найчастіше передбачається, що параметри об'єкта управління, а так само характер впливу на систему незмінні або змінюються незначно. Якщо при будь-яких обставинах сталася значна зміна даних показників, процес управління може значно відхилитися від розрахункового, що приводить до погіршення якості регулювання. Саме тому останнім часом спостерігається тренд на заміну традиційних регуляторів адаптивними, заснованими на методах нечіткої логіки.

Дана випускна кваліфікаційна робота присвячена псевдолінійному коригувальному устрою та зокрема його нечіткому виконанню. В рамках роботи розглянуто їх дослідження, синтез та програмну реалізацію в пакеті STEP7 для

контролера SIMATIC S7-300.

Об'єктом дослідження є нечітке псевдолінійне коригуючий пристрій з фазовим випередженням.

Мета роботи – провести синтез нечіткого коригувального пристрою з фазовим випередженням у програмному пакеті MATLAB, після чого програмно реалізувати у пакеті STEP7 для контролера Simatic S7-300.

У рамках виконання роботи було виконано проведення літературного огляду джерел та інформації, що стосуються основних класів коригувальних пристроїв, зроблено синтез блоку нечіткої логіки для підстроювання параметрів псевдолінійного коригувального пристрою та реалізовано програму в контролері Simatic S7-300 для практичного застосування коригуючого пристрою в об'єкті управління другого порядку.

Ключові слова: нечітка логіка, псевдолінійний коригуючий пристрій, ПІД – регулятор, програмний пакет MATLAB, програмний пакет STEP7, контролер SIMATIC S7-300.

## **Розділ 1. Аналітичний огляд коригувальних пристроїв**

Для систем автоматичного регулювання та управління, структура яких включає тільки базові функціональні елементи, спрямовані на реалізацію певного закону регулювання є характерним менше значення помилки регулювання. Але водночас такі системи часто не дозволяють досягти заданих якісних показників. Саме у таких випадках доцільно використовувати методи корекції системи зміни її частотних характеристик з метою поліпшення якісних показників [1].

Пристрій корекції може бути представлений у вигляді коригуючого елемента, що має певну передатну функцію, додавання якого як додаткова ланка може змінити властивості системи.

Головною метою використання КУ є покращення якісних показників процесу управління. У цьому випадку під цим розуміється підвищення якісних показників та точності управління, зміна властивостей динаміки, що дозволяє отримати виграш у швидкодії та запасі стійкості.

Можна виділити як основні типи КУ, що застосовуються в системах автоматичного регулювання лінійні КУ та нелінійні КУ. У найпоширенішому виконанні є лінійними або нелінійними фільтрами, включеними в прямий ланцюг (послідовно) або в ланцюг зворотного зв'язку (паралельно), або комбіновані пристрої з одночасним послідовним і паралельним включенням. [2].

### **1.1. Пристрої лінійної корекції**

На даний момент досить поширене використання лінійних коригувальних пристроїв. Вони мають як переваги, основне з яких це простота реалізації, так і недоліки - обмеженість можливостей корекції для підвищення якісних показників системи.

При синтезі ЛКУ використовують дві основні методики. Перша – введення у систему коригувальних ланок певного класу, який вибирається залежно від бажаного результату. Перерахуємо деякі з таких ланок:

інтегруюча ланка першого порядку, що підвищує рівень астатизму, що веде до поліпшення точності управління;

пропорційно-диференціююча інтегро-диференціююча ланки, що підвищують запаси стійкості системи;

аперіодична ланка, що є високочастотним фільтром.

Інший підхід полягає у побудові та аналізі бажаних частотних характеристик. При цьому підході можна заздалегідь визначити частотні параметри КУ

Як було зазначено вище, ЛКУ відрізняє простота реалізації, унаслідок чого вони знаходять широке застосування у багатьох практичних завданнях. Але крім переваг ЛКУ мають і свої недоліки, які обмежують їх застосування. Головним є жорстка залежність амплітудної і фазової частотної характеристик. Таким чином, при синтезі ЛКУ завжди значний ризик при приведенні однієї з характеристик до цільового вигляду, отримати небажаний вид іншої характеристики. Прикладом є синтез диференційних ланцюгів із фазовим випередженням. У цьому випадку при створенні позитивного одночасно послаблюється область нижніх частот, що несе для корисного сигналу. І навпаки: інтегруючі ланки, що виробляють ослаблення високочастотного спектра сигналу, створюють негативний зсув по фазі (запізнювання), що також негативно впливає на якість перехідного процесу [3].

Ідеальною ситуацією при застосуванні коригувальних пристроїв є комбінування позитивних властивостей диференційних та інтегруючих ланцюгів та виключення їх недоліків. Таке завдання може бути вирішена за допомогою нелінійних пристроїв, що коректують.

## **1.2. Пристрої нелінійної корекції**

Необхідні динамічні якості системи та компенсація впливу, викликаного її нелінійностями, можуть бути отримані при введенні в систему нелінійних пристроїв, що коректують.

Додавання до структури системи нелінійних коригувальних пристроїв дозволяє отримати практично незмінні запаси стійкості та якісні показники в нестационарних системах. Такі пристрої можуть бути представлені як нелінійні чотиріполюсники з послідовним та паралельним включенням, нелінійні закономірності, нелінійні КУ, що перемикають КУ [4].

Так як лінійна корекція є одним з окремих випадків нелінійної корекції, то остання може розглядатися як більш загальний коригувальний засіб. Системи з оптимальними параметрами швидкодії можуть бути побудовані тільки із застосуванням засобів нелінійної корекції, що вирішують питання компенсування негативного впливу природних нелінійностей на процес управління.

Однак варто враховувати, що методи нелінійної корекції не є ідеальними і так само мають фактори, що обмежують застосування. Однією з них є вузька спрямованість щодо зовнішніх впливів: нелінійний коректор, синтезований до роботи за певних класів зовнішнього впливу, за інших впливів у разі може бути малоефективний, а гіршому і знизити якісні показники регулювання [5].

Зупинимося докладно на кожному класі нелінійних КУ:

1) Чотирьохполюсні ланки послідовного і паралельного підключення.

Комбіновані КУ виходять шляхом об'єднання нелінійних та псевдолінійних КУ.

2) Нелінійні закони управління-група коригувальних пристроїв, до якої входять наступні закони:

- нелінійні функціональні закони управління забезпечують компенсацію впливу нелінійностей підвищення стійкості та якості роботи систем автоматичного управління та записуються у вигляді функціональних залежностей від абсолютного значення та похідних вхідного сигналу;
- закони логічного управління з яких можна змінювати як структуру системи загалом, і окремі елементи та його параметри Логічні блоки є основний формою запису даних законів;
- оптимізують закони дозволяють на заданому рівні підтримувати максимум або мінімум протягом усього процесу регулювання. Форма реалізації – перемикаючі блоки та блоки множення;
- параметричні закони з яких можна реалізувати процес управління з урахуванням відхилень від закону та програми, заданої заздалегідь.

3) У САУ з самонастроюванням застосовуються нелінійні коригувальні

пристрої з використанням елементів незмінної частини САУ [6].

### 1.3. Псевдолінійні коригувальні пристрої

Псевдолінійні КУ – пристрої, у яких залежність еквівалентних амплітудних та фазових характеристик визначається лише частотною входним сигналом. Незалежність амплітудної та фазової характеристик також є однією з характерних ознак, з якої випливає одна з головних переваг псевдолінійних пристроїв – можливість незалежного коригування амплітудних та фазових характеристик, що неможливо зробити лінійними засобами, що забезпечує більшу свободу дії для експерта, який проводить синтез частотних характеристик САУ [7].

Лінійні фільтри, що вносять фазові зсуви (позитивний або негативний) та математичні блоки основних операцій є головними елементами ПКУ. ПКУ можуть включати двоканальні і триканальні нелінійні фільтри, з відокремленими каналами для амплітуди і фази. Добуток каналних сигналів є виходом системи.

Нижче представлені псевдолінійні КУ, які найбільше застосовуються в системах автоматичного управління:

КУ з амплітудним придушенням;

КУ із фазовим випередженням;

Амплітудно-фазове КУ із роздільними каналами;

КУ з можливістю запам'ятовування екстремуму. Далі буде розглянуто кожне з представлених вище коригувальних пристроїв.

#### 1.3.1. Коригуючий пристрій з амплітудним придушенням

При роботі даного КУ при зростанні частоти спостерігається амплітудне пригнічення та постійне значення фазового сигналу. Структурна схема ПКУ представлена на рис 1.

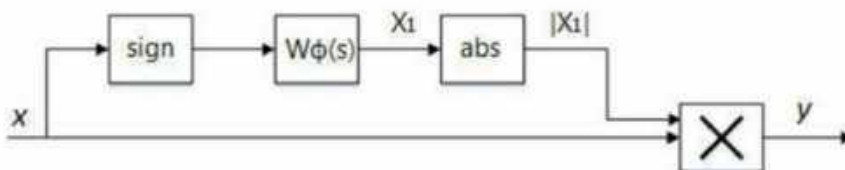


Рисунок 1 – Структура ПКУ з амплітудним придушенням

### 1.3.2. Двоканальний коригуючий пристрій

У двоканалному коригувальному пристрої відбувається поєднання КУ з фазовим випередженням і амплітудно-переважного КУ, що працюють у паралельних каналах. Структурна схема ПКУ представлена нарис 2.

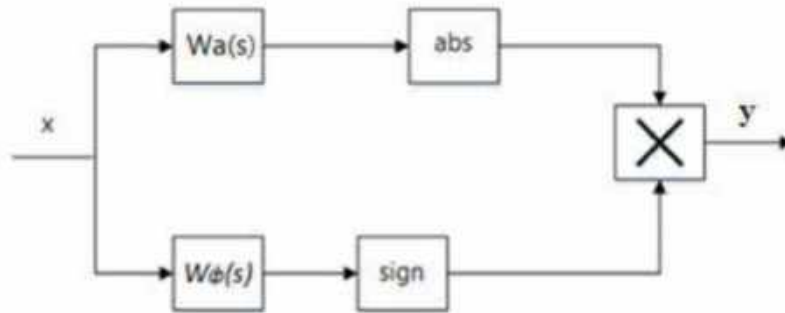


Рисунок 2 – Структура двоканального ПКУ

### 1.3.3. Коригуючий пристрій із запам'ятовуванням екстремуму

Представимо склад даного КУ:

- блок масштабування (МСШ) – при проходженні сигналу через блок відбувається його посилення;
- блок пікового детектора (ПД) – при проходженні сигналу через блок відбувається запам'ятовування його екстремуму;
- нульорган (АЛЕ) - прирівнює вхідного сигналу нулю забезпечує скидання пікового детектора;
- sign – блок, що визначає знак вхідного сигналу;
- abs – блок обчислення модуля вхідного сигналу.

Структурна схема представлена на рис 3.

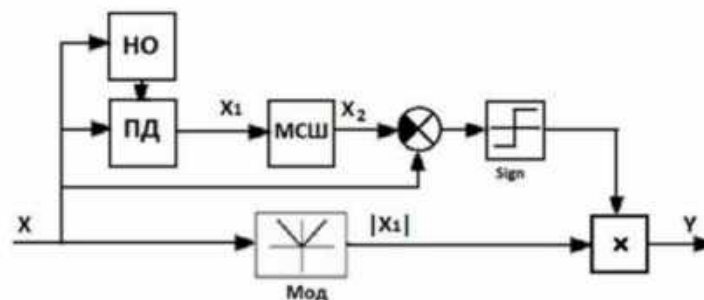


Рисунок 3 – Структурна схема ПКУ із запам'ятовуванням екстремуму

#### 1.3.4. Корируючий пристрій із фазовим випередженням

Корируючий пристрій з фазовим випередженням забезпечує отримання фазового випередження без впливу на амплітуду сигналу.

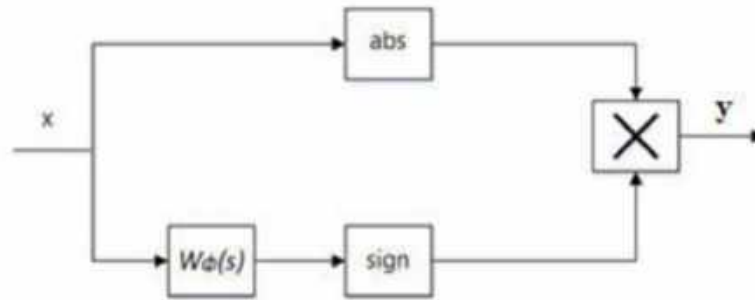


Рисунок 4 – Структурна схема ПКУ з фазовим випередженням

Характерна риса псевдолінійного КУ з фазовим випередженням – взаємна незалежність частотних характеристик коригуючого пристрою та амплітуди вхідного сигналу. Принцип роботи можна зрозуміти на прикладі структурної схеми і полягає він у наступному: обидва канали надходить сигнал, що подається на вхід в КУ. Сигнал у верхньому каналі проходить перетворення через блоки підсилення (для даної структурної схеми коефіцієнт підсилення дорівнює 1) та модуля сигналу. Сигнал у нижньому каналі перетворюється за допомогою інтегродиференціюючої ланки та блоку визначення знака сигналу. Виходом є множення сигналу верхнього та нижнього каналу [8].

Передатна функція інтегро-диференційної ланки набуде вигляду:

$$W_{\phi}(s) = \frac{Ts + 1}{T_1s + 1}, \quad (1)$$

де  $T$ ,  $T_1$  - постійні часу.

## **Розділ 2. Нечіткі множини, логіка та їх теоретичні основи. Структура систем автоматичного регулювання з нечіткими регуляторами**

Математична теорія нечітких множин та нечітка логіка – узагальнення класичної формальної логіки та теорії множин. Поняття були вперше застосовані американським ученим Лотфі Заде у 1965 р. Однією з основних передумов до появи цієї теорії стало використання людиною наближених та нечітких тез при описі різних об'єктів, систем та процесів.

З народження теорії нечітких множин і до отримання визнання у всьому світі пройшло не одне десятиліття, проте можна виділити три основні періоди становлення нечітких систем.

Характерними ознаками та тенденціями першого періоду є розвиток теорії нечітких множин. Другий період ознаменований першими практичними успіхами у сфері нечіткого регулювання та управління технічними системами. Так само почалося вивчення питань щодо побудови експертних систем та нечітких контролерів, в основі яких лежала б нечітка логіка.

Початок третього періоду в другій половині 80-х років, який триває до сьогодні, пов'язаний з розробкою перших програмних пакетів для проектування апарату нечіткої логіки, а також першими успіхами її використання в прикладних завданнях.

Тріумф та розвиток у всьому світі нечітка логіка отримала саме на третьому періоді, після доказу теореми FAT (Fuzzy Approximation Theorem) Бартоломеєм Коско. В даний час ця технологія також переживає період активного розвитку та дослідження, що пов'язано з розвитком обчислювальної потужності сучасних технічних пристроїв.

Що стосується даної роботи апарат управління на нечіткої логіці заснований на комплексі правил, що являють собою певні передумови, що описують роботу регулятора в залежності від вхідних дій. Правила розробляються на основі дослідницької оцінки об'єкта та системи управління та бази знань, отриманої та складеної «експертом» на основі даного дослідження.

## 2.2. Нечітка множина, його основні властивості та характеристики

Безліч - група елементів, пов'язаних певною загальною ознакою. Ключовою особливістю і те, що можна однозначно визначити приналежність елемента безлічі.

Тим не менш, досвід прикладного застосування показує, що такий принцип у більшості малозастосовний до реальних систем, оскільки невиправдано ідеалізує їх математичний опис і не є досить гнучким, щоб описувати властиві всім реальним системам невизначеності.

Основною передумовою, на якій базується визначення нечіткої множини є той факт, що будь-який елемент лише певною мірою належить цій множині. Цей ступінь зазвичай визначається значенням деякого числа з діапазону  $[0,1]$ , крайні межі якого є абсолютними характеристиками приналежності до множини.

Нехай  $E$  - універсальна множина,  $x$  - елемент  $E$ , а  $R$  - деяка властивість. Звичайне (чітке) підмножина  $A$  універсальної множини  $E$ , елементи якого задовольняють властивості  $R$ , визначається як безліч упорядкованих пар:

$$A = \{ \mu_A(x)/x \}, \quad (2)$$

де  $\mu_A(x)$  - характеристична функція, що набуває значення 1 або 0.

Якщо порівнювати між собою нечіткі та звичайні множини, то їх ключова відмінність полягатиме в тому, що для елементів  $x$  з  $E$  неможливо дати певну відповідь щодо належності властивості

$R$ . Тому визначення нечіткої підмножини  $A$  універсальної множини

$E$  представляється як безліч згрупованих пар:

$$A = \{ \mu_A(x)/x \}, \quad (3)$$

де  $\mu_A(x)$  - характеристична функція приналежності (або просто функція приналежності), яка набуває значення у певному впорядкованому множині  $M$ .

Функції приналежності дозволяють визначити для елемента  $x$  ступінь приналежності до підмножини  $A$ . Множина  $M$  - безліч приладдя.

Приклади запису нечіткої множини:  $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ,  $M = [0;1]$ ,  $A$  – нечітка множина для якого  $\mu_A(x_1) = 0.3$ ,  $\mu_A(x_2) = 1$ ,  $\mu_A(x_4) = 0.5$ ,  $\mu_A(x_5) = 0.9$ .

Тоді  $A$  можна подати у вигляді:  $A = \{0.3/x_1; 0/x_2; 1/x_3; 0.5/x_4; 0.9/x_5\}$ .

Розглянемо приклад найпростішої нечіткої множини.

Нехай  $E = \{\text{ЗАПОРІЖЕЦЬ, ЖИГУЛІ, МЕРСЕДЕС, ...}\}$  – безліч марок автомобілів, а  $E = \{0, \infty\}$  – Універсальна безліч «Вартість», тоді на  $E$  ми можемо визначити нечіткі множини типу "Для бідних", "Для середнього класу", "Престижні", з функціями приналежності виду рис 5.

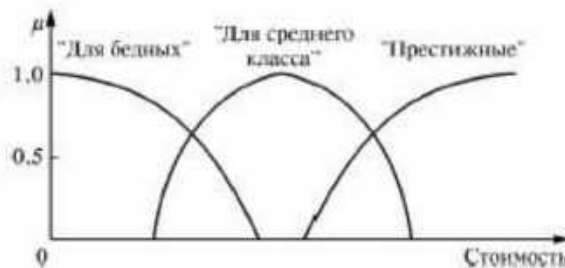


Рисунок 5 – Приклади функцій приладдя

Знаючи склад функцій приналежності та значення цін на автомобілі з  $E$  на поточний момент, можна буде визначити на  $E$  нечіткі множини з тими самими назвами.

Так, наприклад, нечітка множина «Для бідних», задана на універсальній множині  $E = \{\text{ЗАПОРІЖЕЦЬ, ЖИГУЛІ, МЕРСЕДЕС, ...}\}$ , виглядає так, як показано на рис 6.

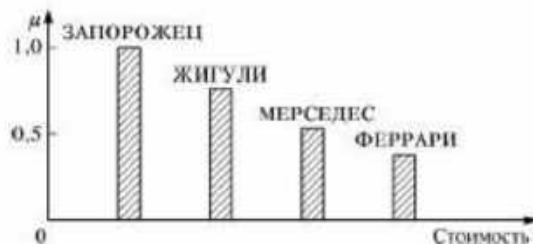


Рисунок 6 – Приклад завдання нечіткої множини

Аналогічним чином можна визначити і нечіткі множини за іншими ознаками

автомобілів (наприклад безлічі «Швидкість», "Місткість", "Комфортабельність" і т.д.).

## 2.2. Лінгвістичні змінні та нечіткі числа

Наукові дослідження та досвід, отримані останнім часом наочно продемонстрували неспроможність загальноприйнятих способів аналізу систем та моделювання на ЕОМ, фундаментом яких є точна обробка чисельних даних. Даний факт пов'язаний з тим, що такий підхід не має достатніх ресурсів, щоб описувати реальні технологічні процеси через їхню складність, і підштовхує до думки про те, що для якісного аналізу поведінки технологічних процесів необхідний перехід від усталених вимог до точності вимірювань та детермінованості на користь нового підходу.

Цей тренд також викликаний появою нових класів завдань управління, одним із яких є клас, пов'язаний з вибором оператором рішень у контурі «людина – ЕОМ». Розв'язання завдання взаємодії в таких системах не можливе без застосування близьких до природних мов, які здатні описати нечіткі поняття, в близькому і доступному для людини уявленні. У зв'язку з цим має доцільність використання введеного вперше Л.Л. Поняття лінгвістичної змінної, що дозволяє з необхідною точністю передати словесну характеристику предметної області у випадках відсутності її детермованої характеристики. При цьому необхідно враховувати, що часто лінгвістичний опис не програє вінформативності опису детермінованому.

Лінгвістичною змінною (ЛП) називається набір  $(\beta, T, X, G, M)$ , де:

- $\beta$  - ім'я лінгвістичної змінної;
- $T$  - безліч значень лінгвістичної змінної (терм-множина), які представляють нечітких змінних, областю визначення кожної з яких є безліч  $X$ . Безліч  $T$  називається базова терм-множина лінгвістичної змінної;
- $G$  – синтаксична процедура, яка дозволяє проводити операції над елементами терм-множини  $T$ , у тому числі, генерувати нові терми (значення). Безліч  $G(T)$ , де  $G(T)$  – безліч згенерованих термів, називається розширеною терм-множиною лінгвістичної змінної;

- $M$  – семантична процедура, яка дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичної змінної, що утворюється процедурою  $G$ , на нечітку змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

Прикладом є визначення експертом ваги виробів, що випускаються через поняття «Мала вага», «Середня вага» і «Велика вага», при цьому мінімальна вага дорівнює 1 кг, а максимальна - 5 кг.

Формалізація такого опису може бути проведена за допомогою наступної лінгвістичної змінної ( $\beta$ ;  $T$ ;  $X$ ;  $G$ ;  $M$ ), де:

- $\beta$  - вага виробу;
- $T = \{\text{«Мала вага», «Середня вага», «Велика вага»}\}$ ;
- $X = [1; 5]$ ;
- $G$  – процедура утворення нових термів за допомогою зв'язок «і», "або" і модифікаторів типу "дуже", "ні", "злегка" і т.д. П.

Наприклад:

"Малий або середня вага", "Дуже мала товщина" і т. д.;

$M$ - Процедура завдання на  $X = [1; 5]$  нечітких підмножин  $A_1 = \text{«Мала вага»}$ ,  $A_2 = \text{«Середня вага»}$ ,  $A_3 = \text{«Велика вага»}$ , а також нечітких множин для термів з  $G(T)$  відповідно до правил трансляції нечітких зв'язок і модифікаторів «і», « або », «ні», «дуже», «злегка» та інших операцій над нечіткими множинами виду:  $A \cup B$ ,  $A \cap B$ ,  $\bar{A}$ ,  $CONA = A^2$ ,  $DILA = A^{0.5}$  і т.п.

Терм-множина та розширена терм-множина в умовах прикладу можна характеризувати функціями приналежності, наведеними на рисунках 7 та 8.

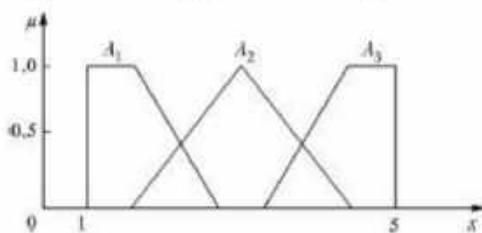


Рисунок 7 – Функції приналежності нечітких множин:  $A_1 = \text{«Мала вага»}$ ,

A2=«Середня вага», A3=«Вага»

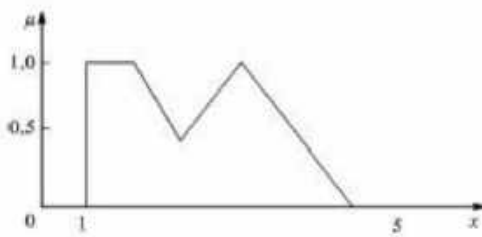


Рисунок 8 – Функції приналежності нечіткої множини «Мала або середня вага»

Розглянемо докладніше визначення та основні типи нечітких чисел.

Нечітка кількість визначаються як нечітка множина  $A$  на множині дійсних чисел  $R$  з функцією належності  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ , де  $x$  – дійсне число, тобто  $x \in R$ .

Нечіткі числа (LR)-типу – нечіткі числа, форма яких задається у спеціальному вигляді та суворій відповідності певним правилам. Даний клас нечітких чисел дозволяє максимально спростити операції алгебри при роботі з ними.

Функції належності нечітких чисел (LR)-типу задаються за допомогою незростаючих на множині невід'ємних дійсних чисел функцій дійсного змінного  $L(x)$  і  $R(x)$ , що задовольняють умовам:

$$L(\leftrightarrow x) = L(x), R(\leftrightarrow x) = R(x), \quad (4)$$

$$L(0) = R(0). \quad (5)$$

До класу (LR)-функцій відносяться функції, графіки яких мають вигляд, наведений рис 9.

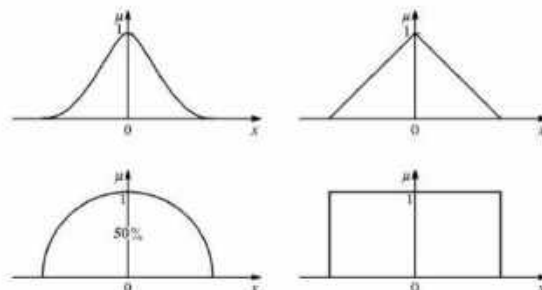


Рисунок 9 – Можливий вид (LR)-функцій

Приклади графіків функцій належності нечітких чисел (LR)-типу

наведено рис 10.

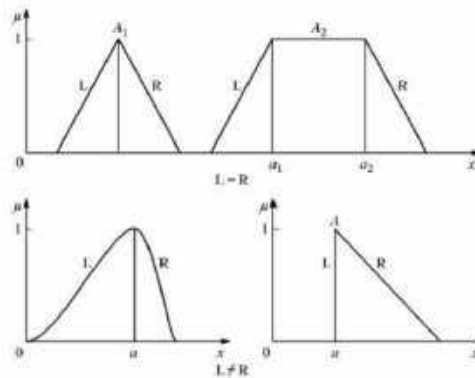


Рисунок 10 – Функції належності нечітких чисел (LR)-типу

### 2.3. Нечітка логіка та її основні властивості (нечіткі висновки)

Згідно з одним із визначень логікою є аналітична діяльність про методи та закони мислення. Першочерговим завданням такого аналізу не змістовна частина доказів у якомусь роздумі, які характер і форма. Предметною областю логіки є лише питання слідстві будь-яких висновків із заданих передумов.

Однією з основних цілей логіки є систематизація та накопичення бази знань про правильні способи та методик міркувань. Механізми логіки дозволяють працювати з композицією висловлювань (наприклад, із простих складати складні тощо).

Фундаментом апарату нечіткої логіки, що застосовується в реальних системах управління є інформаційна база, що складається на основі експертних досліджень фахівців певної галузі та подається у вигляді предикатів:

П1: якщо  $x \in A1$ , тоді  $y \in$

B1, П2: якщо  $x \in A2$ , тоді  $y \in$

B2,

.....

... Пn: якщо  $x \in An$ , тоді  $y \in Bn$ ,

де  $x$  - Змінна входу (ім'я для відомих значень даних);

$y$ - Вихідна змінна (ім'я для значення даних, яке буде обчислено);

$A, B$  - функції приналежності, визначені відповідно на  $x$  та  $y$ .

Пояснимо детальніше. Знання експерта  $A \rightarrow B$  відображає нечітке причинне відношення передумови та висновки, тому його можна назвати нечітким ставленням та позначити через  $R$ :

$$R = A \rightarrow B, \quad (6)$$

де « $\rightarrow$ » називають нечіткою імплікацією.

Відношення  $R$  можна розглядати як нечітке підмножина прямого твору  $X*Y$  повної множини передумов  $X$  та висновків  $Y$ . Таким чином, процес отримання нечіткого результату висновку  $B'$  з використанням даного спостереження  $A'$  та знання  $A \rightarrow B$  можна представити у вигляді формули:

$$B' = A \circ R = A' \circ (A \rightarrow B), \quad (7)$$

де " $\circ$ " введена вище операція згортки.

Операції композиції та імплікації мають різні варіанти реалізації в нечіткій алгебрі, які забезпечуватимуть також і різний кінцевий результат, але якщо не вводити конкретику, то можна виділити чотири основні етапи логічного висновку [16], [18]:

- нечіткість (введення нечіткості, фазифікація, fuzzication). З вхідних чітких змінних і за задалегідь сформованим функцій власності обчислюється ступінь істинності всіх передумов за всіма правилами;
- логічний висновок. Ступені істинності з попереднього етапу проєктуються на кожне правило, що дозволяє сформувати нечітку множину, яка відповідає кожній передумові за кожним правилом. Найбільш поширеними правилами логічного висновку зазвичай є операції  $\min$  (мінімум) - обрізання функції належності за висотою, яка є ступенем істинності передумови за цим правилом або  $\prod$  (множення) -

масштабування функції належності виведення за допомогою обчисленого ступеня істинності передумови правила;

- Композиція. Нечіткі множини з попереднього етапу об'єднуються і утворюють єдину нечітку множину по кожній вихідній змінній. Найчастіше для подібного об'єднання використовуються операції *max* (максимум) - формування виведення нечіткого підмножини як поточечного максимуму по всіх нечітких підмножин або *sum* (сума) - формування виведення нечіткого підмножини як поточечної суми по всіх нечітких підмножин;
- дефазифікація – отримання чіткої змінної на основі нечіткої множини за рахунок методів приведення до чіткості (алгоритми Мамдані, Цукамото, Сугено).

## 2.4. Структури систем автоматичного регулювання з нечіткими регуляторами та математичний апарат їх опису

Структура нечіткого регулятора представлена на рис 11.



Рисунок 11 – Структурна схема нечіткого регулятора

Однією з основних завдань дослідника під час проектування нечіткого регулятора – складання бази правил, де кожна пропозиція відповідає

наступній структурі:

Якщо < передумова > ТО < висновок >.

Експерт складає базу знань на основі емпіричних досліджень, що визначають склад функцій приналежності для передумов  $\mu(e)$  та висновків  $\mu(u)$ . Таким чином, відбувається синтез лінгвістичних правил, змінних та термів.

Наступний етап синтезу регулятора – фазифікація, у якій конкретні вхідні значення перетворюються на терми. На цьому етапі складається відповідність між усіма вхідними значеннями регулятора та значеннями функцій належності.

Після того, як терми визначені на основі існуючої бази знань, можна вибирати значення, які відповідають вхідному впливу.

Логічне рішення формується під час етапів агрегування, активування та акумулювання.

Етап агрегування має на увазі визначення ступеня істинності за всіма правилами системи нечіткого введення. Значення істинності з усіх умов системи нечіткого висновку  $B = \{b_i\}$  приймаються відомими. Потім проводиться аналіз кожного правила нечіткої системи. Якщо нечітке висловлювання відповідає правилу:

ПРАВИЛО < # >: ЯКЩО <<  $b_1 \in a$  >>, або

ПРАВИЛО < # >: ЯКЩО <<  $b_1 \in V a$  >>,

де  $V$  відповідає вислову «Дуже», «Менш» і т.д., то ступінь його істинності дорівнює відповідному значенню  $b_i$ .

Процес агрегування вважається завершеним, якщо значення  $b_k$  визначено всім правил системи  $P$ . Безліч рішень позначається через  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ .

Наступний етап - активізація укладання, полягає у визначенні істинності для всіх підскладання правил. Являє собою ту саму суть, що й агрегація, але для підскладання.

Останній етап – акумуляція – полягає у знаходженні підсумкових значень функцій приналежності всім вихідним лінгвістичним змінним множини. На цьому етапі відбувається розмежування підукладень однакових змінних, які належать різним правилам системи. За кожним із правил здійснюється обчислення значення функції належності, після якого виконується етап дефазифікації з переходом від отриманих значень лінгвістичних змінних до конкретних значень кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Роботу нечіткого регулятора вважатимуться завершеною, у разі коли у всіх вихідних лінгвістичних змінних визначено конкретне значення керуючого регулюючого впливу.

### Розділ 3. Дослідження та синтез псевдолінійного КУ в середовищі Matlab

#### 3.1. Дослідження властивостей коригуючого пристрою з фазовим випередженням

У рамках роботи коригуючим пристроєм системи автоматичного управління було вибрано псевдолінійне коригуючий пристрій з фазовим випередженням. Як було сказано раніше, головною особливістю даної ланки є незалежність частотних характеристик від величини амплітуди сигналу на вході, що дозволяє віднести його до псевдолінійного класу [3].

Зміна сигнатури коефіцієнта посилення відбувається в момент, який задається на характеристиці точкою  $C_1$ , своєю чергою пов'язаною з кутом фазового випередження співвідношенням:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \sin \alpha . \quad (8)$$

Точка  $C_2$  пов'язана з амплітудою вхідного сигналу  $x = A \sin \omega t$ , звідки випливає, що  $OC_2 = A$ . При зростанні кута фазового випередження відбувається зближення точок  $C_1$  та  $C_2$ , а повне злиття відбувається на частоті  $\pi/2$ . При подальшому зростанні  $\alpha$  від  $\pi/2$  до  $\pi$ , положення точки  $C_1$  починає визначатися співвідношенням:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \cos \alpha . \quad (9)$$

Характеристика нелінійності за постійних параметрів лінійного фільтра фазового каналу залежить від частоти  $\omega$ .

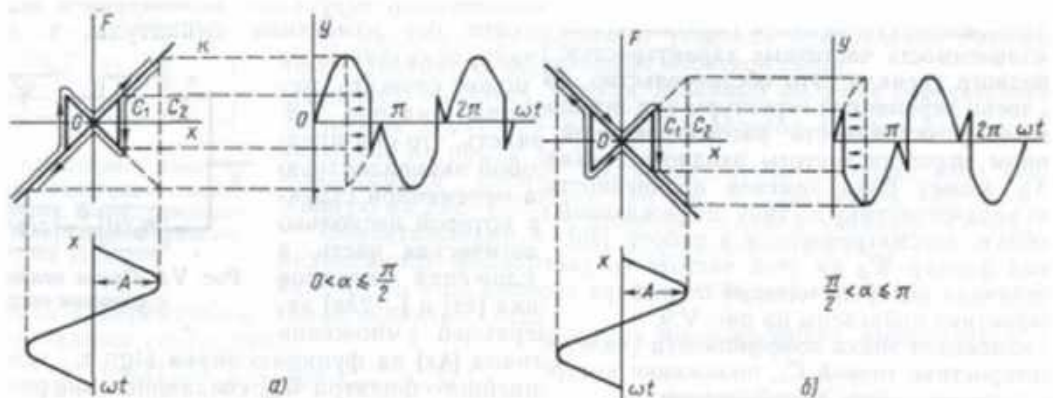


Рисунок 12 – Нелінійні характеристики: а – при фазовому випередженні до  $90^\circ$ ; б - при фазовому випередженні від  $90^\circ$  до  $180^\circ$

Розглянемо еквівалентну амплітудно-фазову характеристику коригувального пристрою, отриману через гармонійну лінеаризацію:

$$J(A, \omega) = a(A, \omega) + jb(A, \omega), \quad (10)$$

де  $a(A, \omega)$ ,  $b(A, \omega)$  – коефіцієнти гармонійної лінеаризації, що в загальному випадку залежать від амплітуди та частоти вхідного сигналу.

Даний вираз може бути поданий у вигляді:

$$J(A, \omega) = q(A, \omega)e^{j\mu(A, \omega)}, \quad (11)$$

1)

де  $q(A, \omega)$  – еквівалентна амплітудна характеристика нелінійної ланки:

$q(A, \omega) = \sqrt{[a(A, \omega)]^2 + [b(A, \omega)]^2}$ . (12)  $\mu(A, \omega)$  – еквівалентна фазова характеристика нелінійної ланки може бути представлена у вигляді:

$$\mu(A, \omega) = \arctg \frac{b(A, \omega)}{a(A, \omega)}. \quad (13)$$

Коефіцієнти гармонійної лінеаризації корегуєпристрої визначаються за формулами:

$$a = \frac{2}{\pi * A} \int_0^\pi F(A \sin(\omega t)) * \sin(\omega t) d(\omega t). \quad (14)$$

$$b = \frac{2}{\pi * A} \int_0^\pi F(A \sin(\omega t)) * \cos(\omega t) d(\omega t). \quad (15)$$

Якщо у схемі використовується лінійний фільтр із передавальною функцією:

$$W_{\Phi T}(s) = \frac{T_1 * Ts + 1}{T_1 s + 1} \quad (16)$$

то створюване ним випередження  $\alpha$  визначатиметься виразом:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\omega T(1 - \nu)}{1 + \omega^2 T^2 \nu}, \quad (17)$$

де через відзначено відношення  $T1/T$ .

Тоді коефіцієнти  $a$  і  $b$  дорівнюватимуть:

$$ka = (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha) / \pi \quad (18)$$

$$kb = (1 - \cos 2\alpha) / \pi \quad (19)$$

Амплітудно-частотна характеристика системи дорівнює:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}, \quad (20)$$

а фазово-частотна характеристика системи:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}, \quad (21)$$

У програмному пакеті MathCad було зроблено побудову АЧХ і ФЧХ псевдолинейного коригувального пристрою за різних значеннях параметра  $T$  передавальної функції лінійного фільтра. Характеристики представлені на рисунках 13 та 14.

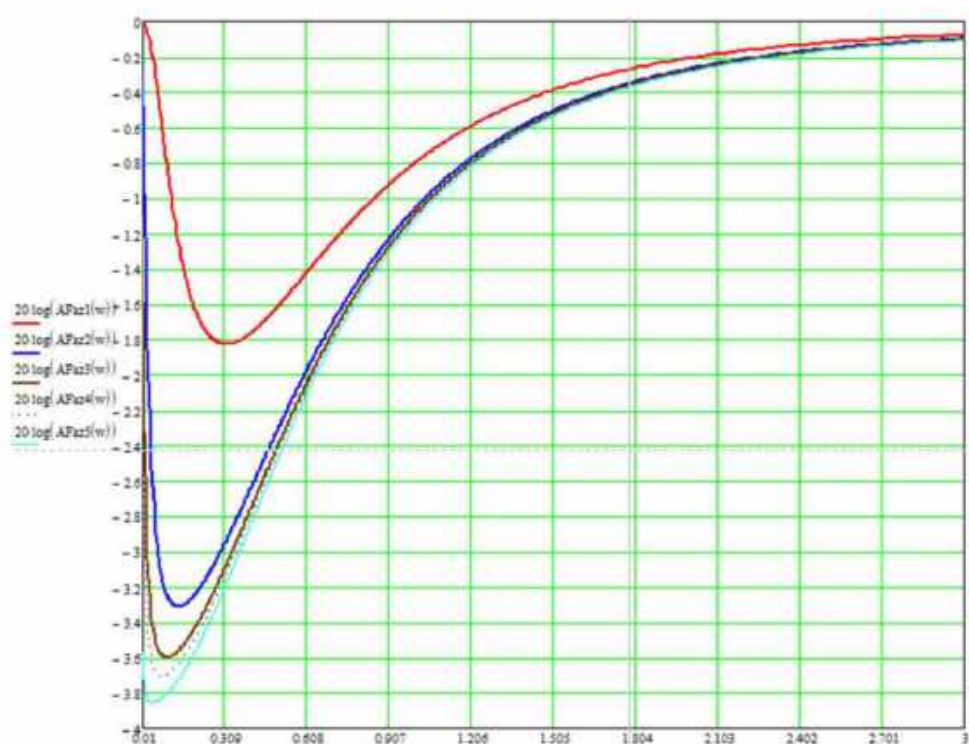


Рисунок 13 – Сімейство АЧХ псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням

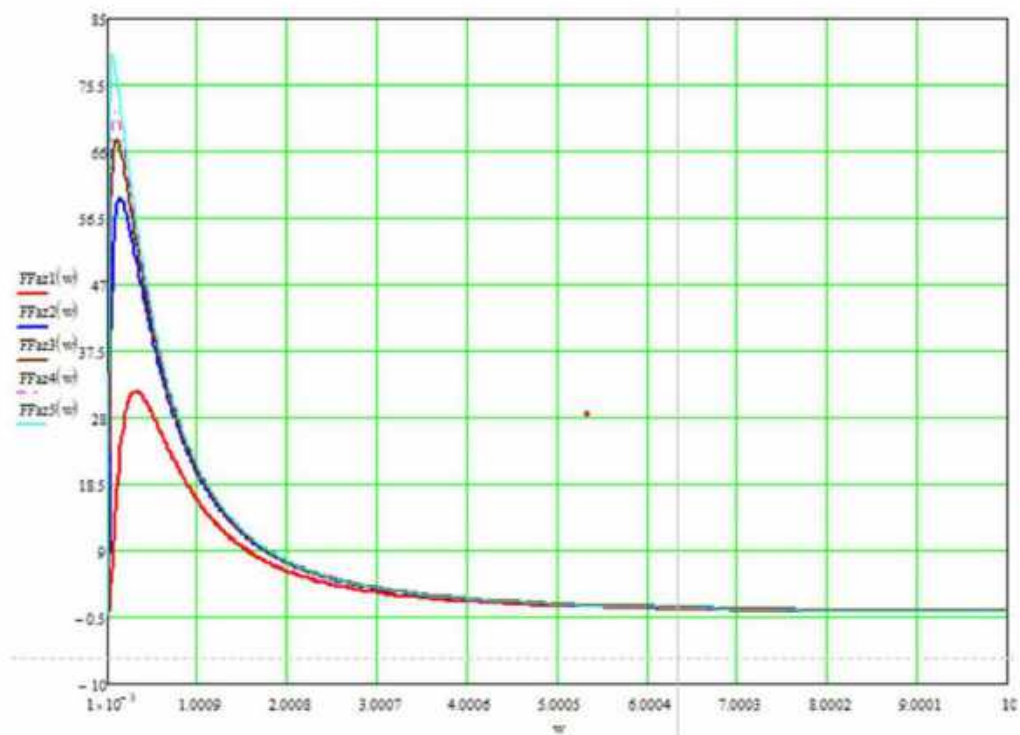


Рисунок 14 – Сімейство ФЧХ псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням

### 3.2. Моделювання в середовищі MatLab роботи ПКУ сфазовим випередженням

Для дослідження було обрано об'єкт управління другого порядку. Передатна функція даного об'єкта представлена на рис 15.

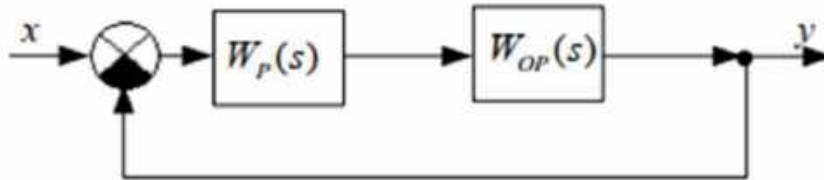


Рисунок 15 – Система з ОУ другого порядку

Передаточна функція об'єкта управління:

$$W_{OP}(s) = \frac{K_0}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \quad (22)$$

де  $K_0$  - Статичний коефіцієнт передачі ОУ;

$T_2, T_1$  - постійні часу.

Параметри даного об'єкта управління взяли значення:  $K_0 = 8$ ;  $T_1 = 10$ ;  $T_2 = 6$ .

Далі було проведено ручне налаштування ПІД-регулятора. За наявності базових теоретичних знань про роботу даного регулятора в цілому і кожної з його складових можна поступово досягти оптимального налаштування, при якому досягається необхідна якість регулювання. Як правило, першою налаштовується пропорційна складова яка дозволяє вивести процес регулювання на необхідну уставку. Однак слід враховувати, що вона не забезпечує повного усунення статичної помилки. Саме тому наступною налаштовується інтегральна складова, яка дозволяє регулятору згодом врахувати статичну помилку та повністю виключити. В останню чергу налаштовується диференціальна складова, яка протидіє подальшим відхиленням від цільового значення. Процес налаштування може бути значно спрощений за умови знання експертом основних правил, які були отримані шляхом аналітики та емпіричних досліджень ПІД-регулятора. Наведемо їх нижче:

- збільшення коефіцієнта пропорційності збільшує швидкодія та

знижує запаси стійкості;

- зі зниженням інтегральної складової помилка регулювання протягом часу також зменшується швидше;
- зменшення величини постійної інтегрування зменшує запаси стійкості;
- збільшення диференціальної складової підвищує запаси стійкості та швидкодію.

Представлені правила можуть бути застосовані як для звичайних, так і нечітких ПД-регуляторів.

Підсумкові параметри ПД-регулятора прийняті рівними:  $K_p = 15$ ;  $K_i = 0.2$ ;  $K_d = 1$ .

У Matlab Simulink було зібрано схему, що моделює роботу ПКУ. Схема складається з двох частин: САР з об'єктом другого порядку без застосування коригувального пристрою, САР з об'єктом другого порядку та КУ. Схема представлена на рис 16.

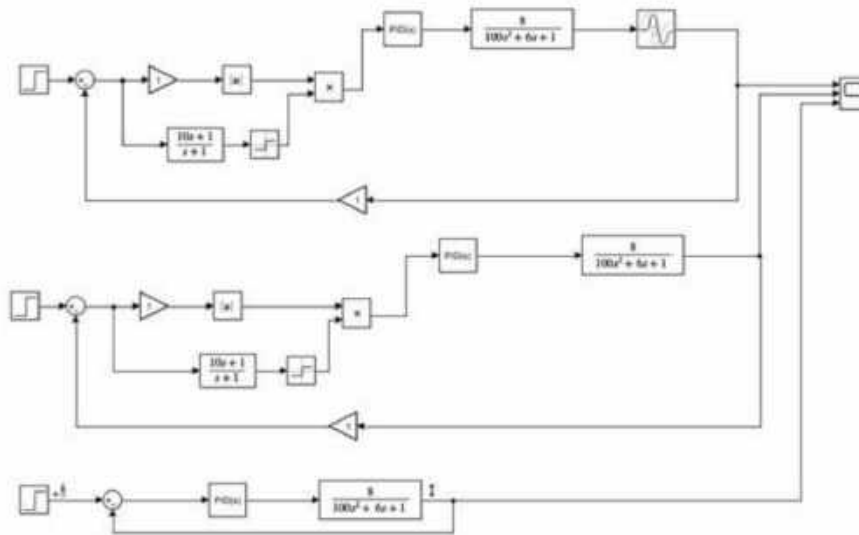


Рисунок 16 – Моделювання роботи САР у Matlab Simulink

Перехідна характеристика та показники якості системи без застосування коригувального пристрою представлена на рис 17. Частотні

характеристики відображені на рис 18.

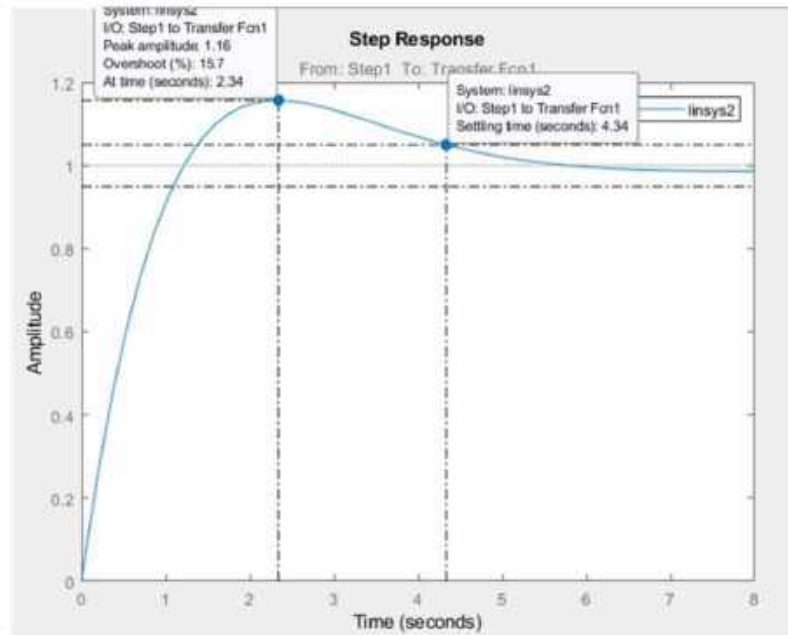


Рисунок 17 – Перехідний процес САР без КУ

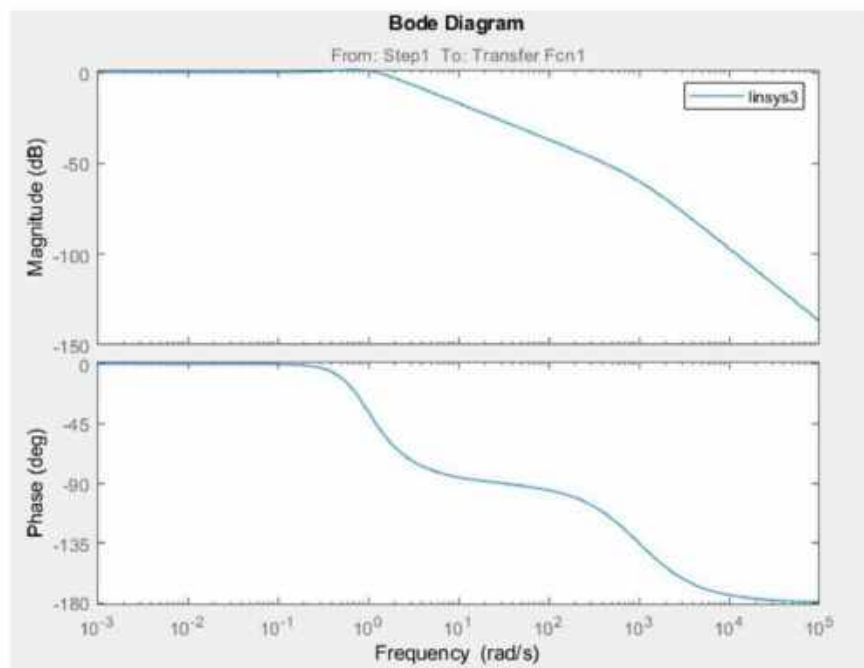


Рисунок 18 – АЧХ та ФЧХ САР без КУ

Порівняльна графічна характеристика перехідних процесів у САР без КУ та САР з КУ наведена на рис 19.

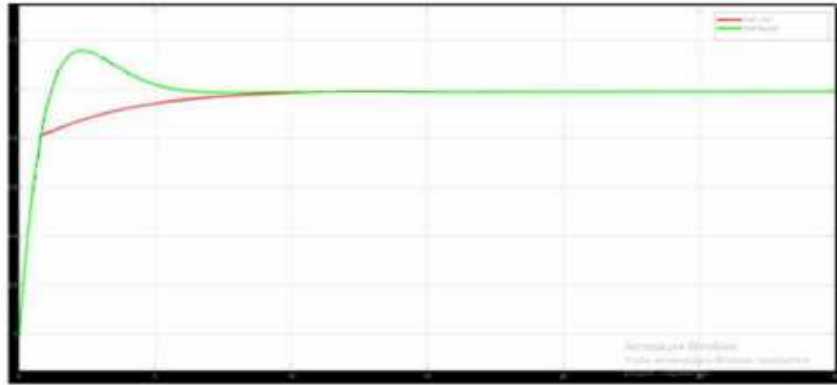


Рисунок 19 - Перехідні характеристики САР при різних конфігураціях

З рис19 видно, що при застосуванні пристрою, що коригує значно підвищується якість перехідного процесу: відбувається зменшення перерегулювання та часу перехідного процесу.

Далі було зроблено аналіз впливу виду передавальної функції інтегро-диференціюючої ланки КУ з фазовим випередженням на якість перехідного процесу. При незмінному коефіцієнті  $T_1 = 1$ , було проведено зміну коефіцієнта  $T$ . Проведення даного дослідження доцільно тому що при реалізації нечіткого коригувального пристрою як параметр, що підлаштовується, було вирішено вибрати саме цей коефіцієнт. Графік перехідних процесів САР із запізненням та КУ із фазовим випередженням при різних значеннях параметра  $T$  представлений на рис 20.

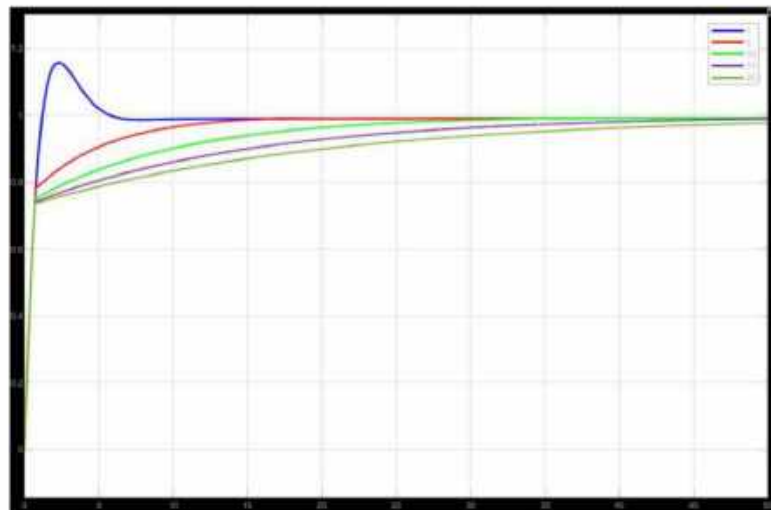


Рисунок 20 – Графіки перехідних процесів за різних значеннях  $T$   
(1,5,10,15,20)

Можна зробити висновок, що чим більший коефіцієнт  $T$ , тим менше значення перерегулювання, проте з його зростанням поступово досягається нульове перерегулювання, у той час як час перехідного процесу продовжує збільшуватися, тому потрібно підбирати його так, щоб досягалося оптимальне співвідношення даних величин.

Далі було вирішено розпочати розробку нечітких регулюючих пристроїв – нечіткого ПД-регулятора та нечіткого псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням. Для їх синтезу необхідно знати діапазон, в якому повинні змінюватися параметри налаштування даних пристроїв. Для цього необхідно дослідити поведінку системи за зміни параметрів об'єкта управління. Суть дослідження полягає в тому, щоб вивести систему на межу стійкості шляхом зміни тимчасової постійної  $T_1$  об'єкта керування. Після цього скоригувати параметри коригуючого пристрою та ПД-регулятора. Діапазон «Початкові параметри – кінцеві параметри» і буде початковою цільовою областю виходу регулятора. Було здійснено підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора, при якому перерегулювання дорівнювало б нулю. Дані коефіцієнти дорівнюють:  $K_p = 11$ ,  $K_i = 0.08$ ,  $K_d = 18$

Далі відбувалася зміна коефіцієнта  $T_1$  у діапазоні від 1 до 50. Результати дослідження представлені на рис. 21 – 29.

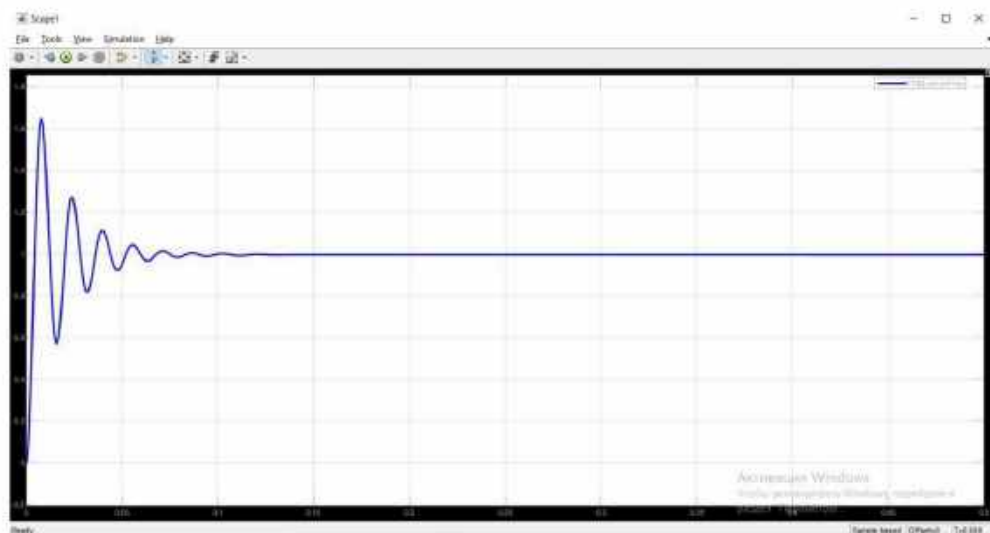
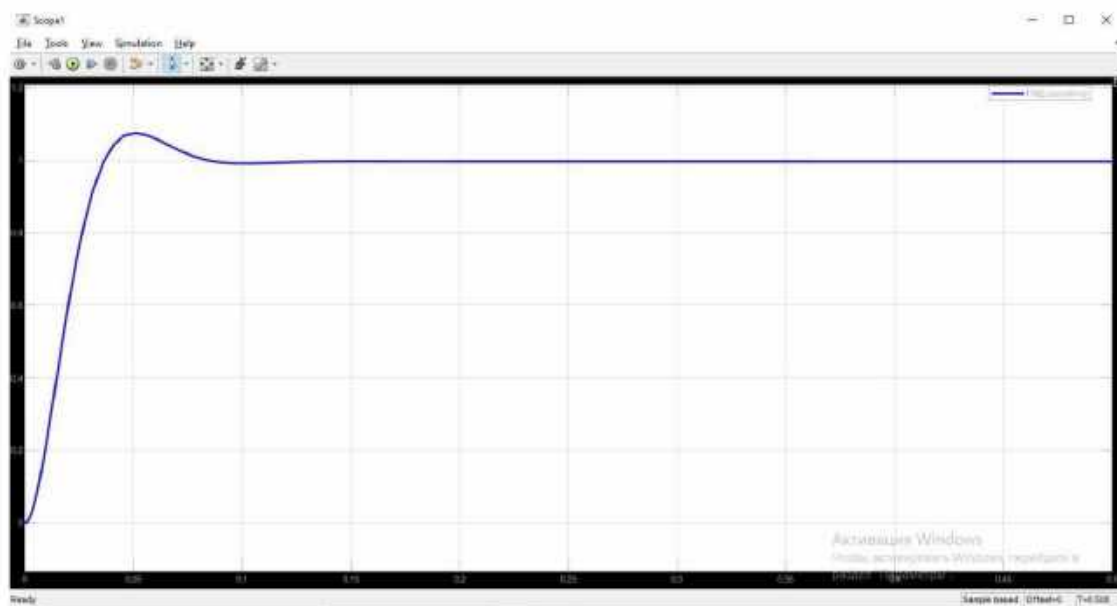
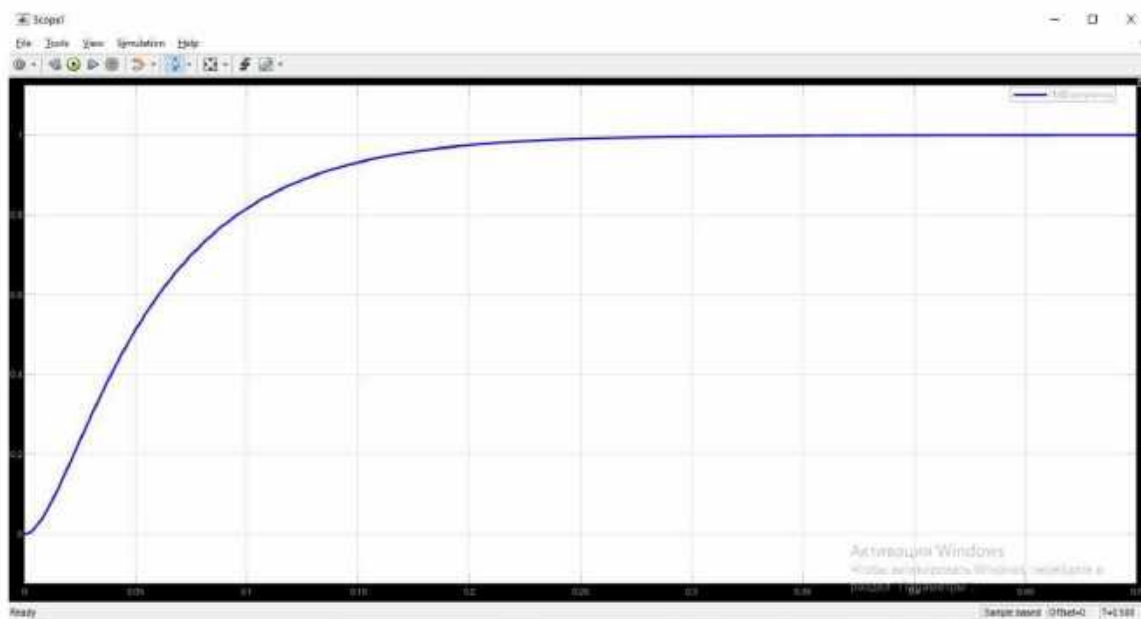
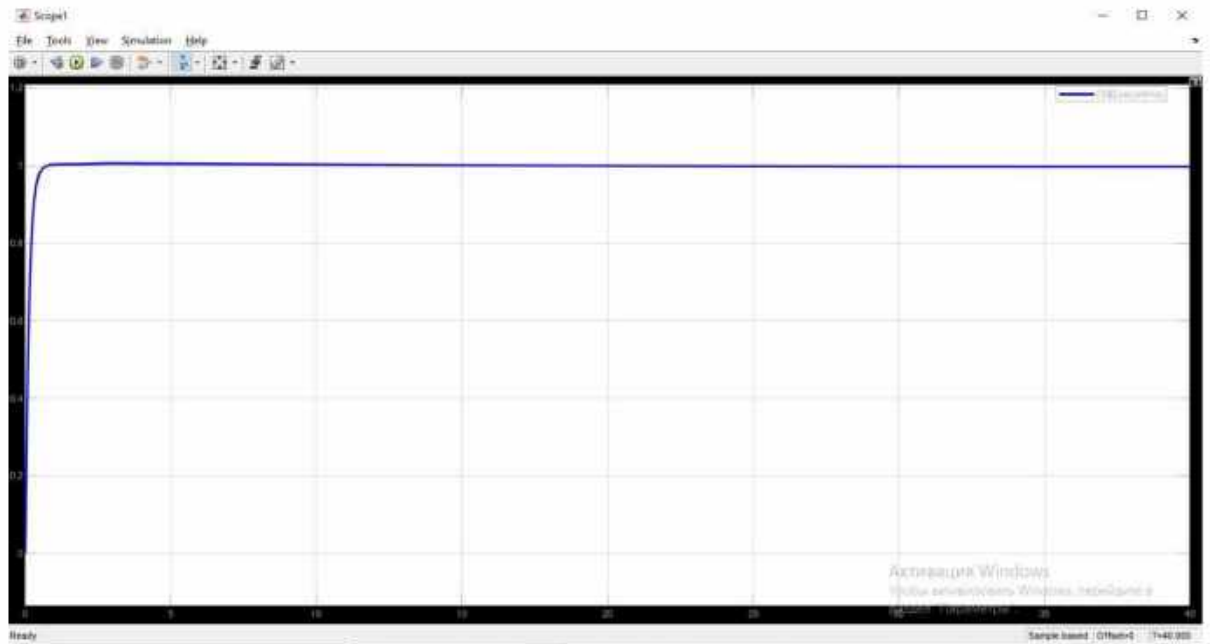
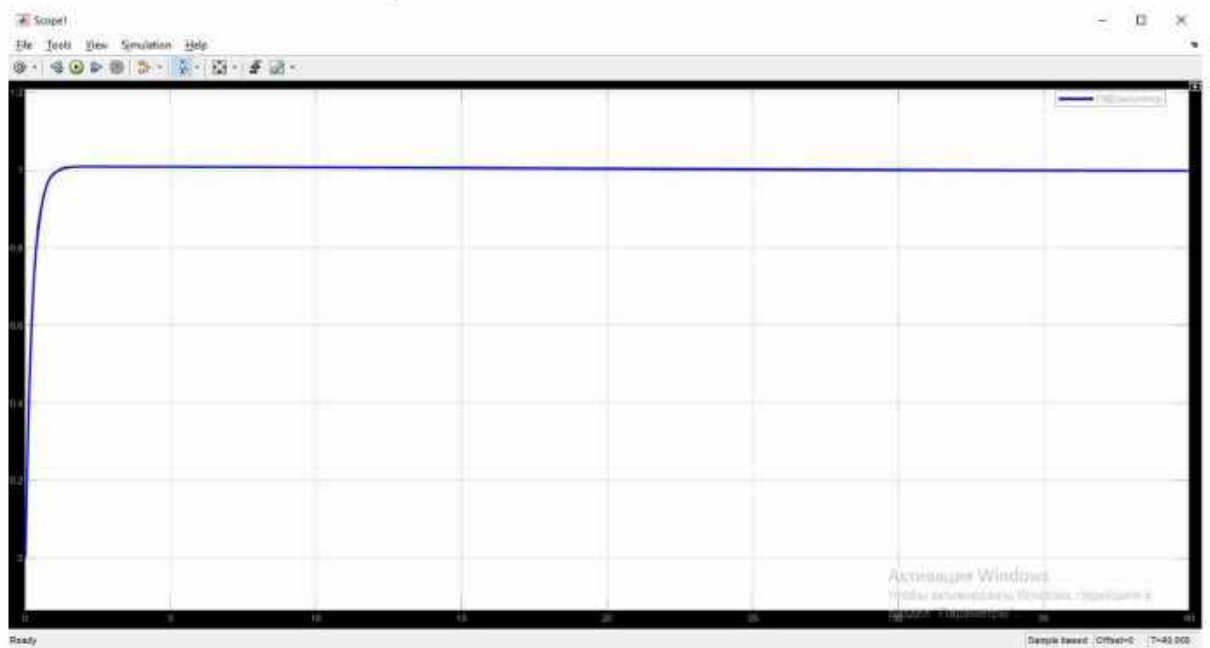
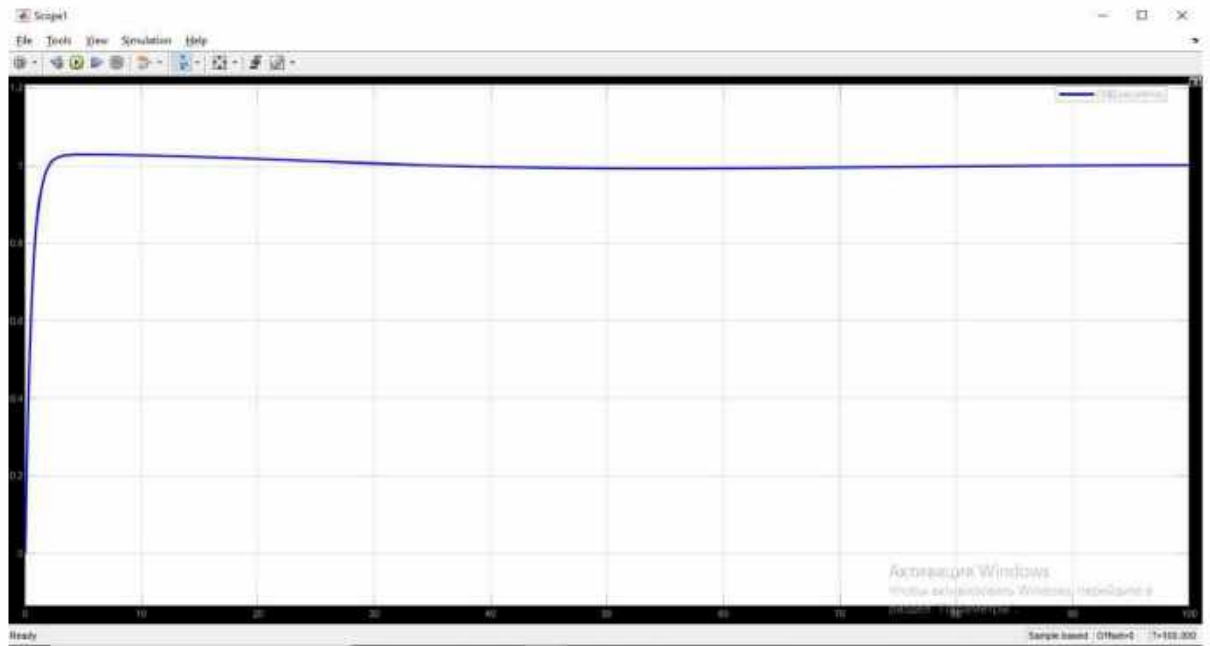
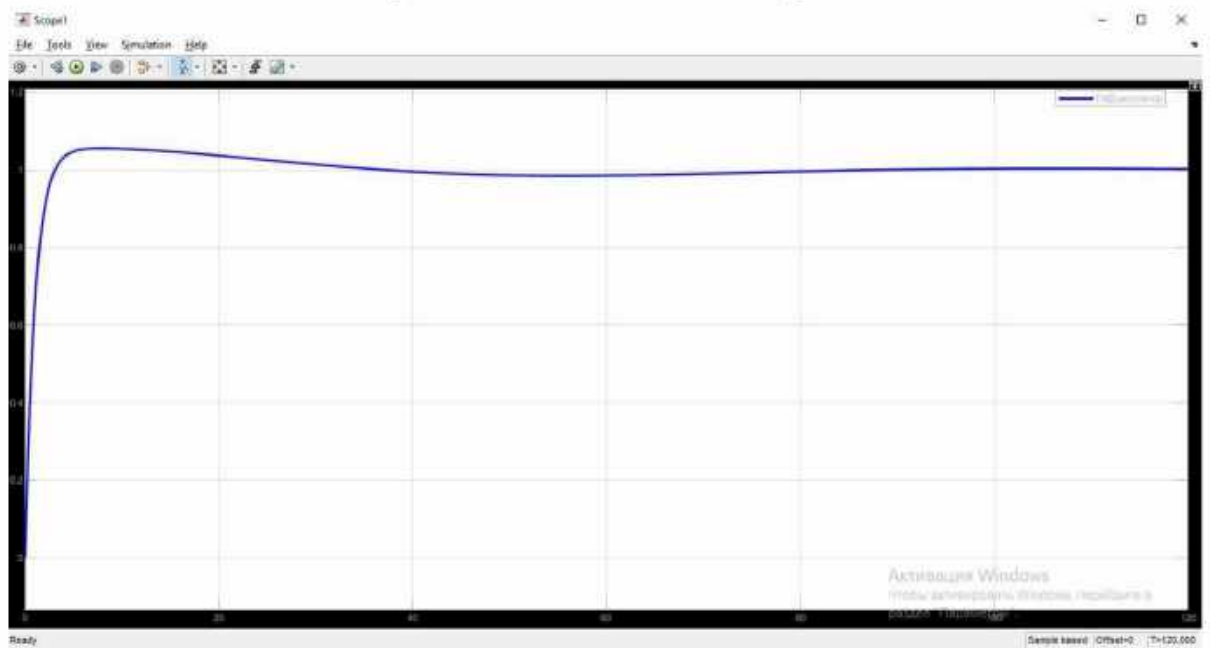
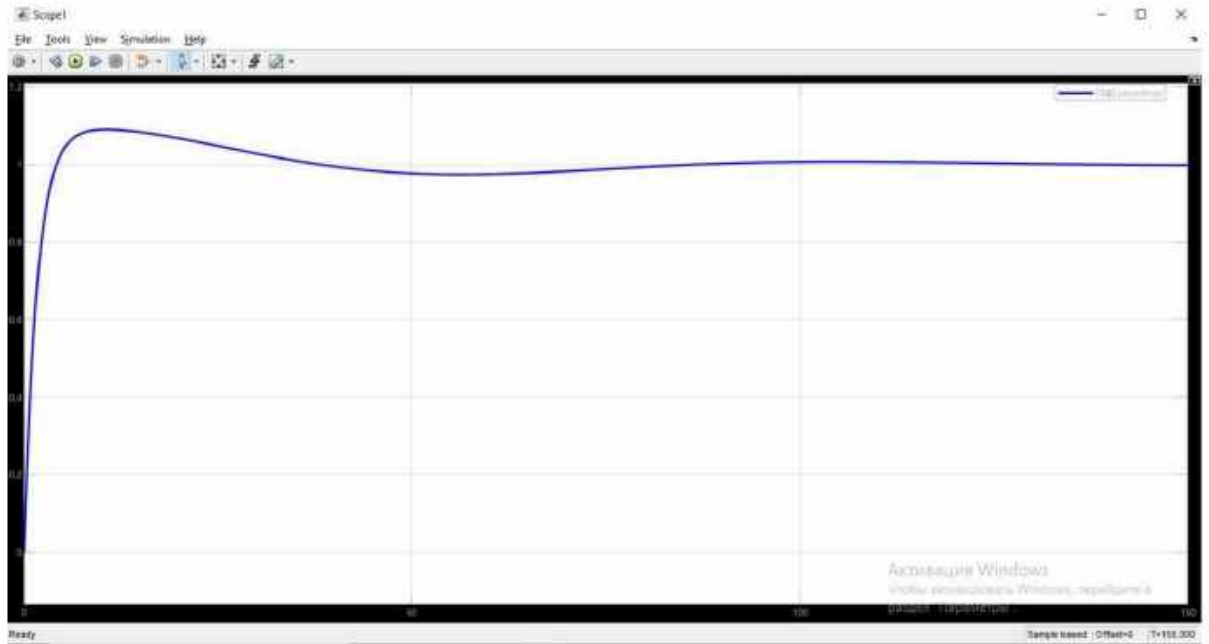
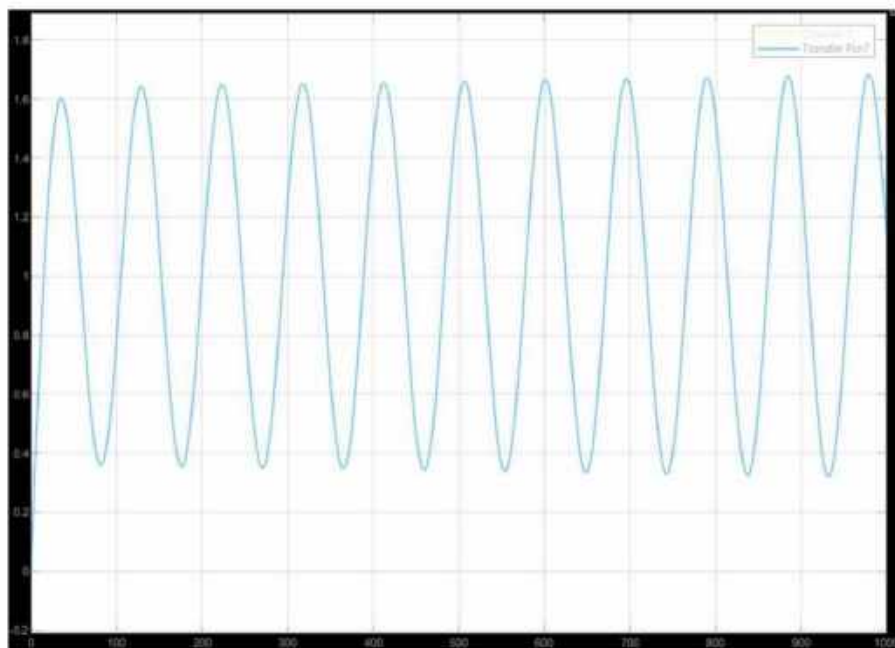


Рисунок 21 – Вихід системи за  $T_1 = 1$

Рисунок 22 – Вихід системи за  $T_1 = 5$ Рисунок 23 – Вихід системи за  $T_1 = 10$  (базове значення)

Рисунок 24 – Вихід системи за  $T1 = 15$ Рисунок 25 - Вихід системи при  $T1 = 20$

Рисунок 26 - Вихід системи при  $T1 = 30$ Рисунок 27 - Вихід системи при  $T1 = 40$

Рисунок 28 – Вихід системи за  $T1 = 50$ Рисунок 29 - Вихід системи при  $T1 = 142,1267$ 

Система досягає нестійкості при  $T1 = 142,1267$ . Для стабілізації процесу регулювання можливі два варіанти: у випадках, коли використовується тільки ПД-регулятор це додаткове підстроювання коефіцієнтів ПД-регулятора, у випадках використання ПКУ це підстроювання коефіцієнта  $T$  передавальної функції фазового ланки коригувального пристрою. Були виконані обидва варіанти. Підстроєні

коефіцієнти ПД-регулятора рівні:  $K_p = 300$ ,  $K_i = 2$ ,  $K_d = 250$ . Підстроєний коефіцієнт  $T$  коригувального пристрою дорівнює 142. Результати моделювання для системи з переналаштованим ПД-регулятором представлені на рис 30, для системи з КУ на рис 31. В обох випадках вдалося домогтися виходу системи на задану уставку Варто, однак, зауважити, що в рамках даної роботи оперування здійснювалося лише коефіцієнтом  $T$  коригувального пристрою, проте як було сказано раніше його збільшення одночасно з поліпшенням якості регулювання веде також до підвищення часу регулювання, тому щоб домогтися прийнятних часових показників у реальних системах повинна також проводитися і підстроювання коефіцієнта посилення коригувального пристрою. бралася до уваги.

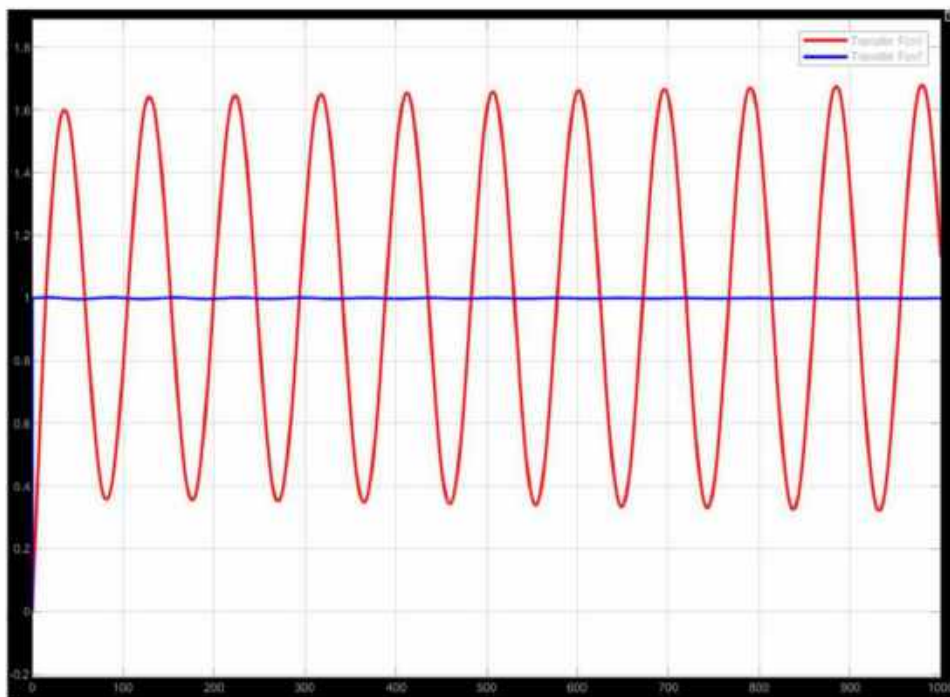


Рисунок 30 – Вихід системи при скоригованих налаштуваннях ПД-регулятора

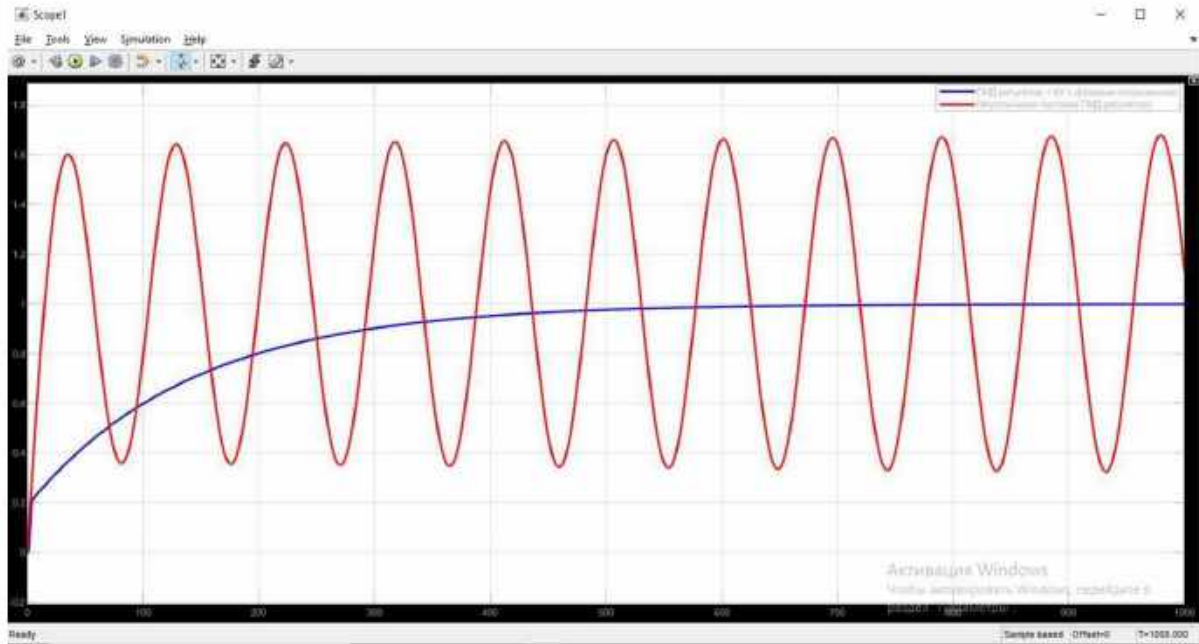


Рисунок 31 – Вихід системи при додаванні псевдолінійного КУ із фазовим випередженням

Наступним етапом стало доопрацювання вихідних схем Matlab Simulink та впровадження в них блоків нечіткої логіки. Вхідними впливами для нечіткого блоку ПД-регулятора є помилка регулювання, а також інтеграл та похідна від неї. Вихідними параметрами є параметри ПД-регулятора  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Схема управління Matlab Simulink представлена малюнки 32 - 33.

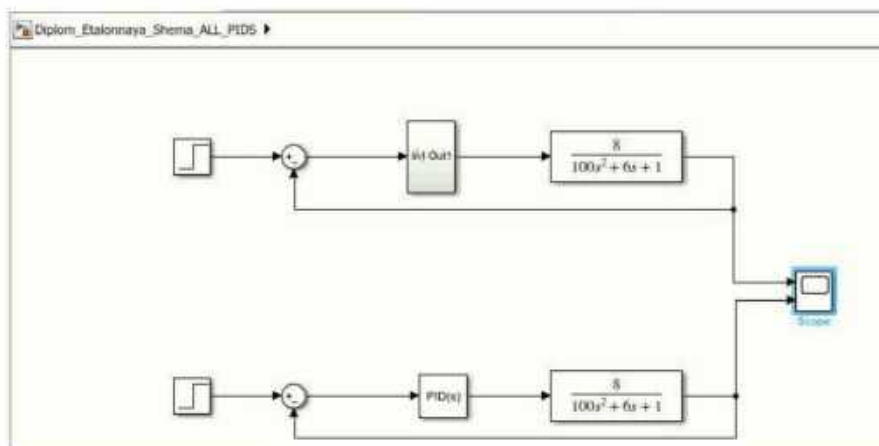


Рисунок 32 - Simulink – схема для ПД-регулювання

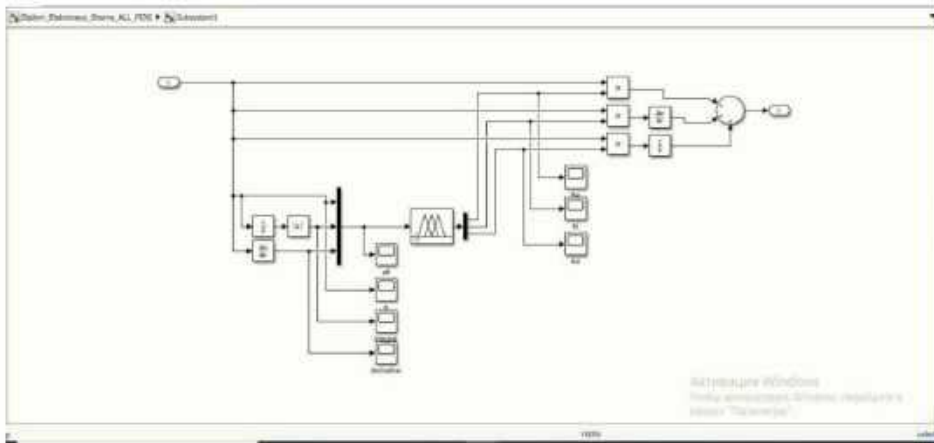


Рисунок 33 - Simulink – схема для ПД-регулювання, контур нечіткого керування

Структура нечіткого регулятора розроблялася у пакеті Matlab Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою цієї утиліти можна за допомогою графічного інтерфейсу проводити розробку нечітких систем. З її допомогою були розроблені набори функцій приналежності за вхідними та вихідними змінними, а також база правил. Вони представлені на рис. 34 – 41.

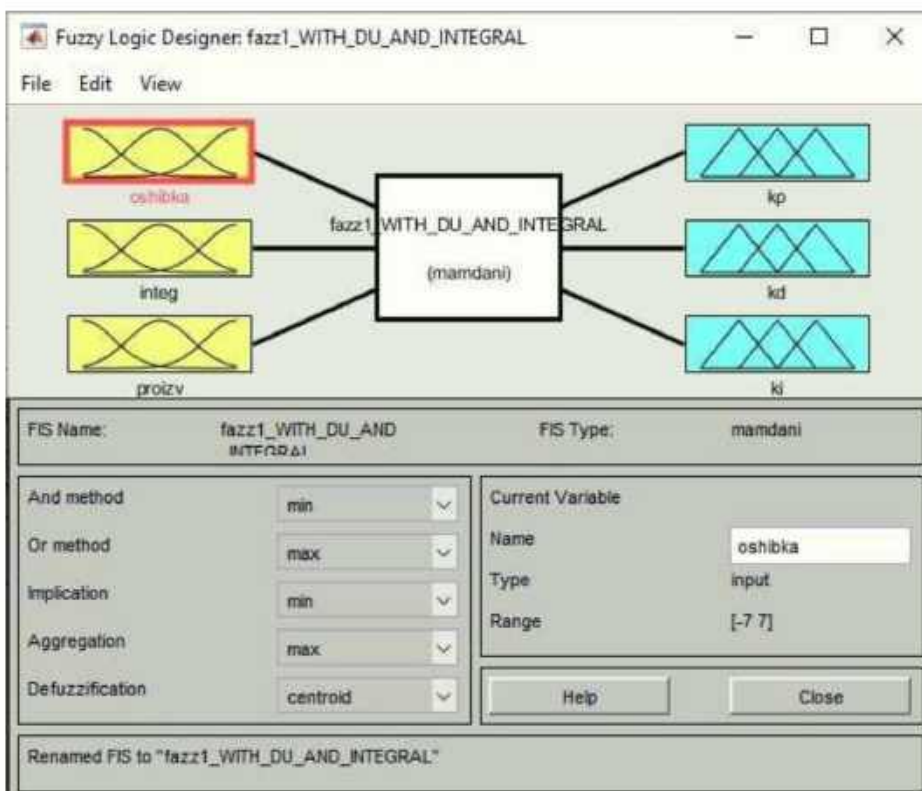


Рисунок 34 - Загальний вигляд нечіткого ПД-регулятора

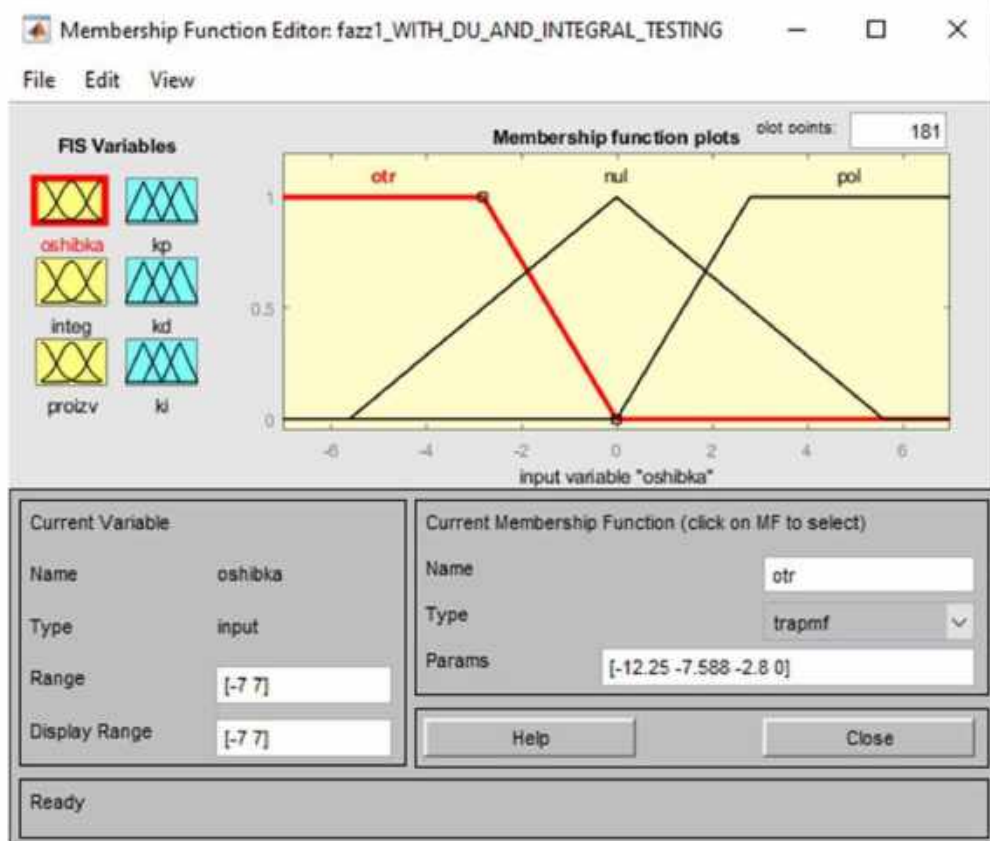


Рисунок 35 - Функція приладдя помилки

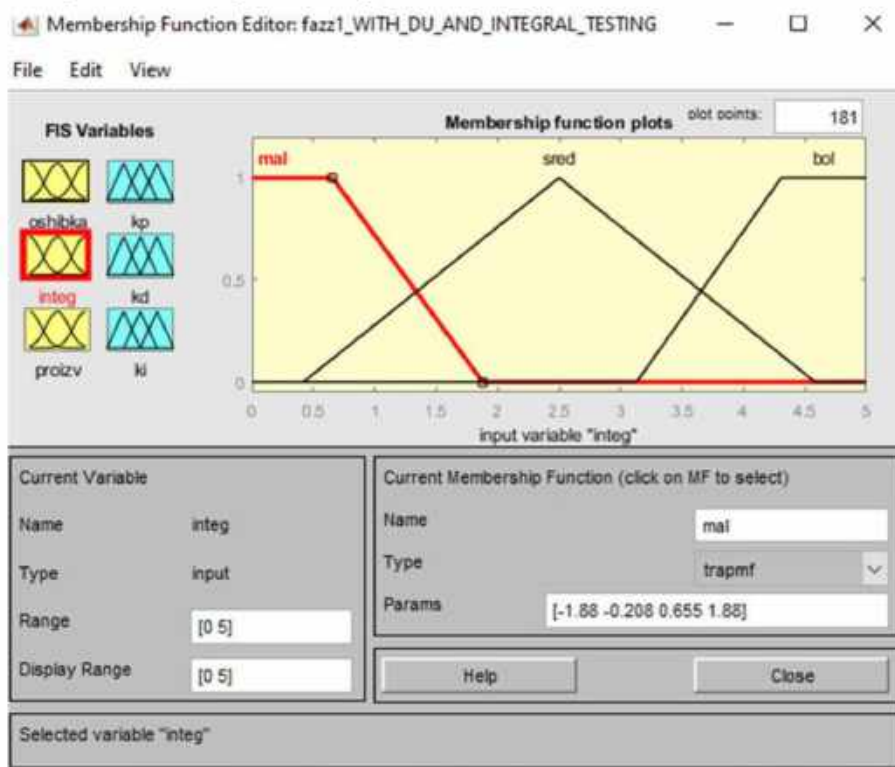


Рисунок 36 - Функція приладдя інтеграла помилки

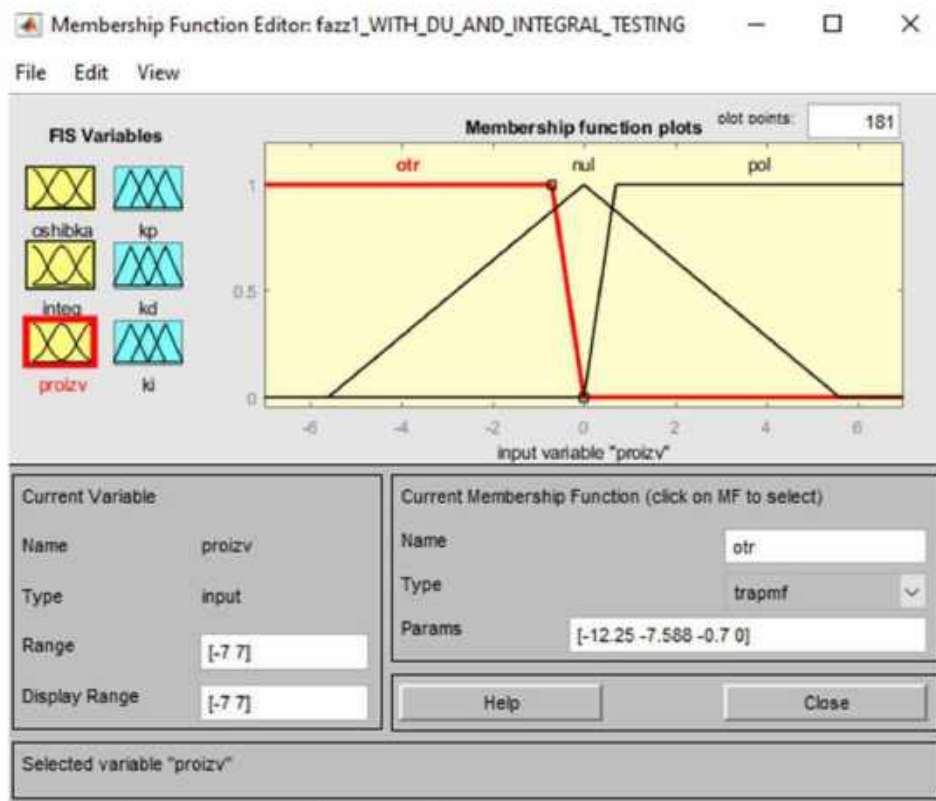


Рисунок 37 - Функція приладдя похідної помилки

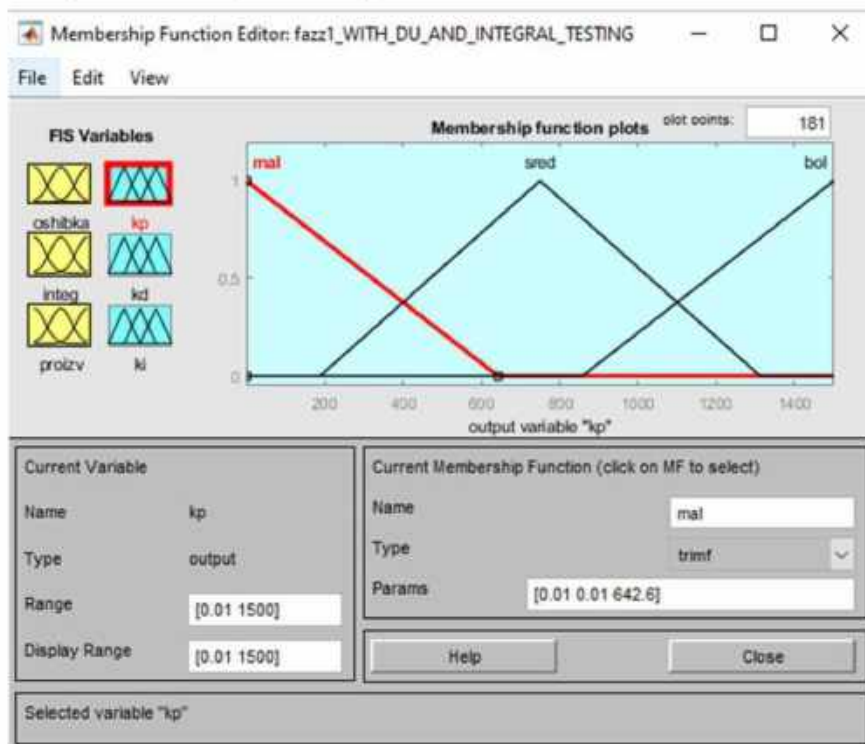


Рисунок 38 - Функція приладдя Кр

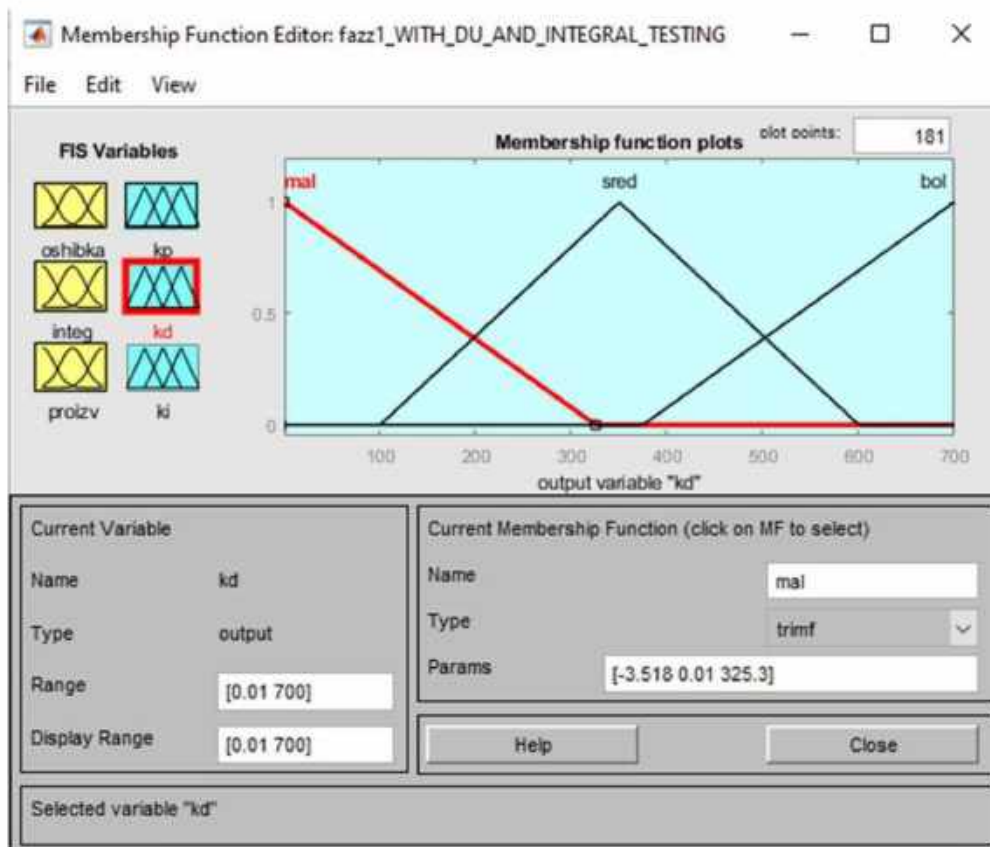


Рисунок 39 - Функція приладдя Kd

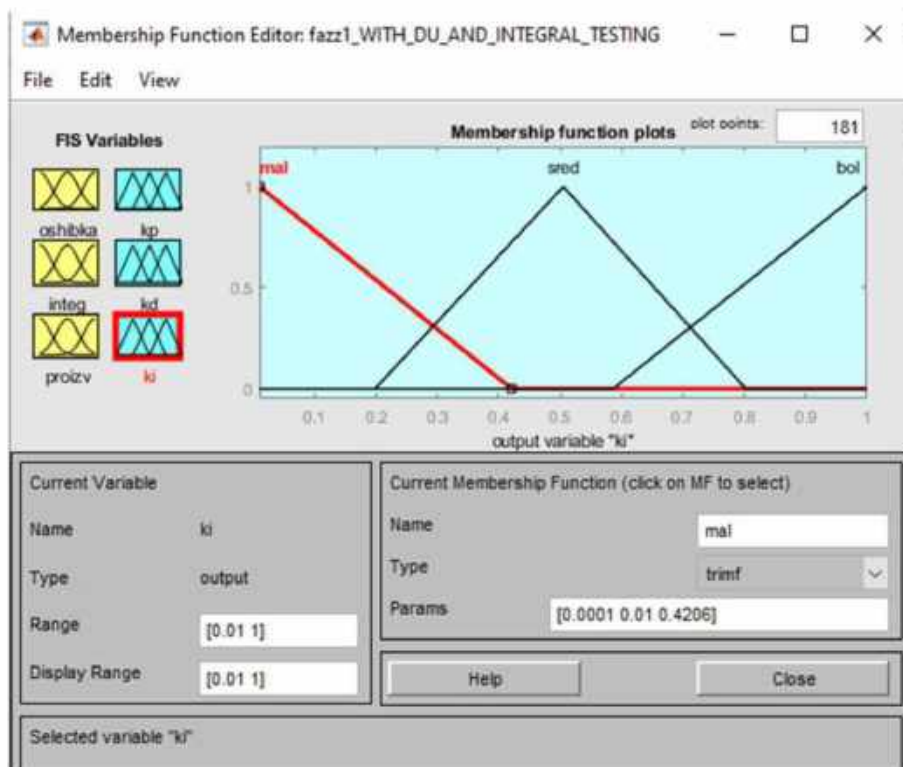


Рисунок 40 - Функція приладдя Ki

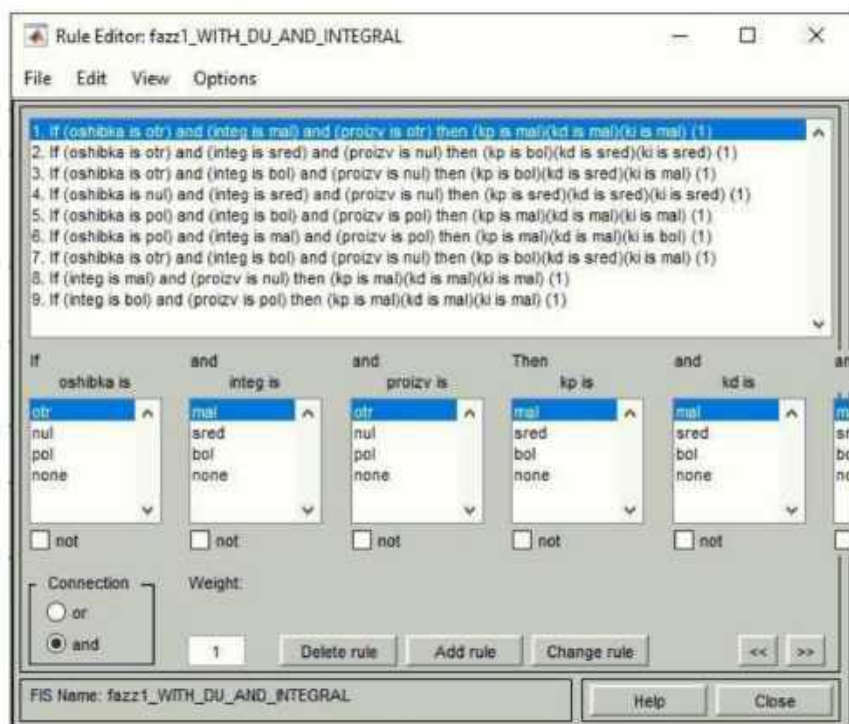


Рисунок 41 - База правил

Результати регулювання за базових параметрів ОУ представлені рис 42.



Рисунок 42 - Результати ПД-регулювання при базовій передавальній функції

Далі було перевірено роботу нечіткого ПД-регулятора при ОУ, виведеному на

межу стійкості. Схема Matlab Simulink представлена на рис 43, результати регулювання представлені рис 44.

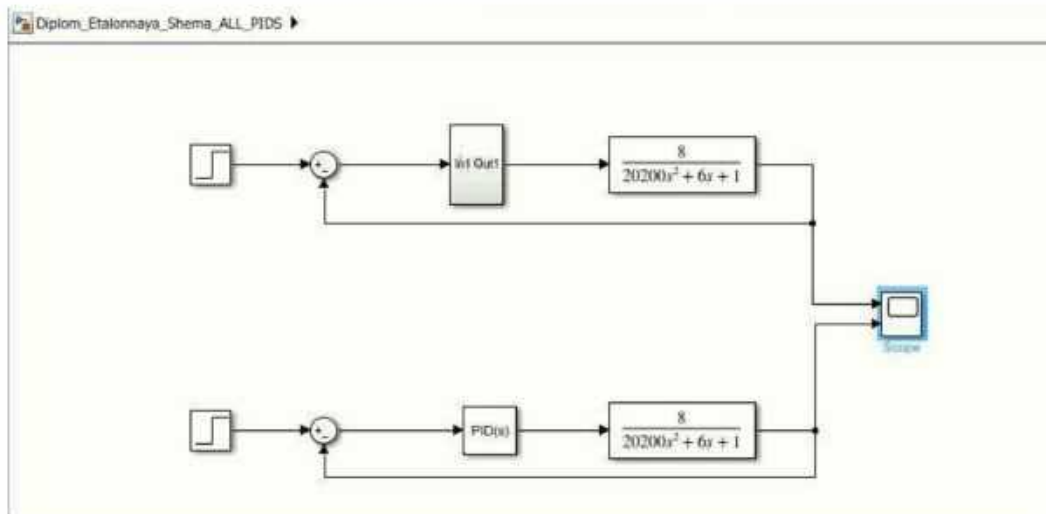


Рисунок 43 - Передатна функція, при якій ОУ виходить на межу стійкості



Рисунок 44 - Результати ПІД-регулювання

Як видно з рисунку 42 нечіткий регулятор має незначний програвш у швидкості регулювання, однак, при непостійних параметрах ОУ підлаштовується до змін

характеристик системи та дозволяє вивести систему на цільове значення, чого не може зробити звичайний ПІД регулятор, що продемонстровано на рис 44.

Далі був синтез нечіткого КУ з фазовим випередженням. Вхідним впливом для нечіткого блоку КУ є інтегральна помилка регулювання.

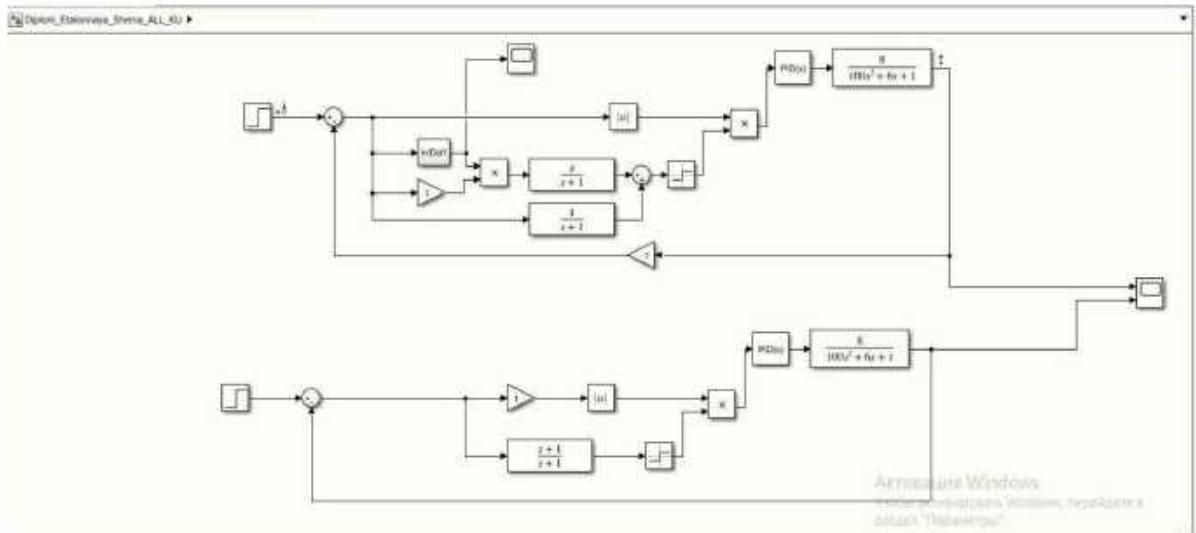


Рисунок 45 - Simulink-схема

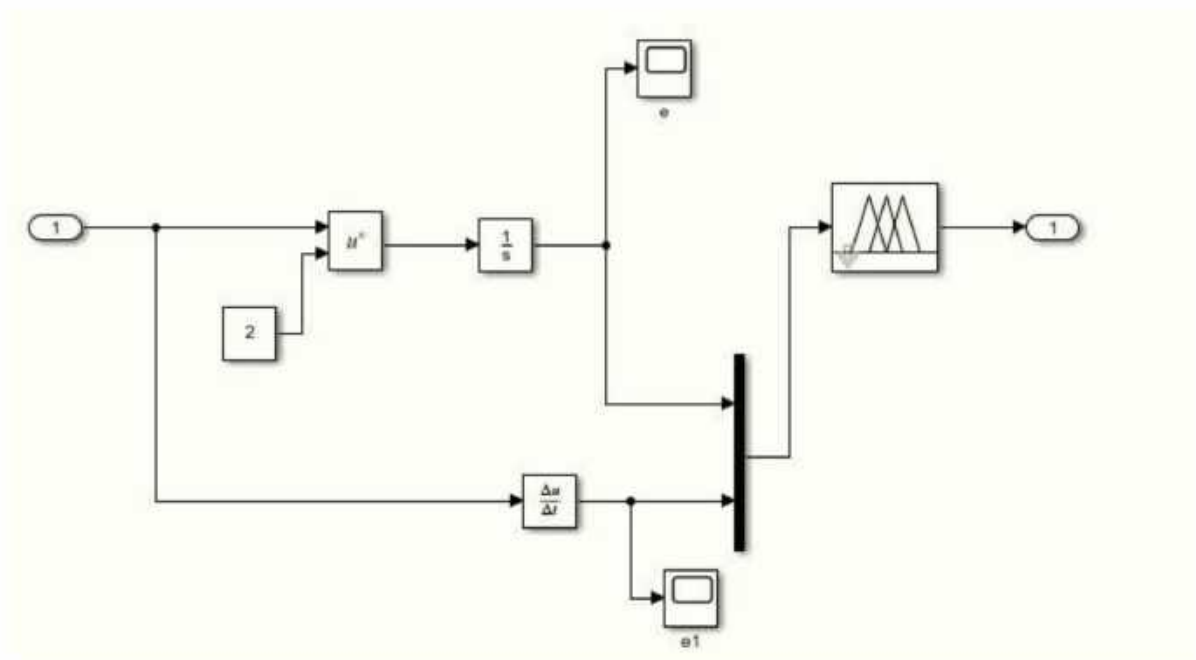


Рисунок 46 - Контур нечіткого регулювання

Вигляд функції належності вхідних та вихідних змінних, а також база правил для блоку нечіткої логіки представлена на рисунках 47-50.

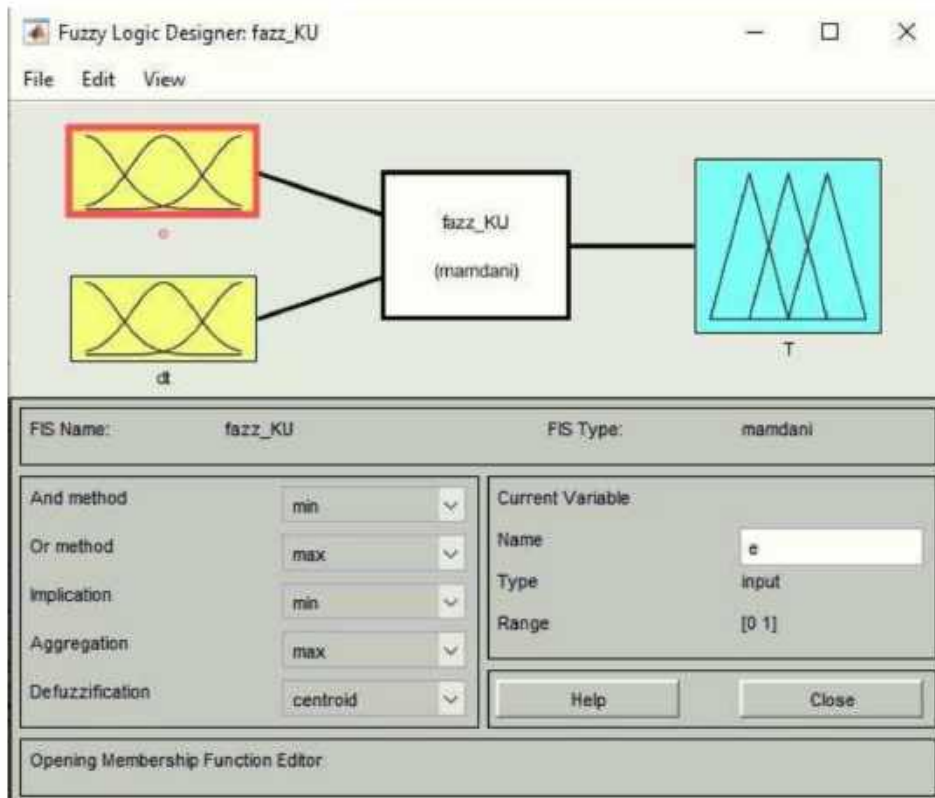


Рисунок 47 - Загальний вигляд нечіткого регулятора

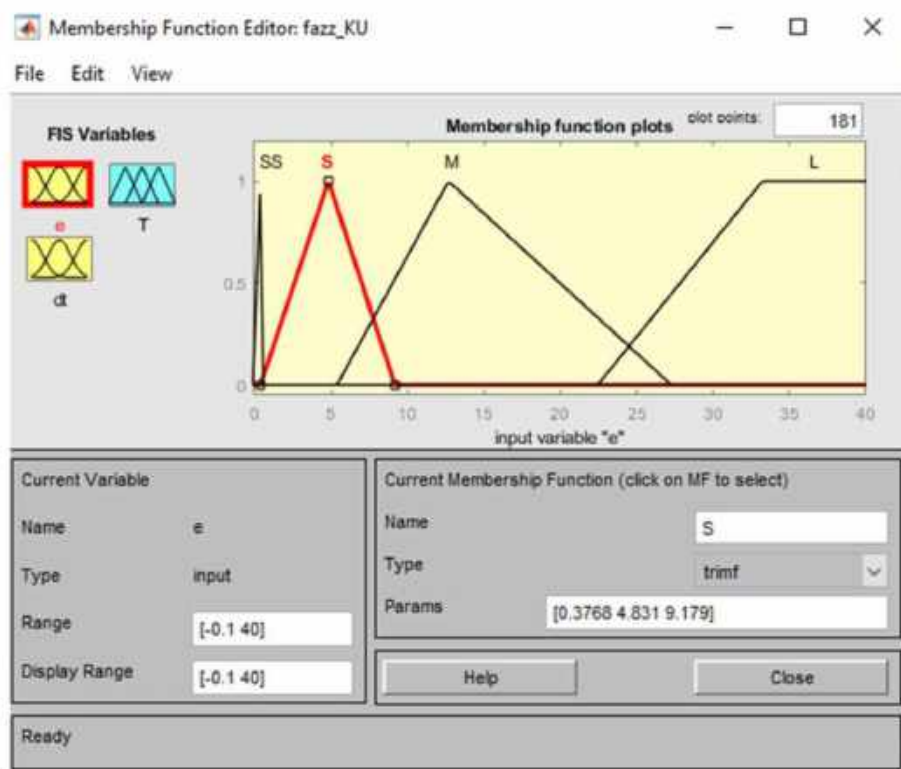


Рисунок 48 - Функція приладдя помилки

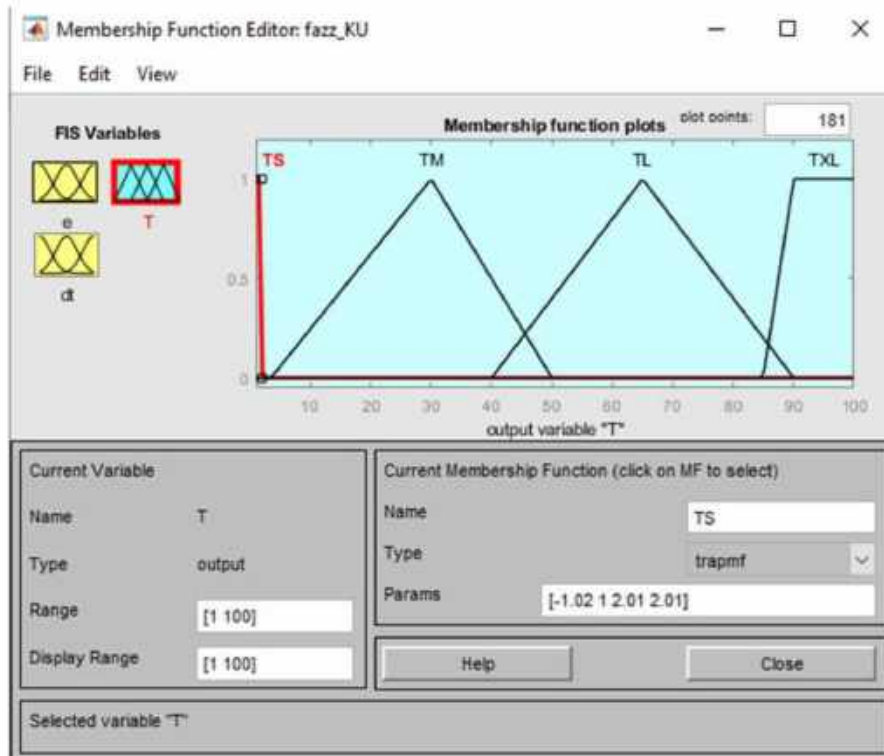


Рисунок 49 - Функція приналежності коефіцієнта коригувального пристрою T

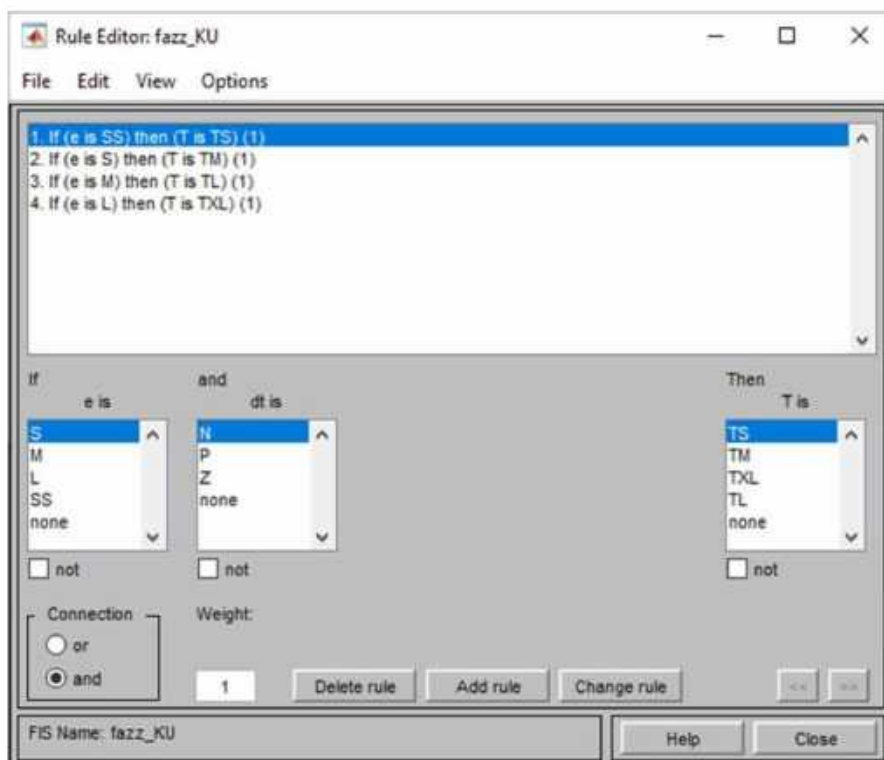


Рисунок 50 - База правил

Далі було перевірено роботу нечіткого псевдолінійного КУ з фазовим

випередженням при ОУ зі стандартними параметрами та ОУ виведеному на межу стійкості. Результати моделювання подано на рисунках 51, 52.



Рисунок 51 - Результати роботи за базової функції

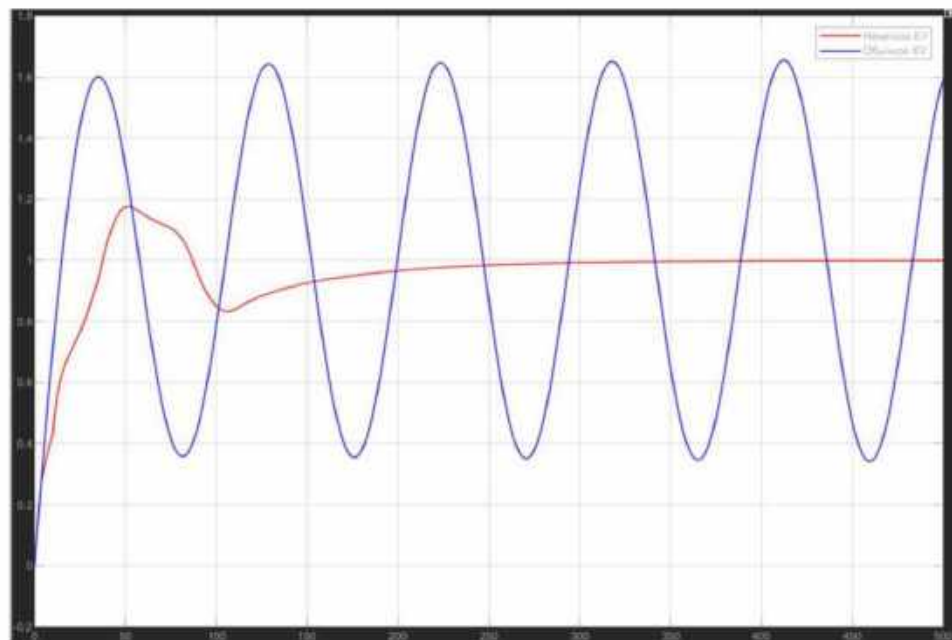


Рисунок 52 - Результати роботи при передавальній функції системи, що змінилася.

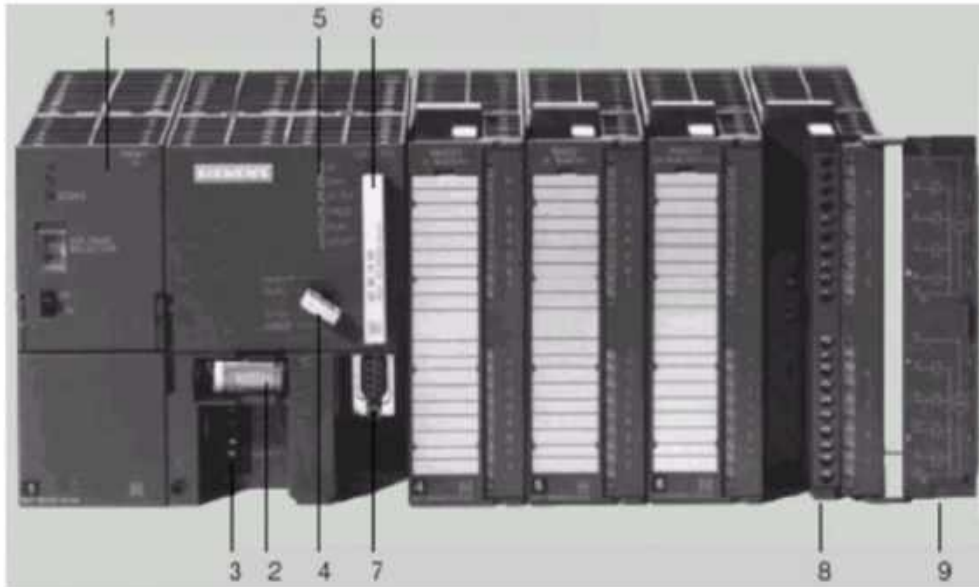
Як видно з малюнків 51 та 52 у разі базових параметрів об'єкта управління використання нечіткого КУ практично не дає переваги як регулювання. Якщо порівнювати роботу КУ з ПІД-регуляторами звичайного та нечіткого виконання, то можна помітити незначну перевагу у швидкості регулювання перед нечітким ПІД-регулятором, проте обидва нечіткі пристрої програють у швидкодії звичайному ПІД-регулятору. У випадку з нечітким КУ цю проблему можна нівелювати за рахунок введення додаткового контуру нечіткої логіки для підстроювання коефіцієнта посилення КУ, у разі ПІД-регулятора потрібно додаткове доопрацювання конфігурації функцій належності та бази правил.

У випадках виходу об'єкта управління на межу стійкості ПІД-регулятор і коригуючий пристрій звичайного виконання з базовими налаштуваннями не дають необхідної якості регулювання - у систем спостерігаються незатухаючі коливання у свою чергу забезпечують вихід значення процесу на задану уставку. регулятору в швидкодії (як уже неодноразово вказувалося дана проблема може бути вирішена за рахунок введення контуру нечіткого управління коефіцієнтом посилення коригувального пристрою), проте забезпечує менше значення перерегулювання і в цілому більш плавний вид перехідної характеристики.

## Розділ 4. Програмна реалізація псевдолінійного коригуючого пристрої на контролері Simatic S7-300

### 4.1. Склад контролера SIMATIC S7-300

На рис 53 представлено одну з базових конфігурацій крейта контролера SIMATIC S7-300.



1 – блок живлення; 2 – буферна батарея; 3 – клеми для підключення живлення 24В; 4 – ключ перемикання режимів роботи; 5 – світлодіоди індикації стану системи; 6 – субмодуль пам'яті; 7 – роз'єм багатоточкового інтерфейсу MPI; 8 – фронтальний з'єднувач; 9 – захисна кришка

Рисунок 53 - Зовнішній вигляд стійки контролера S7-300

### 4.2. Програмний пакет STEP7

STEP7 – комплекс програмного забезпечення для розробки, конфігурування та програмування промислових систем автоматизованого управління, в основі яких лежать технічні (лінійка ПЛК SIMATIC) та програмні (пакет візуалізації WinCC) продукти виробництва фірми Siemens.

Однією з відмінних рис пакету STEP7 є широкий набір засобів і можливостей для проектування розподілених систем автоматичного управління, до складу яких можуть входити: ПЛК, SCADA-системи, пристрої розподіленого вводу-виводу і

можливість гнучкої конфігурації мережевої структури, що забезпечує їх зв'язок. Можливість розробки може бути обмежена лише програмними та апаратними засобами на базі яких провадиться дана робота.

Перерахуємо основні засоби розробки пакету STEP7:

- SIMATIC Manager - є ключовою оболонкою користувача STEP7 з якої користувач може чітко бачити структуру проекту і швидко отримувати доступ до його компонентів або інших програмних утиліт STEP7.
- Symbol Editor – утиліта керувати простором змінних (конфігурування імен, адрес).
- Hardware Configuration – утиліта розробки конфігурації апаратних засобів проекту.
- Communication – утиліта розробки конфігурації мережевої структури системи (інформаційний обмін через інтерфейс MPI, промислові мережі PROFINET, PROFIBUS, Industrial Ethernet).
- Інформаційні функції – для моніторингу центрального процесора та режиму налагодження програм користувача.

Розробка проекту ведеться мовами стандарту MEK 61131.

У цьому роботі реалізована САР з нечітким регулятором об'єкта управління другого порядку у програмному пакеті STEP7, і перевірено її під управлінням контролера SIMATIC S7-300.

#### **4.3. Програмний пакет Simatic WinCC**

Simatic WinCC – це система моніторингу, управління та збору даних, що підтримує операційні системи сімейства Windows. WinCC забезпечує повну функціональність в управлінні та спостереженні за процесом для всіх галузей промисловості, і від простих однокористувальних до розподілених розрахованих на багато користувачів систем з резервованими серверами та інтегрованими рішеннями на основі Web-технологій. Основними можливостями Simatic WinCC є:

- візуалізація технологічного процесу;

- конфігурування та налаштування зв'язку з контролерами різних виробників;
- відображення, архівування та протоколювання повідомлень та даних від технологічного процесу;
- розширення можливостей системи за рахунок використання скриптів мовами ANSI C, VBS та VBA;
- формування звітів;
- взаємодія з іншими додатками, у тому числі через мережу, шляхом використання стандартних інтерфейсів OLE (Object Linking and Embedding) та ODBC (Open Database Connectivity) забезпечує просту інтеграцію WinCC у внутрішню інформаційну мережу підприємства;
- побудова резервованих систем;
- розширення можливостей шляхом використання елементів ActiveX;
- відкритий OPC-інтерфейс;
- мультиплатформенність (вдалося досягти з виходом WinCC Open Architecture).

WinCC є модульною системою, функціонально розділеною на менеджери, які можуть розподілятися різними пристроями. Така модель дозволяє оптимально створювати розподілені системи з великою кількістю серверів і клієнтів в одній системі (2048 і 255 відповідно), а також забезпечує широкі можливості масштабування системи. Масштабованість систем на базі WinCC також досягається за рахунок великої кількості драйверів, які здійснюють обмін інформацією з різними пристроями та суміжними системами.

WinCC є частиною системи комплексної автоматизації (Totally Integrated Automation), що дозволяє розглядати цю систему як із частин максимально уніфікованого проекту. Це дозволяє отримати високу інтеграцію з усіма компонентами іншими компонентами у системі та можливість роботи в єдиному

інформаційному просторі. Так, наприклад, база змінних проекту доступна для інструментів розробки всіх рівнів, що дозволяє значно знизити помилки при розробці, позбавляє необхідності імпорту-експорту даних, а також забезпечує можливість одночасної роботи з різними частинами проекту.

При розробці проектів WinCC використовується об'єктно-орієнтований підхід: кожен об'єкт є образом конкретного фізичного пристрою. Є можливість створення та роботи з довільними ієрархічними структурами даних за рахунок типізації та успадкування. Такі принципи відносяться як до структур даних, так і до графічних об'єктів.

Дуже важливою перевагою для розробників є можливість генерації шаблонів екранних форм (таких як інтерфейс навігації, вікно алармів), а також велика бібліотека стандартних елементів. За рахунок цього можна значно підвищити швидкість розробки та скоротити кількість помилок при створенні екранних форм.

Також можливості розробника доповнюються за рахунок використання скриптової обв'язки мовами VBA та C, що дозволяють створювати гнучкі сценарії та алгоритми візуалізації.

З погляду зручності роботи розробника WinCC є неоднозначною системою. Для досвідчених користувачів дана система надає більше можливостей у порівнянні з іншими системами: це і об'єктно-орієнтований підхід, і робота в рамках концепції Totally Integrated Automation, та можливість генерації та використання вбудованих екранних форм. Однак для розробки проектів у WinCC користувач повинен мати набір базових і відпрацьованих знань і навичок. істотні та критичні помилки у проекті. Тому на початковому етапі по можливості необхідно вести роботу у WinCC під керівництвом та наглядом. досвідченого програміста.

До того ж, серйозним недоліком WinCC можна вважати спрямованість даної системи на використання у зв'язці з компонентами (датчиками, контролерами, панелями) виробництва компанії Siemens. Хоча в теорії передбачається взаємодія WinCC із системами та пристроями інших виробників, на практиці можуть виникнути значні проблеми при його налаштуванні. Тому якщо передбачається будувати систему на основі виробів з різною номенклатурою та від різних виробників, слід

вибрати інший SCADA-пакет.

#### **4.4. Програмна реалізація нечіткого псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням у пакеті STEP7**

Програмну реалізацію нечіткого псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням можна подати у вигляді 5 основних етапів: обчислення помилки регулювання, реалізація механізмів нечіткої логіки для обчислення коефіцієнта  $T$  коригувального пристрою, реалізація ПІД-регулятора та моделювання об'єкта управління. Дані операції представлені у структурному елементі проекту Step7 – організаційному блоці OB1, який відповідає за циклічне виконання програми. Спочатку відбувається обчислення інтегральної квадратичної помилки, яка є вхідним сигналом блоку нечіткої логіки, в якому обчислюється значення коефіцієнта  $T$  передавальної функції коригувального пристрою. Після цього відбувається обчислення помилки регулювання, яка подається на вхід блоку нечіткого пристрою, що коригує, з фазовим випередженням. Скоригований сигнал подається на вхід ПІД-регулятора, який у свою чергу виробляє вплив на об'єкт управління, що управляє. Значення сигналу, що регулюється, подається на блок обчислення інтегральної квадратичної помилки, після чого весь цикл починається заново. Блок OB1 реалізований мовою FBD, його листинг наведено на рис. 54 - 57.

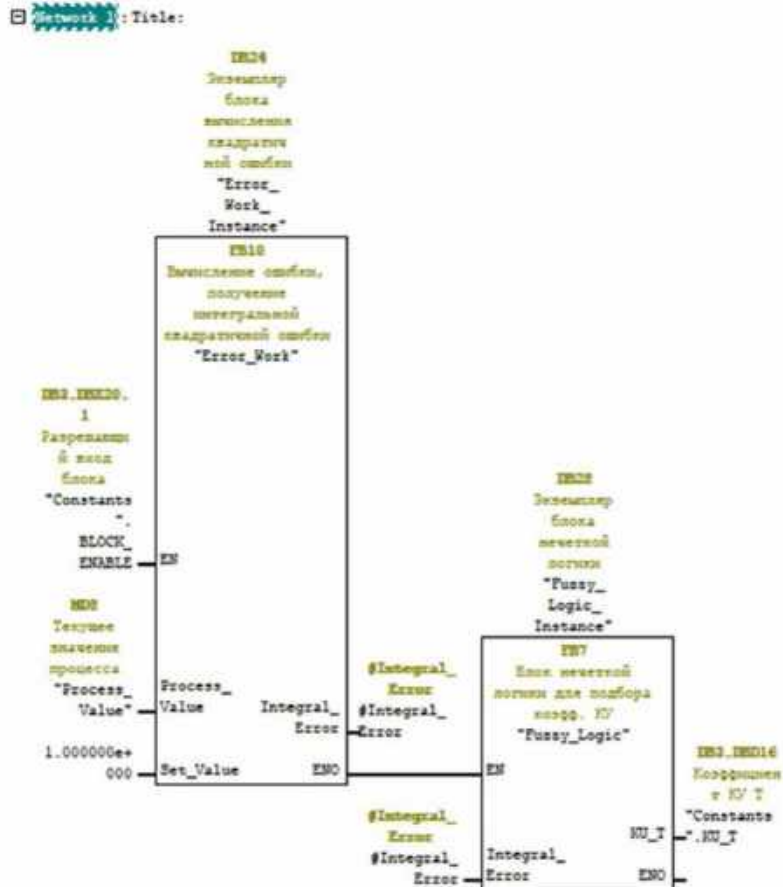


Рисунок 54 – Блок ОВ1, обчислення інтегральної квадратичної помилки та блок нечіткої логіки

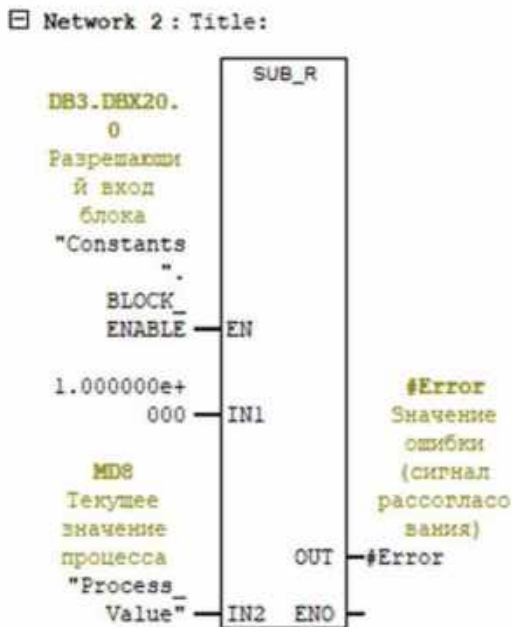


Рисунок 55 – Блок ОВ1, обчислення помилки регулювання



SCL. Опишемо їх нижче

#### 4.3.1. Блок передавальної функції КУ

У даному блоці реалізується програмний двійник типової передавальної функції фазового каналу псевдолінійного КУ з фазовим випередженням. На вхід подається значення помилки регулювання, виходом є вплив, що коректує.

Передатна функція фазового каналу коригувального пристрою може бути представлена у вигляді набору найпростіших математичних операцій і в такому випадку набуває наступного вигляду:

$$W_{\phi} = \frac{1}{T_1} * \left( T + \frac{1}{s} \right) * \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1} * \frac{1}{s}}. \quad (23)$$

Ця формула реалізується за допомогою стандартних математичних блоків STEP7, листинг блоку представлений на рисунках 58 - 60.

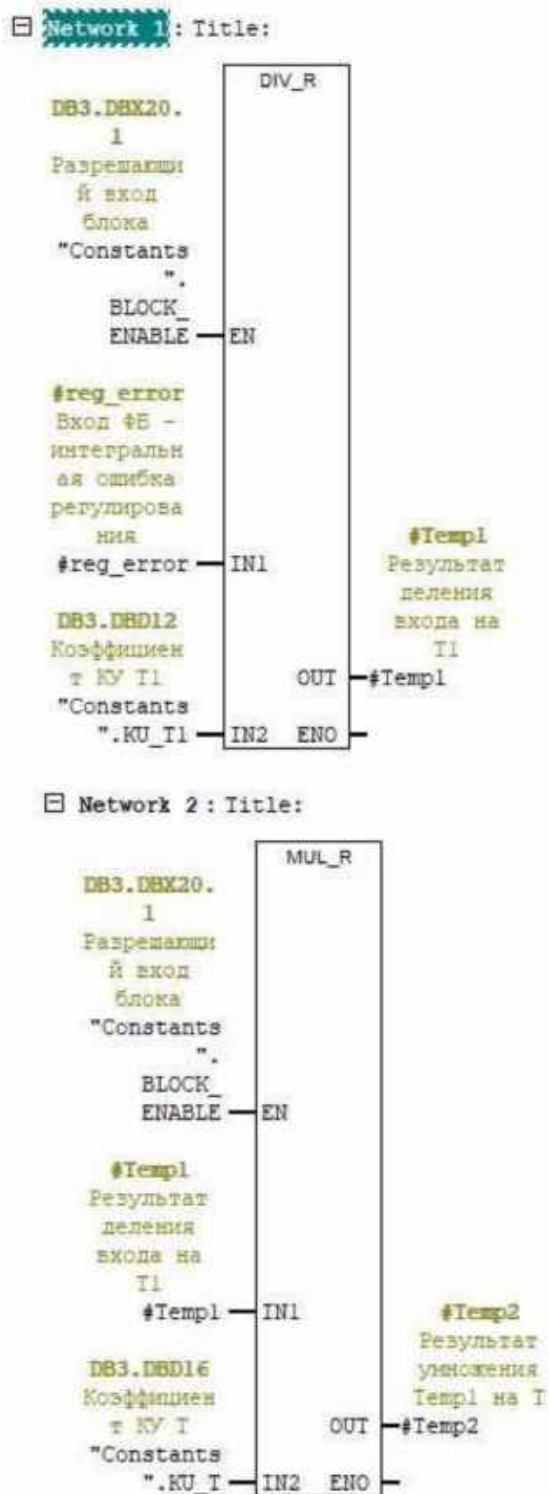
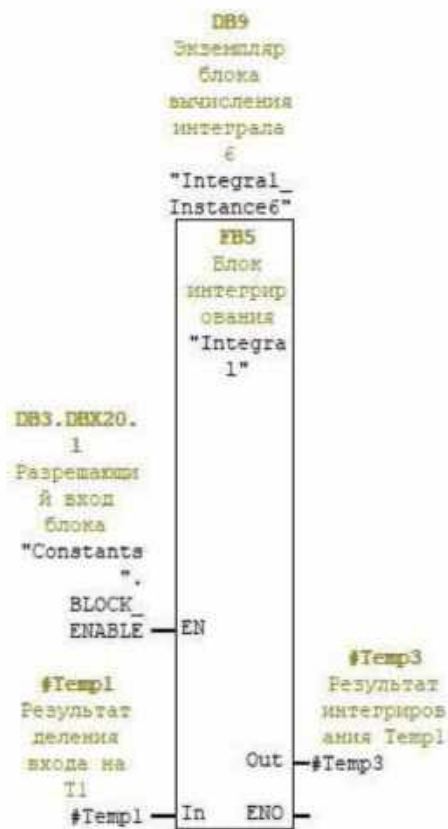


Рисунок 58 – Початок реалізації передавальної функції КУ із фазовим випередженням

Network 3 : Title:



Network 4 : Title:

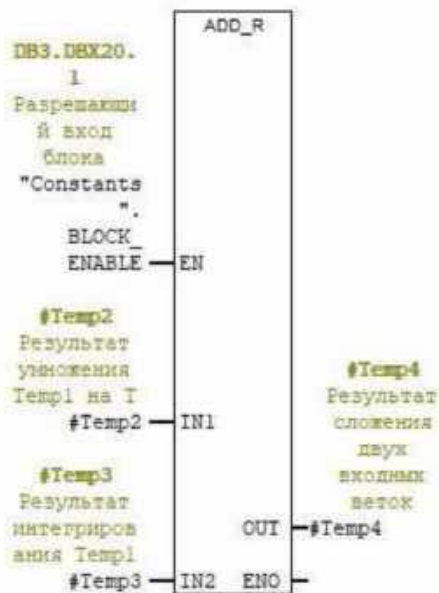
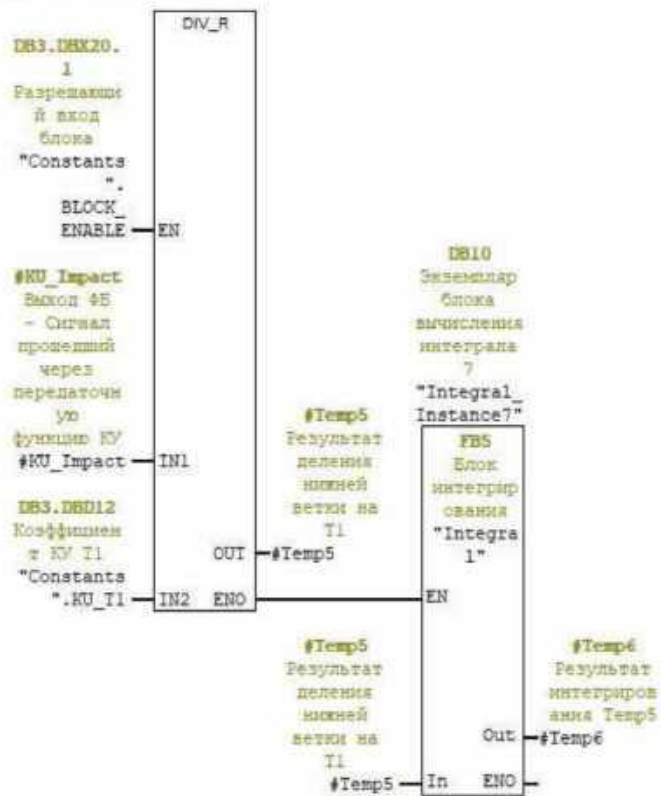


Рисунок 59 - Продолжения реализации передаваемой функции КУ с фазовым опережением

Network 5 : Title:



Network 6 : Title:

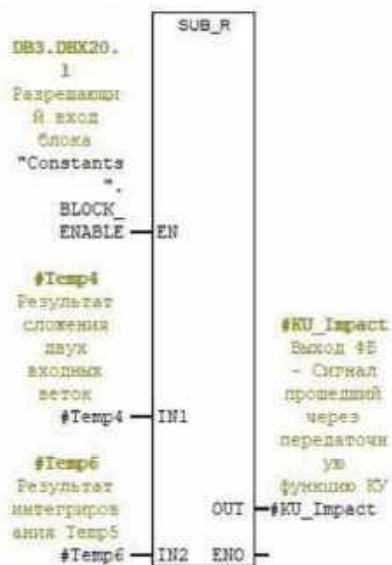


Рисунок 60 - Кінець реалізації передавальної функції КУ з фазовим випередженням

#### 4.3.2. Блок передавальної функції ОУ

У цьому блоці реалізується програмний двійник типової передавальної функції об'єкта управління другого порядку. На вхід подається управляюча дія з ПІД-регулятором, виходом є поточне значення процесу.

Передатна функція об'єкта управління другого порядку може бути так само як і передатна функція коригувального пристрою бути представлена у вигляді найпростіших математичних операцій:

$$W_{\phi} = \frac{K}{T_2 * s^2 + T_1 * s + 1} = K * \frac{1}{s^2} * \frac{1}{T_1} * \frac{1}{1 + \frac{T_2}{T_1} * \frac{1}{s} + \frac{1}{T_1} * \frac{1}{s^2}}. \quad (24)$$

На рис 61 представлено еквівалентну структурну схему ОУ другого порядку.

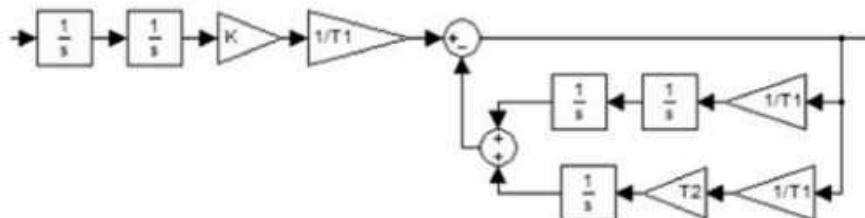


Рисунок 61 – Структурна схема об'єкта управління другого порядку представлена у вигляді найпростіших математичних операцій.

#### 4.3.3. Блок визначення сигналу

Цей блок реалізує визначення знаку вхідного сигналу. Якщо сигнал є позитивним вихід блоку дорівнює 1, якщо сигнал негативний вихід блоку дорівнює -1, якщо сигнал дорівнює 0, то вихід блоку також дорівнює 0. Лістинг блоку представлений на рис 62.

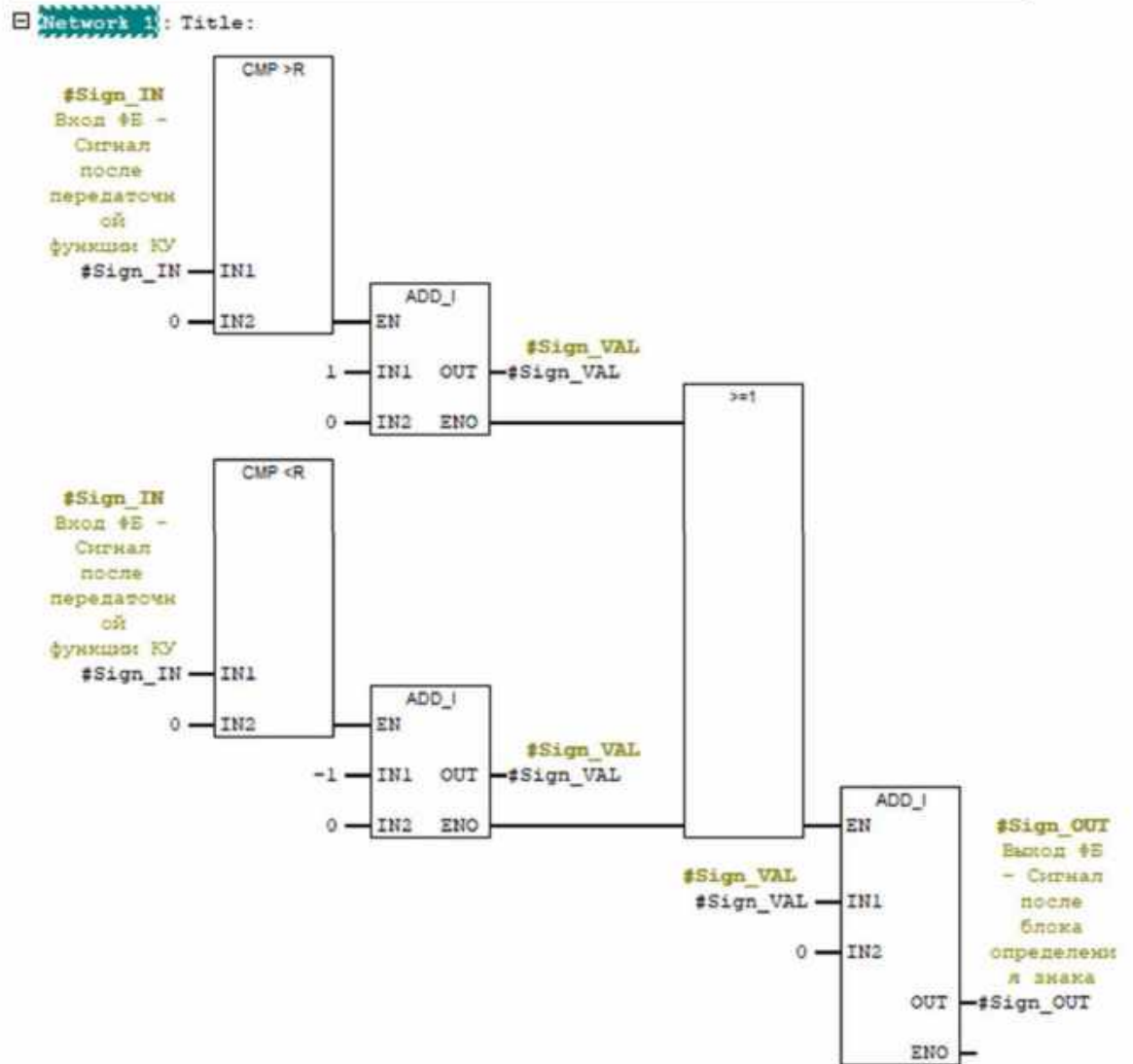


Рисунок 62 – Блок реалізації функції визначення сигналу

#### 4.3.4. Блок фазового КУ

Цей блок повністю програмно повторює структуру псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням. Нижня гілка реалізується за допомогою блоків користувача передавальної функції КУ і визначення знака сигналу. Верхня гілка реалізована за допомогою стандартних блоків STEP7. Виходом цього блоку є добуток цих гілок. Лістинг блоку представлений на рис. 63 – 65.

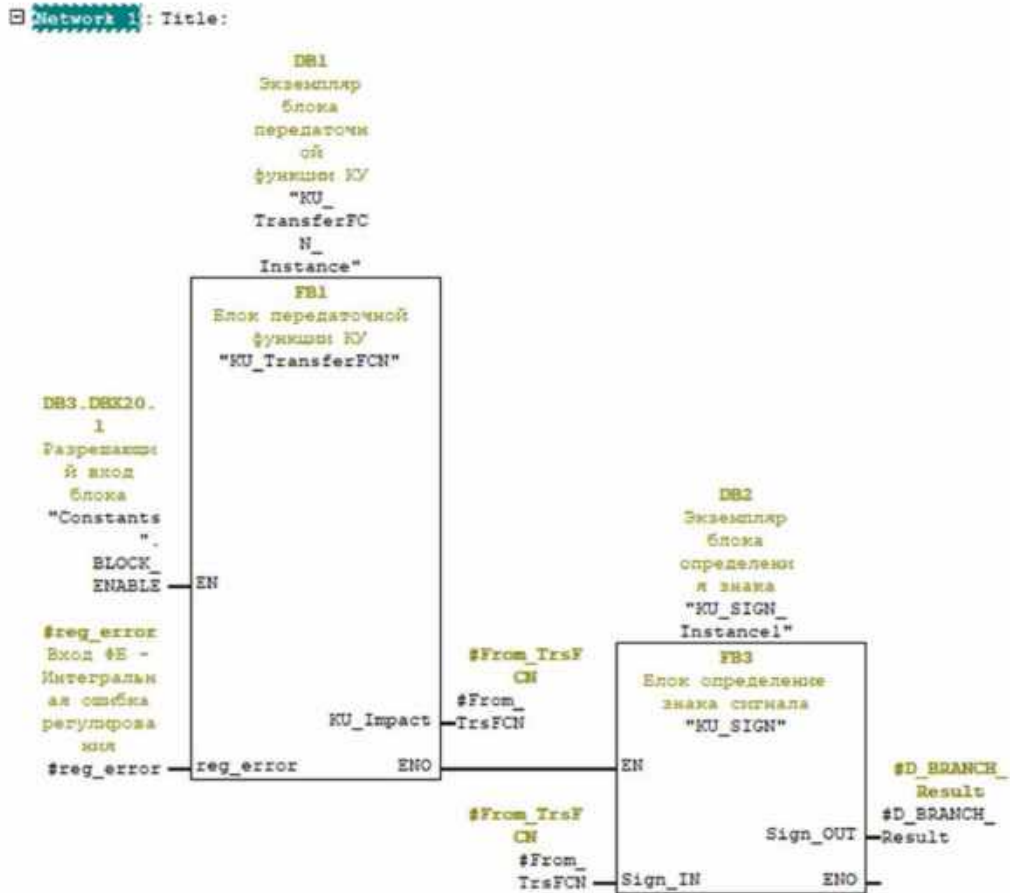


Рисунок 63 – Блок реалізації КУ з фазовим випередженням, початок листингу

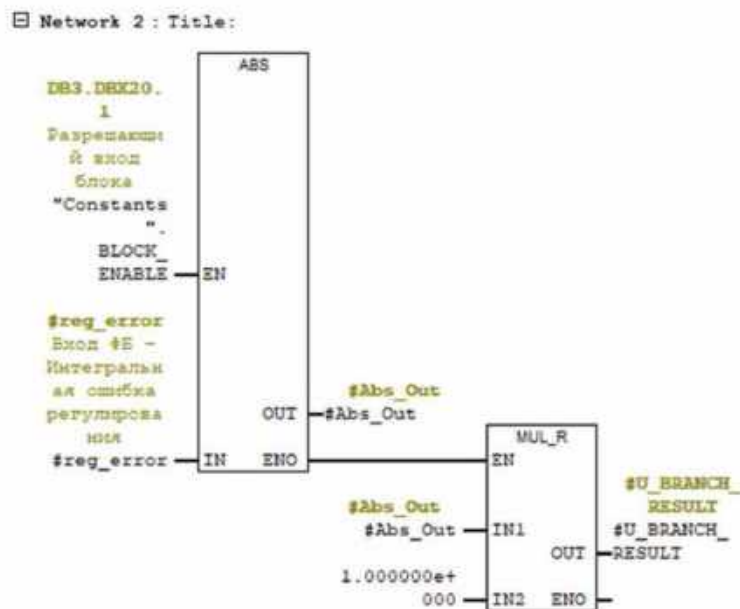


Рисунок 64 - Блок реалізації КУ з фазовим випередженням, продовження лістингу

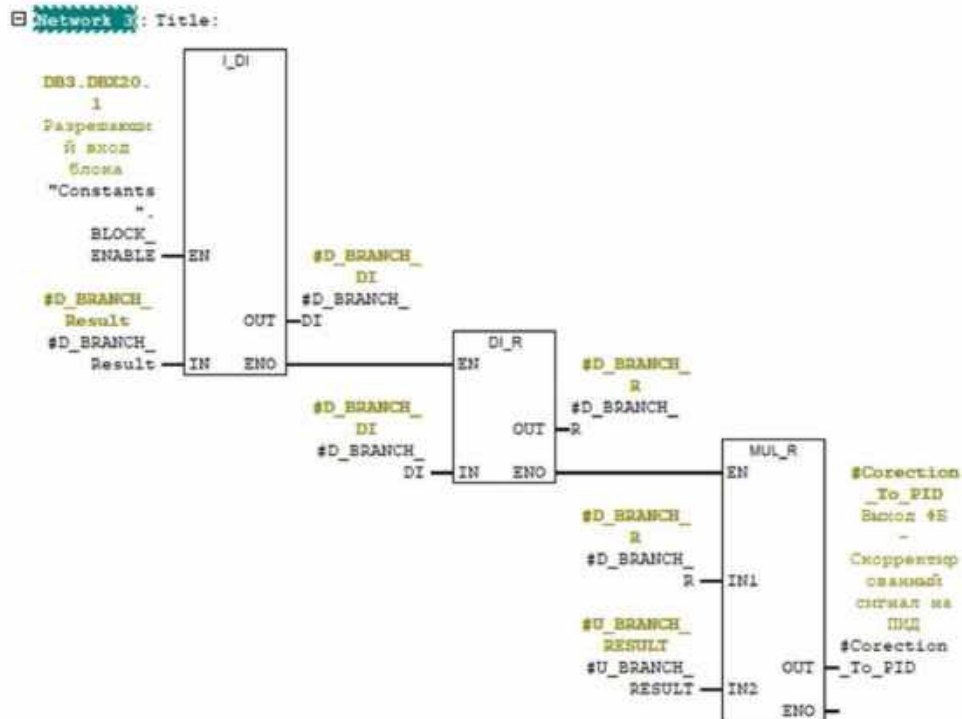


Рисунок 65 - Блок реалізації КУ з фазовим випередженням, кінець лістингу

#### 4.3.5. Блок обчислення інтегралу

В основі даного блоку лежить інтегрування методом лівих прямокутників, що здійснюється за формулою:

$$\int_a^b f(x)dx = h \sum_{i=0}^{n-1} f_i = h(f_0 + f_1 + \dots + f_{n-1}). \quad (25)$$

Суть методу полягає в наступному: функція, на яку знаходиться інтеграл, апроксимується на малих ділянках за допомогою прямокутників, площі яких і приймаються за значення інтеграла. Що стосується реалізації на ПЛК площа прямокутника обчислюється як добуток значення сигналу цьому циклі на час виконання циклу. Графічне представлення цього методу показано рис 66. Лістинг блоку наведено рис 67.

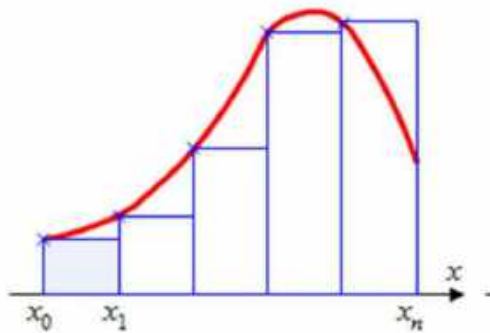


Рисунок 66 – Метод інтегрування лівих прямокутників

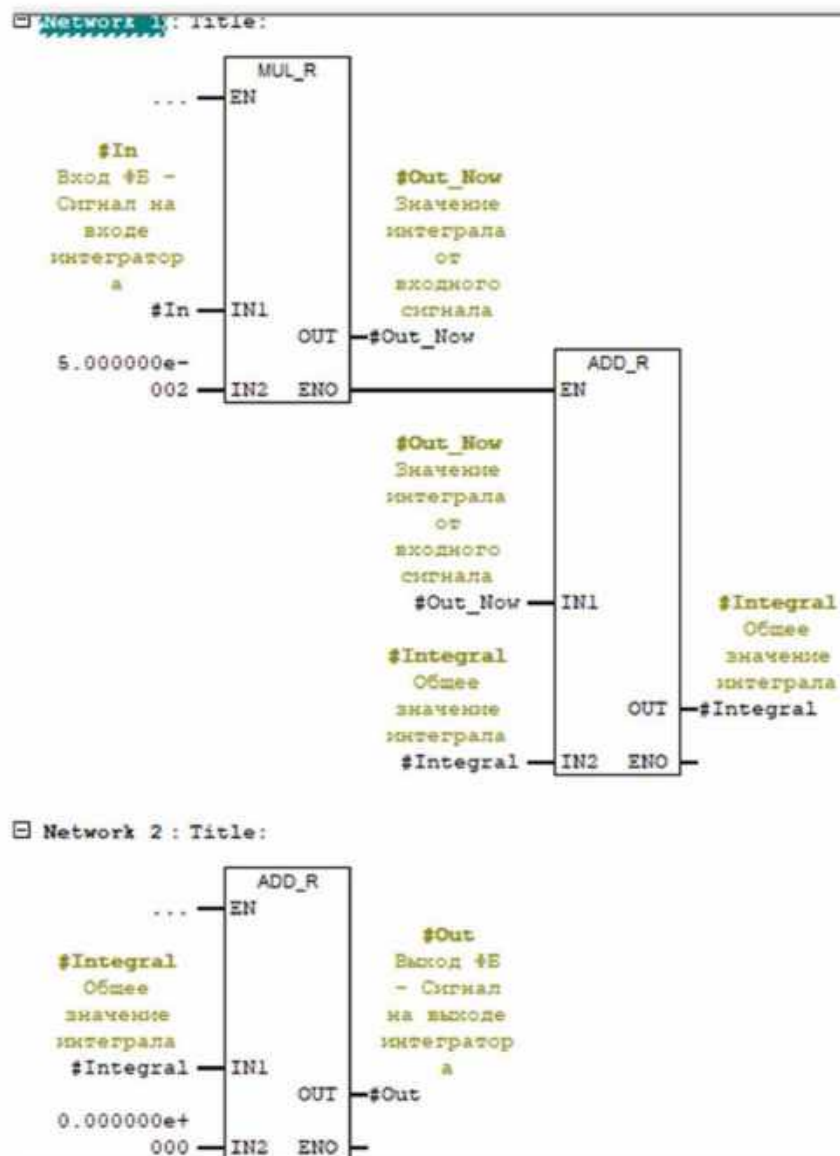


Рисунок 67 – Лістинг блоку інтегрування методом лівих прямокутників

#### 4.3.6. Блок ПІД-регулювання

У цьому блоці використовується стандартна формула ПІД-регулювання

$$Y(t) = Y(0) + K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (26)$$

Як метод диференціювання був обраний метод лівостороннього диференціювання – у цьому методі похідна обчислюється як відношення різниці сигналів на поточному та попередньому циклі до часу циклу.

Як метод диференціювання був обраний метод трапецій, який описується такою формулою:

$$\int_a^b f(x)dx = h \sum_{i=1}^n \frac{f_i + f_{i-1}}{2}. \quad (27)$$

Суть методу в цілому повністю аналогічна методу інтегрування прямокутниками, за тим лише винятком, що в даному методі площа під інтегрованою функцією апроксимується за допомогою трапецій. Ілюстрація методу представлена на рис 68.

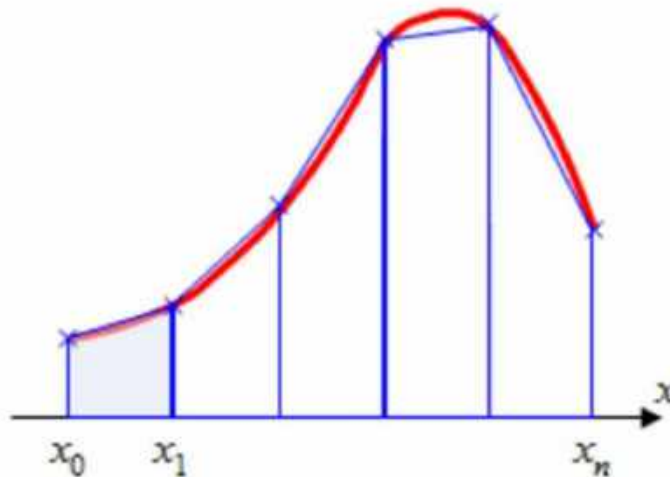


Рисунок 68 – Ілюстрація методу інтегрування трапецій

#### 4.3.7. Блок перемикача

Алгоритм є по суті своєю простим дискретним мультиплексором індексом.

#### 4.3.7. Блок шматково-лінійної функції

Цей блок відповідає за представлення функцій приналежності вхідного та вихідного сигналів блоку нечіткої логіки у вигляді кусково-лінійних функцій. Суть полягає в наступному: на вхід функції надходять абсциси та ординати точок, що визначають функцію приналежності, прапор-індикатор перетину другої та третьої функцій приналежності, а також цільове значення:

- на етапі фазифікації - значення вхідної змінної коригувального пристрою;
- на етапі дефазифікації - ступінь належності змінної кожної функції.

Виходом функції є:

- на етапі фазифікації – ступінь власності кожної функції;
- на етапі дефазифікації – значення чіткої змінної.

Варто окремо зупинитися на етапі дефазифікації, оскільки саме на даному етапі і формуються значення чітких змінних, які подаватимуться на вхід пристрою, що коригує. В даному випадку використовувався повністю емпіричний метод, який ґрунтується на спостереженні за поведінкою блоку нечіткої логіки в пакеті Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Було знайдено два найбільш ймовірні випадки роботи пристрою:

- у разі визначення значення чіткої змінної за першою функцією належності вихідний змінної, то проводиться простий розрахунок чіткого значення;

у разі визначення значення чіткої змінної за другою або третьою функцією або вираховується середнє значення між двома абсцисами точок трикутника, що відповідають отриманому на вхід значенню приналежності (у разі якщо друга та третя функції приналежності не перетинаються), або у разі перетину береться абсцис правої ділянки (в) випадку перерахунку для другої функції приналежності) та абсцису лівої ділянки (у разі перерахунку для третьої функції власності);

- у разі визначення значення чіткої змінної за четвертою функцією належності вихідна чітка змінна є значенням абсциси функції, обчисленої на підставі отриманого на вхід значення приналежності (у разі, коли значення приналежності не дорівнює 1) або константою дорівнює 94 (у разі, коли значення приналежності дорівнює 1).

Блок ПД-регулювання написаний мовою SCL, листинг даного блоку наведено у додатку Г.

#### **4.3.9. Блок нечіткої логіки**

Блок нечіткої логіки реалізується за допомогою представлення функцій належності вхідних та вихідних змінних у вигляді кусково-лінійних функцій, за допомогою блоку описаного раніше Значення чіткої вхідної змінної (в даній роботі вхідним сигналом апарата нечіткої логіки є інтегральна квадратична помилка) подається на блок фазифікації, де визначається ступінь власності даної змінної кожної з функцій власності. перевіряється факт перетину другої та третьої функції приналежності (використовується в блоці кусково-лінійної функції, що описувалося раніше). значення вихідний змінної. Оскільки кожному блоку дефазифікації відповідає своє чітке значення, необхідно визначити яке з них подавати на коригуючий пристрій. Для цього використовується блок перемикача, що комутує на вихід значення з блоку дефазифікації на вхід якого було подано найбільше значення ступеня належності. Вихід функціонального блоку перемикача є також і виходом функціонального блоку нечіткої логіки (у даній роботі вихідним сигналом апарату нечіткої логіки є коефіцієнт  $T$  передавальної функції пристрою, що коригує, з фазовим випередженням).

#### **4.3.10. Блок обчислення інтегральної квадратичної помилки**

У цьому блоці відбувається обчислення квадратної інтегральної помилки регулювання. Входами блоку є значення поточної помилки регулювання та уставки регулювання. Обчислення інтегральної квадратичної помилки реалізовано на стандартних блоках STEP7, а також на блоці користувача обчислення інтеграла.

Лістинг блоку представлений рис 69.

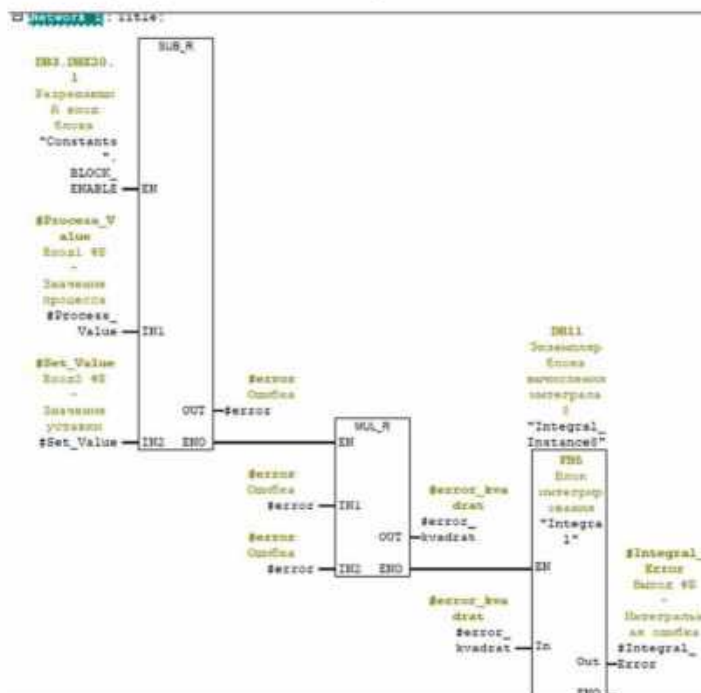


Рисунок 69 – Лістинг блоку обчислення інтегральної помилки

#### 4.4. Розробка панелі візуалізації процесу у Simatic WinCC

У SCADA-пакеті WinCC була розроблена найпростіша панель візуалізації процесів, що відбуваються в системі управління. Зв'язок контролера і WinCC була встановлена за допомогою MPI інтерфейсу. Конфігурація підключення контролера до MPI-шини у пакеті STEP7 показана рис 70.

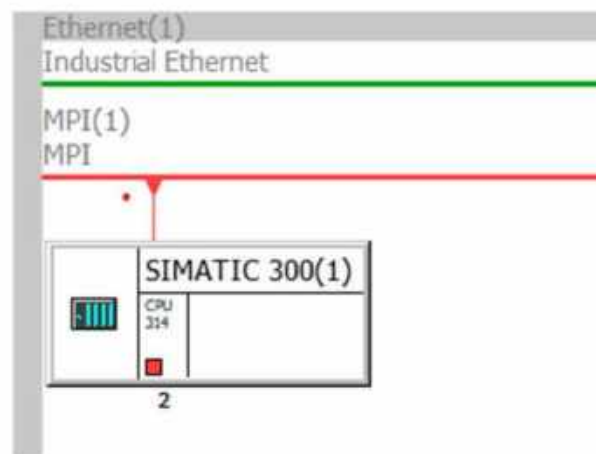


Рисунок 70 – Конфігурація MPI-з'єднання у пакеті STEP7

В утиліті WinCC Tag Management було створено нове MPI- з'єднання. Його конфігурація показано на рисунках 71, 72.

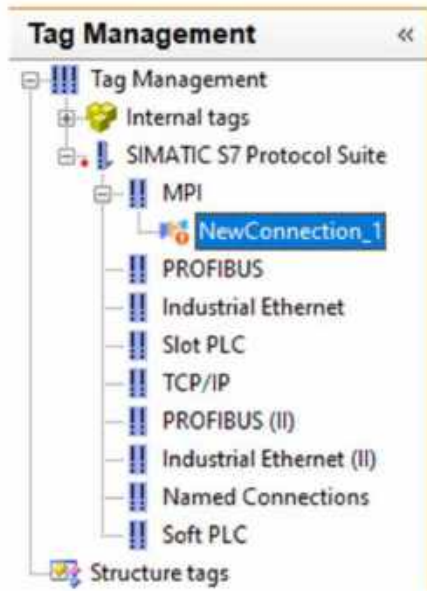


Рисунок 71 – Конфігурація MPI-з'єднання у пакеті WinCC

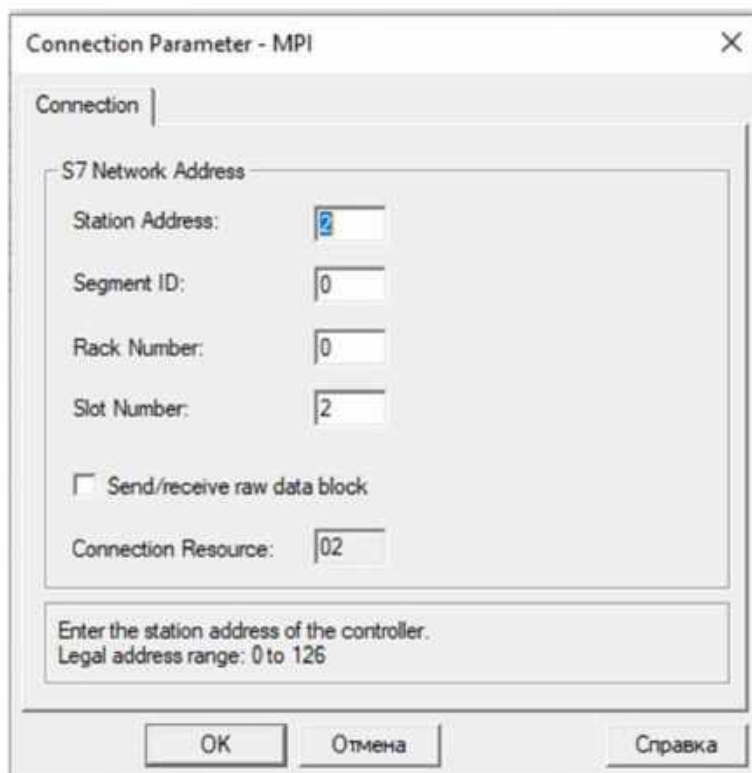


Рисунок 72 – Параметри MPI-з'єднання у пакеті WinCC

Для кожного значення, для якого необхідна була візуалізація на людино-машинному інтерфейсі, були створені відповідні теги, які за допомогою адресації були пов'язані з екземплярами даних блоків у контролері. Тегова структура наведена рис 73.

|    | Name           | Conn | Data type                    | Length | Format adaptation | Connection      | Group | Address  |
|----|----------------|------|------------------------------|--------|-------------------|-----------------|-------|----------|
| 1  | Kd             |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD38 |
| 2  | Ki             |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD34 |
| 3  | Kp             |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD30 |
| 4  | KU_T           |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD16 |
| 5  | OU_K           |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD8  |
| 6  | OU_T1          |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD4  |
| 7  | OU_T2          |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD0  |
| 8  | ProcessValue   |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D826,DD4 |
| 9  | QuadraticError |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D824,DD8 |
| 10 | SetPoint       |      | Floating-point number 32-bit | 4      | FloatToFloat      | NewConnection_1 |       | D83,DD42 |

Рисунок 73 – Структура тегів проекту WinCC

Далі була розроблена мнемосхема, на якій в цифровому та графічному уявленнях виводяться всі необхідні для контролю величини.

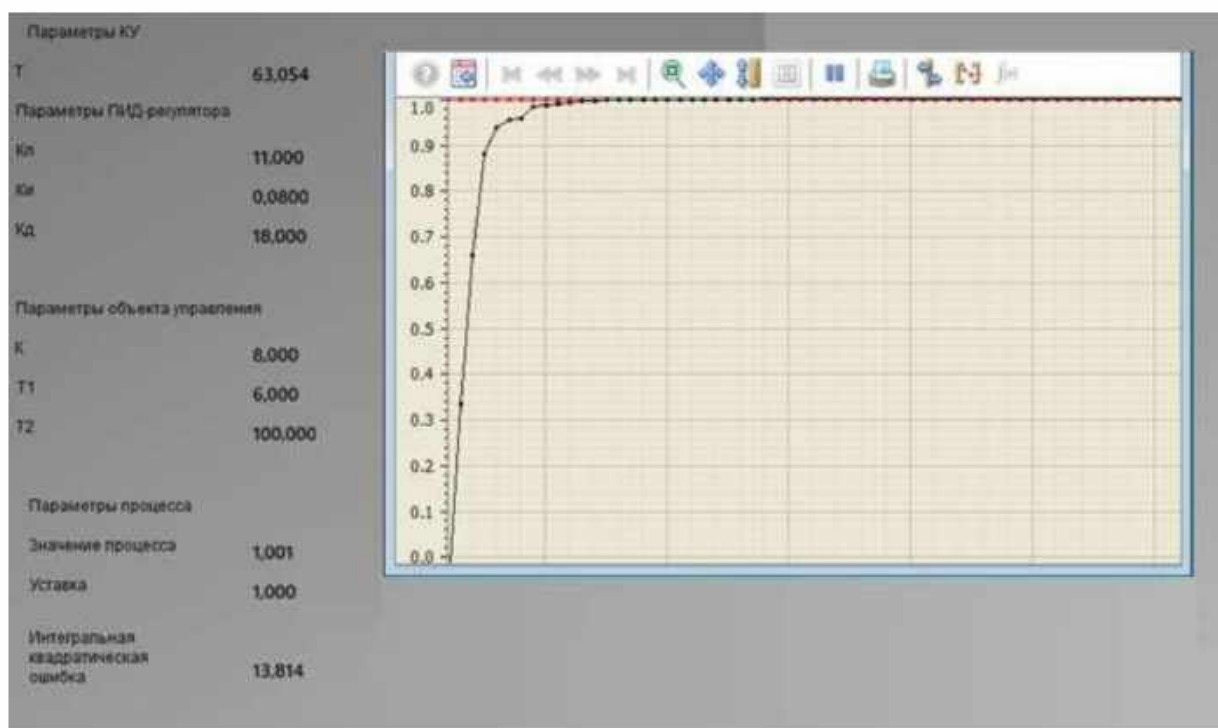


Рисунок 74 – Робота системи при базових параметрах об'єкта управління

На рис 75 представлений результат роботи системи управління об'єкт управління виведений на межу стійкості.

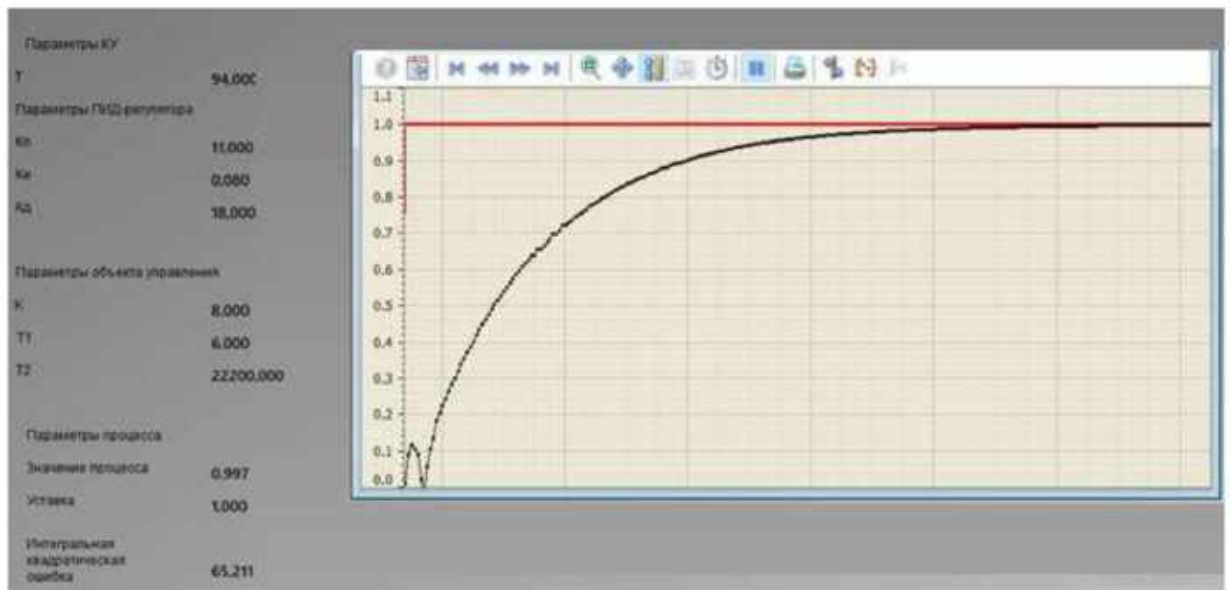


Рисунок 75 – Работа системы при об'єкті керування, виведеному на межу стійкості

## Розділ 5. Ресурсоефективність і ресурсозбереження

Метою роботи є розробка, дослідження та програмна реалізація на контролері псевдолінійного коригувального регулятора для системи автоматичного керування

Розробка, дослідження та реалізація коригувального пристрою виконуються з використанням персонального комп'ютера та промислового контролера «SIMATIC S7-300» у замкнутому приміщенні в умовах штучного освітлення.

Усі роботи проводились у 13 аудиторії 1 корпусу УПА.

Техніко-економічне обґрунтування науково-дослідних робіт проводиться з метою визначення та аналізу трудових та грошових витрат, спрямованих на їх реалізацію, а також рівня їх науково-технічної результативності.

### 5.1. Організація та планування робіт

При організації процесу реалізації проекту чи наукового дослідження необхідно раціонально планувати зайнятість кожного з його учасників та термін проведення окремих робіт.

На даному етапі створюється перелік здійснюваних робіт, і відбувається визначення виконавців та оптимальної тривалості. Результат планування робіт – мережевий, чи лінійний графік реалізації проекту. Найбільш підходящим способом цих цілей буде лінійний графік. Для його побудови слід скласти перелік робіт та відповідність робіт своїм виконавцям. Складемо такий перелік і зведемо його до таблиці.

Таблиця 1 – Перелік робіт та тривалість їх виконання

| Етапи робіт                                           | Виконавці | Завантаження (зайнятість) виконавців |
|-------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| Постановка цілей та завдань, отримання вихідних даних | НР        | НР - 100%                            |
| Складання та затвердження ТЗ                          | НР, І     | НР - 50%<br>І – 100%                 |

|                                                                                             |       |                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------|
| Розробка календарного плану                                                                 | НР, І | НР - 100%<br>І – 100% |
| Вивчення літературних джерел, написання теоретичної частини роботи та математичних викладок | І     | І -100%               |
| Створення адаптивної САР із ПКУ                                                             | І     | І -100%               |
| Створення програмного забезпечення для ПКУ                                                  | І     | І -100%               |
| Проведення випробувань, доопрацювання програмного забезпечення                              | НР, І | НР - 30%<br>І -100%   |
| Оформлення розрахунково-пояснювальної записки                                               | І     | І -100%               |
| Оформлення графічного матеріалу                                                             | І     | І -100%               |
| Підбиття підсумків                                                                          | НР, І | НР - 100%<br>І -100%  |

### 5.1.1. Визначення тривалості етапів робіт

Розрахунок тривалості робіт здійснюється двома методами:

- техніко-економічним;
- дослідно-статистичним.

У разі використовується дослідно-статистичний метод. Його можна реалізувати двома способами:

- аналоговим;
- експертним.

Для визначення очікуваного значення тривалості робіт *тож* застосовується ймовірнісний метод – метод двох оцінок  $t_{\min}$  та  $t_{\max}$ :

$$t_{ож} = \frac{3 * t_{min} + 2 * t_{max}}{5}, \quad (28)$$

де  $t_{min}$  - Мінімальна трудомісткість робіт, чол / дн.;

$t_{max}$  - максимальна трудомісткість робіт, чол/дн.

Для виконання перелічених у таблиці робіт потрібні спеціалісти:

інженер;

науковий керівник

Для побудови лінійного графіка необхідно розрахувати тривалість етапів у робочих днях, та був перевести у календарні дні. Розрахунок тривалості робіт у робочих днях здійснюється за формулою:

$$T_{РД} = t_{ож} * K_{ВН} * K_{Д}, \quad (29)$$

де  $t_{ож}$  - трудомісткість роботи, чол / дн.;

$K_{ВН}$  - коефіцієнт виконання робіт ( $K_{ВН} = 1$ );

$K_{Д}$  – коефіцієнт, що враховує додатковий час компенсації узгодження робіт ( $K_{Д} = 1.2$ ).

Розрахунок тривалості етапу у календарних днях ведеться за формулою

$$T_{КД} = T_{РД} * T_{До}, \quad (30)$$

де  $T_{РД}$  – тривалість виконання етапу у робочих днях;

$T_{КД}$  – тривалість виконання етапу у календарних днях;

$T_{К}$  – коефіцієнт календарності.

Коефіцієнт календарності розраховується за такою формулою:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ПВД}}, \quad (31)$$

де  $T_{КАЛ}$  – календарні дні ( $T_{КАЛ} = 365$ );

$T_{ПВД}$  - вихідні та святкові дні ( $T_{ПВД} = 122$ ).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 122} = 1.502 \quad (32)$$

Таблиця 2 – Трудовитрати виконання проекту

| Етап                                                     | Тривалість робіт |                  |                 | Виконавці | Трудомісткість робіт з виконавця, чол/дн |       |                 |        |
|----------------------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------|------------------------------------------|-------|-----------------|--------|
|                                                          |                  |                  |                 |           | Т <sub>рд</sub>                          |       | Т <sub>кд</sub> |        |
|                                                          | t <sub>min</sub> | t <sub>max</sub> | t <sub>ож</sub> |           | НР                                       | I     | НР              | I      |
| Постановка задачі                                        | 1                | 2                | 1,4             | НР        | 1,68                                     | -     | 2,52            | -      |
| Розробка затвердження технічного завдання                | 4                | 6                | 4,8             | НР, I     | 2,88                                     | 5,76  | 4,33            | 8,65   |
| Розробка календарного плану                              | 1                | 2                | 1,4             | НР, I     | 1,68                                     | 1,68  | 2,52            | 2,52   |
| Вивчення літературних джерел                             | 7                | 10               | 8,2             | I         | -                                        | 9,84  | -               | 14,78  |
| Створення програмного забезпечення для ПКУ               | 10               | 14               | 11,6            | I         | -                                        | 13,92 | -               | 20,9   |
| Створення програмного забезпечення для ПКУ               | 14               | 20               | 16,4            | I         | -                                        | 19,68 | -               | 29,55  |
| Проведення випробувань, доробка програмного забезпечення | 5                | 7                | 5,8             | НР, I     | 1,39                                     | 6,96  | 2,08            | 10,45  |
| Обґрунтування безпеки та економічності виробництва       | 3                | 5                | 3,8             | I         | -                                        | 4,56  | -               | 6,85   |
| Оформлення розрахунково-пояснювальної записки            | 3                | 5                | 3,8             | I         | -                                        | 4,56  | -               | 6,85   |
| Оформлення графічного матеріалу                          | 5                | 6                | 3,8             |           | -                                        | 4,56  | -               | 6,85   |
| Підбиття підсумків                                       | 1                | 2                | 1,4             | I         | 1,68                                     | 1,68  | 2,52            | 2,52   |
| Разом                                                    |                  |                  | 62,4            | НР, I     | 9,31                                     | 73,2  | 13,97           | 109,92 |

## 5.2. Складання кошторису витрат на розробку проекту

Розрахунок витрат на розробку проекту необхідний для співвіднесення їх з результатами від впровадження та використання розробки та формулювання висновків щодо ефективності та доцільності здійснення комплексу робіт.

Для обґрунтування доцільності проекту необхідно визначити витрати на всіх етапах життєвого циклу продукту:

- дослідження;
- розробка;
- використання;
- експлуатація.

Визначення витрат за розробку проекту проводиться шляхом складання кошторису витрат. Результатом складання кошторису є визначення планової собівартості.

До складу витрат на дослідження та розробку проекту включається вартість усіх витрат, необхідних для реалізації комплексу робіт, що становлять утримання цієї розробки. Розрахунок кошторисної вартості виконання цієї розробки проводиться у разі наступним статтям затрат:

- матеріали та покупні вироби;
- основна вести;
- додаткова вести;
- відрахування до соціальних фондів;
- витрати на обладнання для виконання робіт;
- амортизаційні відрахування;
- інші прямі витрати;
- накладні витрати.

#### **5.2.1. Матеріали та покупні вироби**

Ця стаття відображає вартість всіх матеріалів, що використовуються при розробці проекту, включаючи витрати на їх придбання та, за необхідності, доставку. Транспортні витрати були прийняті у розмірі 5% вартості матеріалів. Витрати матеріали представлені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Матеріали та покупні вироби

| Найменування матеріалів і покупних виробів | Одиниця виміру | Кількість | Ціна за од., грн. | Сума, грн. |
|--------------------------------------------|----------------|-----------|-------------------|------------|
| Блокнот                                    | Штук           | 1         | 40                | 40         |
| Папір формату А4                           | Штук           | 1         | 150               | 150        |
| Ручка                                      | Штук           | 2         | 10                | 20         |
| Олівець                                    | Штук           | 1         | 10                | 10         |
| Разом                                      |                |           |                   | 220        |

Нехай ТЗР становить 5% від відпускної ціни матеріалів, тоді Витрати матеріали з урахуванням ТЗР рівні  $СМАТ = 220 * 1,05 = 231$  грн.

### 5.2.2. Основна заробітна плата

У цій статті видатків планується та враховується основна заробітна плата виконавців, які безпосередньо беруть участь у розробці. Розрахунок основної заробітної плати виконується на основі трудомісткості виконання кожного етапу та величини місячного окладу.

Середньоденна тарифна заробітна плата (ЗП<sub>ДН</sub>) розраховується за формулою:

$$ЗП_{ДН} = \frac{МО}{25,083}. \quad (33)$$

Розрахунки витрат за повну зарплатню наведено у таблиці 4. При розрахунку враховувалося, що у року 301 робочого дня і, отже, у місяці 25,083 робочих дня.

Витрати часу виконання роботи по кожному виконавцю бралися з таблиці 2. Також був прийнятий на увагу коефіцієнт, враховує коефіцієнт додаткової зарплати  $КРП = 1,1$ ;  $К_{доп.ЗП} = 1,188$ ;  $К_p = 1,3$ . Таким чином, для переходу від тарифної (базової) суми заробітку виконавця, пов'язаної з участю в проекті, відповідного повного заробітку (зарплатної частини кошторису) необхідно помножити на інтегральний коефіцієнт  $К_i = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$

Таблиця 4 - Витрати на основну заробітну плату

| Виконавець | Оклад,<br>грн./міс. | Середньоденна<br>ставка,<br>грн./Раб. | Витрати<br>часу,<br>раб.дні | Коефіцієнт | Фонд<br>з/плати,<br>грн. |
|------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------|------------|--------------------------|
| НР         | 33664               | 1342,10                               | 9                           | 1,699      | 20522,05                 |
| I          | 15470               | 616,75                                | 73                          | 1,699      | 76493,65                 |
| Разом:     |                     |                                       |                             |            | 97015,70                 |

Таким чином, витрати на основну заробітну плату склали  $C_{осн} = 97015,70$  грн.

### 5.2.3. Додаткова заробітна плата

Витрати на цю статтю становлять відрахування з єдиного соціального податку (ЕСН).

Відрахування із заробітної плати визначаються за формулою:

$$C_{соц.} = CЗП * 0,3, \quad (34)$$

де  $C_{соц.}$  - Коефіцієнт, що враховує розмір відрахувань із заробітної плати. Цей коефіцієнт становить 30% від витрат на заробітну плату і включає:

- відрахування до пенсійного фонду;
- на соціальне страхування;
- на медичне страхування;

Відрахування із заробітної плати склали:

$$C_{ДОП/ЗП} = 0,3 \cdot 97015,70 = 29104,71 \text{ грн.} \quad (35)$$

### 5.2.4. Витрати на обладнання для виконання робіт

Даний вид витрат включає витрати на електроенергію при роботі обладнання а також витрати на електроенергію, витрачену на освітлення. Витрати на електроенергію при роботі обладнання для технологічних цілей розраховуються за формулою:

$$C_{ел.об.} = P_{об} * t_{об} * C_e, \quad (36)$$

де,  $P_{об}$  - потужність, що споживається обладнанням, кВт;

$C_e$  – тариф на 1 кВт\*годину;

$t_{об}$ - Час роботи обладнання, годину.

Для ТПУ  $C_e = 6,59$  грн/кВт\*годину (з ПДВ).

Час роботи устаткування обчислюється з урахуванням підсумкових даних таблиці 2 для інженера (ТРД) з розрахунку, що тривалість робочого дня дорівнює 8 часів:

$$t_{об} = TPD * Kt. \quad (37)$$

Потужність, що споживається обладнанням, визначається за такою формулою:

$$P_{об} = P_{НОМ} * KС, \quad (38)$$

де  $P_{НОМ}$  - встановлена потужність обладнання, кВт;

$KС$ - Коефіцієнт завантаження, що залежить від середнього ступеня використання номінальної потужності.

Для технологічного устаткування мінімальної потужності  $KС = 1$ .

Витрати на електроенергію для технологічних цілей наведено у таблиці.

Таблиця 5 - Витрати на електроенергію для технологічних цілей

| Найменування обладнання | Час роботи обладнання $t_{об}$ , годину | Споживана потужність $P_{об}$ , кВт | Витрати ЕОБ, грн. |
|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| ПК                      | 324,5                                   | 0,3                                 | 641,53            |
| Принтер                 | 1                                       | 0,1                                 | 0,66              |
| Разом:                  |                                         |                                     | 642,19            |

#### 5.2.5. Розрахунок амортизаційних витрат

У статті «Амортизаційні відрахування» розраховується амортизація устаткування, що використовується за час виконання проекту.

Амортизаційні відрахування розраховуються на час використання ЕОМ за такою формулою:

$$C_{AM} = \frac{H_A * C_{ОБ} * t_{РФ} * \eta}{F_d}, \quad (39)$$

де  $H_A$  - Річна норма амортизації,  $H_A = 25\%$ ;

$\text{Ц}^{\text{ОБ}}$  - вартість устаткування,  $\text{Ц}^{\text{ОБ}} = 45000$  грн.;

$F_D$  - дійсний річний фонд робочого часу,  $F_D = 2384$  години;

$t_{\text{РФ}}$  – фактичний час роботи устаткування під час створення програмного продукту,  $t_{\text{РФ}} = 384$  години;

$\eta$  - Число задіяних ПЕОМ,  $\eta = 1$ .

Таким чином, витрати на амортизаційні відрахування склали:

$$Z_{\text{АМ}} = \frac{0,25 * 45000 * 324 * 1}{2384} = 1528,94 \text{ грн.} \quad (40)$$

Для принтера  $\text{Ц}^{\text{ОБ}} = 12000$  грн., його  $F_D = 500$  год.,  $H_A = 50\%$ , тоді його амортизація складе:

$$Z_{\text{АМ}} = \frac{0,5 * 12000 * 1}{500} = 36 \text{ грн.} \quad (41)$$

Разом  $\text{САМ} = 1528,94 \text{ грн.} + 36 \text{ грн.} = 1564,94 \text{ грн.}$

#### 5.2.6. Інші прямі витрати

У статті «інші прямі витрати» відображені витрати на розробку інструментального засобу, які не враховані в попередні статті.

$\text{Термін} = (\text{Смат} + \text{Сзп} + \text{Ссоц} + \text{Сел.об.} + \text{Сам}) * 0,1 \quad (42)$

Підставимо значення та обчислимо:

$$\text{Спр} = (231 + 97015,70 + 29104,71 + 642,19 + 1564,94) * 0,1 = 12856 \text{ грн}$$

### 5.2.7. Розрахунок загальної собівартості розробки

Провівши розрахунок кошторису витрат за розробку, можна визначити загальну вартість розробки проекту.

Таблиця 7 – Кошторис витрат

| Стаття витрат                      | Умовне позначення | сума, грн. |
|------------------------------------|-------------------|------------|
| Матеріали та покупні вироби        | $Z_{mat}$         | 231        |
| Основна заробітна плата            | $Z_{zn}$          | 97015,70   |
| Відрахування до соціальних фондів  | $Z_{soц}$         | 29104,71   |
| Витрати електроенергію             | $Z_{el}$          | 642,19     |
| Амортизаційні відрахування         | $Z_{am}$          | 1564,94    |
| Безпосередньо враховуються витрати | $Z_{np}$          | -          |
| Інші витрати                       | $Z_{in}$          | 12856      |
| Разом                              |                   | 141414,54  |

Таким чином, витрати на розробку становили  $C = 141414,54$  грн.

### 5.2.8. Прибуток

Приймемо прибуток у розмірі 5 - 20% від повної собівартості проекту.

### 5.2.8. ПДВ

ПДВ становить 18% від суми витрат за розробку та прибутку:  $(141604,73 + 28320,95) \cdot 0,18 = 30545,54$  грн.

### 5.2.9. Ціна розробки НДР

Ціна дорівнює сумі повної собівартості, прибутку та ПДВ, у нашому випадку:

$$Ц = 141414,54 + 28282,9 + 30545,54 = 200242,98 \text{ грн.}$$

### **5.3. Оцінка економічної ефективності проекту**

В рамках роботи неможливо оцінити економічну ефективність проекту, тому що для цього необхідно проводити повноцінне дослідження. Неможливість оцінки обумовлена тим, що інформація про прототипи та аналоги коригувального пристрою розсіяна, у зв'язку з чим у рамках цієї роботи неможливо її систематизувати.

Економічний ефект характеризується підвищенням якості регулювання систем автоматичного управління, і навіть зниженням тривалості перебоїв у роботі т.к. принцип регулювання, реалізований в ПЗ, дозволяє уникнути пауз для переналаштування обладнання під параметри системи, що змінилися. Метод і ПЗ, що розробляються, можуть бути реалізовані в широкому колі виробництв, і спрямовані на впровадження особливо у сфері безперервних виробництв, таких як нафтопереробка, виробництво теплоенергії та електроенергії.

## Висновки

У рамках даної роботи був проведений огляд основних видів існуючих коригувальних пристроїв. Для дослідження було зроблено вибір на користь псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням. Було проведено моделювання роботи даного пристрою стосовно об'єкту управління другого порядку показало, що вплив пристрою, що коригує, на якість процесу регулювання повністю залежить від параметрів коригувального пристрою. Також у роботі були розглянуті теоретичні основи нечіткої логіки та побудова нечітких керуючих систем. На основі даних матеріалів у пакетах MATLAB Simulink та MATLAB Fuzzy Logic Toolbox була проведена розробка та моделювання псевдолінійного коригувального пристрою з фазовим випередженням з підстроюванням параметрів через блок нечіткої логіки. У разі великого діапазону зміни параметрів об'єкта управління введення нечітких пристроїв регулювання допомагає забезпечити необхідну якість регулювання і є кращим варіантом порівняно зі звичайними пристроями. В результаті дослідження було помічено, що введення нечіткого коригувального пристрою в систему автоматичного регулювання дозволяє підвищити якість регулювання при об'єкті управління, що змінюється, за рахунок підстроювання коефіцієнта його передавальної функції, і забезпечує або рівноцінне (у порівнянні зі звичайним ПД-регулятором), або більш високе (у порівнянні з нечітким ПД-регулятором) якість регулювання. Проте також слід зазначити, що нечітке КУ програє у швидкодії звичайному ПД-регулятору (у разі базових параметрів об'єкта управління) та нечіткому ПД-регулятору (у разі виходу об'єкта управління на межу стійкості). Ця проблема може бути вирішена запровадженням додаткового контуру нечіткого регулювання для коефіцієнта посилення коригуючого пристрою. Враховуючи той факт, що порівняно із синтезом нечіткого ПД-регулятора синтез нечіткого КУ є більш простим завданням (менша кількість функцій належності вхідних і вихідних змінних, простіша база правил), такий варіант є найбільш оптимальним.

Також нечіткий псевдолінійний коригуючий пристрій було реалізовано програмно в пакеті STEP7. У процесі реалізації використовувалися як стандартні блоки пакета, так і функціональні блоки. Розробка проводилася мовами FBD та SCL.

## Література

1. Бучма І.М. Мікропроцесорні пристрої Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 236 с.
2. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 – P. 367-372.
3. Kyung Sup Kwak. An Overview of IEEE 802.15.6 Standard" [Electronic resource] / Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, Niamat Ullah // 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010), 7-10 Nov., 2010. – Rome, Italy. – DOI: 10.1109/ISABEL.2010.5702867.
4. Sushabhan Choudhury. ZigBee and Bluetooth Network based Sensory Data Acquisition System [Електронний ресурс] / Sushabhan Choudhury, Piyush Kuchhal, Rajesh Singh. – doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.195 –P. 367-372.
5. IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi / Nitsche, T., Cordeiro, C., Flores, A. B., Knightly, E. W., Perahia, E., & Widmer, J. C. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – 52 (12). – Pp. 132-141.
6. IEEE 802.11 ad: A standard for TV white space spectrum sharing / Flores, A. B., Guerra, R. E., Knightly, E. W., Ecclesine, P., & Pandey, S. // IEEE Communications Magazine. – 2013. – 51 (10). – Pp. 92-100.
7. Галай В.М. Теорія оптимальних систем автоматичного керування технологічними процесами: монографія/ В.М.Галай, К.Х.Зеленський, А.М.Сільвестров. – Полтава: ПНТУ, 2009. – 153 с.
8. Жлуктенко В. І. Економетрія/В. І. Жлуктенко, Н.К. Водзянова, С. Савіна, О. В. Колодінська (під ред. С. І. Наконечного). – Київ: Видавництво Європейського університету, 2005. – 550 с.
9. Зеленський К. Х. Комп'ютерні методи прикладної математики / К. Х. Зеленський, В. М. Ігнатенко, О. П. Коц. — Київ: Академперіодика, 2002. – 480 с.
10. Івахненко О. Г. Довгострокове прогнозування та керування скланими системами/О.Г. Івахненко. – Київ: Техніка, 1975. –250 с.
11. Нестеренко О.В., Ковтунець О.В., Фаловський О.О. Інтелектуальні системи і технології. Ввідний курс/ О.В.Нестеренко, О.В. Ковтунець, О.О. Фаловський. – Київ:Національна академія управління, 2017. – 90 с.
12. Островерхов М.Я. Методи дослідження електротехнічних комплексів і систем/М.Я. Островерхов, А.М. Сільвестров, К.Х. Зеленський/К.: ТАЛКОМ, 2019. - 300 с.
13. Самсонов В. В., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання/Київ, НУХТ, 2022. – 385 с.
14. Сільвестров А. М. Багатократно адаптивні системи ідентифікації

/ А. М. Сільвестров, О. М. Паченко. – К. : Техніка, 1983. – 110 с.

15. Антонюк В. С. Методологія наукових досліджень: Навч. посіб./В.С.Антонюк, Л. Г. Полонський, В. І. Аверченков, Ю. А. Малахов. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2015. – 274 с.

16. Бідюк П.І. Методи прогнозування/П. Бідюк,О. Меньяйленко, О.Половцев. – Т 2. – Луганськ : Альма-матер, 2008. – 305 с.

17. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: Навч. посіб. /С. Е. Важинський, Т. І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. –260 с.

18. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>

19. Дубовський С.В. Техніко-економічні оцінки перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України / С.В. Дубовський, В.С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. –2013. – № 2(33). –С. 49-56.

20. Залознова Ю.С. Економічні та соціальні проблеми розвитку промисловості: монографія / Ю.С. Залознова; НАН України, Інститут економіки промисловості. –Київ, 2017. –288 с.

21. Іщук С.І., Гладкий О.В. Техніко-економічні основи промислового виробництва: навч. посібник. – К.: Академія, 2011. – 296 с.

22. Артюх С.Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С.Ф.Артюх, М.А.Дуель, І.Г.Шелепов. –Харків, "Знання", – 2001 р., –416 с.

23. Дуель М.О. Автоматизовані системи управління технологічними процесами енергоблоків теплових електростанцій (розробка, дослідження, впровадження): автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / М.О. Дуель. –Харків, 1998. –36 с.

24. Савицький В. Технічні засоби автоматизації. - Львівська політехніка, 2018, -292с.

25. Ельперін І.В. Автоматизація виробничих процесів. -Ліра-К, 2017, -378с.

26. Ладанюк А. П.- Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування). Ліра-К, 2016, -312с.

27. Автоматизація технологічних процесів. Синєглазов В.М., Сергєєв І. Ю. -Київ, 2015, -444с.

28. Автоматизація виробничих процесів. Підручник. Ельперін І.В., Пупена О.М., Сідлецький В.М. -Ліра К, 2017, -378с.

29. Основи автоматики та автоматизації, Пістун Є.П., Стасюк І.Д. -

Львівська політехніка, 2018, -336с.

30. Теоретичні основи автоматики. Корчемний М.О., Клендій П.Б., Потапенко М.В. -Богдан НК, 2012, -304с.

31. Технології проектування комп'ютерних систем. Б.І. Масловський, В.І. Дрововозов, О.В. Коба. -Київ, 2015, -500с.

32. Обладнання автоматизованого виробництва Бочков В. М., Сілін Р. І., - Львівська політехніка. 2015, -404с.

33. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. - Львівська політехніка, 2020, -220с.

**ВІДГУК****наукового керівника кваліфікаційної роботи  
рівня вищої освіти “магістр”**

виконаного на тему: **Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора**

студентом (кою) **МАКСИМЕНКО Артем Сергійович**

(прізвище, ім'я)

Студент Максименко А.С. виконав магістерську роботу на тему “Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора” повністю відповідно до завдання. Робота присвячена актуальному питанню синтезу нечіткого псевдолінійного регулятора та дослідженню питання їх ефективності в різних системах керування. Студент Максименко А.С. над роботою систематично, докладно вивчав рекомендуєму літературу, і правильно застосовував отримані знання. Графічна частина роботи виконана відповідно до норм і вимогами. Всі елементи схем в записці і кресленнях відповідають вимогам ЕСКД до розмірів умовних графічних позначень в електричних системах.

Робота має практичну значимість та наукову цінність

У цілому робота виконана грамотно, акуратно, основні цілі роботи досягнуті, а поставлені завдання виконані. Робота заслуговує оцінки “відмінно”.

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_  
\_к.т.н., доцент\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
\_Мезеря А.Ю.  
(ім'я, прізвище)

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу

“\_\_Магістр\_\_” рівня вищої освіти

виконаний(у) на тему: **Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора**

студентом (кою) **МАКСИМЕНКО Артем Сергійович** \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

Студент Максименко А.С. виконав магістерську роботу на тему “Дослідження і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора” повністю відповідно до завдання.

В роботі проведено досить глибоке дослідження я і розробка нечіткого псевдолінійного регулятора. Визначені основні фактори, які впливають на точність регулятора та поліпшення його основних характеристик. Визначені області застосування нечіткого псевдолінійного регулятора в системах керування, а також критерії їх ефективного використання.

Робота присвячена актуальному питанню підвищення ефективності систем керування. Це питання має високу практичну значимість, тому що енергозбереження є на сьогодні основним напрямком розвитку енергетики України. Вирішення цього питання дозволяє не тільки заощаджувати кошти на додатковому виробництві електроенергії, но і поліпшити питання екології.

Робота має практичну значимість та наукову цінність.

Графічна частина роботи виконана відповідно до норм та вимог. Всі елементи схем в записці і кресленнях відповідають вимогам ЕСКД до розмірів умовних графічних позначень в електричних системах.

Робота виконана на актуальну тему і відбиває високу інженерну підготовку автора.

Па роботі є наступні зауваження:

**Бажано порівняти системи керування при використанні нечіткого псевдолінійного регулятора та інших, наприклад, синтезованого на зворотних задачах динаміки.**

У цілому робота виконана акуратно, грамотно та заслуговує оцінки «відмінно».

**Рецензент**

\_\_к.т.н., доцент\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

  
(підпис)

\_\_Буданов П.Ф.\_\_  
(ім'я, прізвище)