

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Адаптивний метод нечіткої логіки для налаштування
ПІД-контролера в системі керування напругою
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи СПМ-23-4
Єгор ФОМІН
(власне ім'я, прізвище)

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

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

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: ст.викл. Василь ЗНАЙДЮК
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ Андрій КОВАЛЕНКО
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Фоміну Єгору Євгеновичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Адаптивний метод нечіткої логіки для налаштування
ПІД-контролера в системі керування напругою _____

затверджена наказом по університету від “ 21 ” квітня 2025 р. № 296 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 16 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ нечітка логіка, ПІД, AVR
штучна бджолина колонія, ПЛК. _____

Matlab _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Теоретичні основи _____

Принципи роботи системи _____

Метод на базі адаптивного алгоритму штучної бджолиної колонії _____

Тестування системи _____

Висновки _____

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

Слайд презентація – 14 слайдів _____

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання теми кваліфікаційної роботи	21.04.25	
2	Аналіз літератури	22.04.25-01.05.25	
3	Побудова методів	02.05.25-15.05.25	
4	Тестування системи та отримання результатів	16.05.25-30.05.25	
5	Формування пояснювальної записки	31.05.25-04.06.25	
6	Перевірка на плагіат	05.06.25-06.06.25	
7	Рецензування роботи	07.06.25-14.06.25	
8	Подача роботи в ЕК	16.06.25	

Дата видачі завдання “ 21 ” квітня 2025 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

ст.викл. Василь ЗНАЙДЮК _____

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 61 с., 14 рис., 10 табл., 2 дод., 46 джерел.

ШТУЧНА БДЖОЛИНА КОЛОНІЯ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ПІД, AVR, ПЛК.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка адаптивний метод метод нечіткої логіки для налаштування ПІД контролера в системі керування напругою.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розробляється новий надійний алгоритм aABC-fuzzy-PID для налаштування ПІД-регулятора системи АРН на мікрогідроелектростанції, встановленій як експериментальна установка. На відміну від більшості досліджень в літературі, впровадження проводилося з використанням реального фізичного обладнання. Контроль і моніторинг системи в режимі реального часу здійснювалися за допомогою ПЛК типу S7-1200 і програмного забезпечення TIA Portal V17. Це дослідження продемонструвало, що запропонований метаевристичний алгоритм можна ефективно використовувати з промисловим і простим контролером, таким як ПЛК. Адаптивно та динамічно отримано оптимальні значення K_p , K_i та K_d для ПІД-регулювання нелінійної системи АРН за різних умов навантаження.

ABSTRACT

Master's thesis: 61 pages, 14 figures, 10 tables, 2 appendices, 46 sources.

ARTIFICIAL BEE COLONY, FUZZY LOGIC, PID, AVR, PLC.

The major goal of this thesis is to develop an adaptive method fuzzy logic method for tuning the PID controller in the voltage control system.

During the qualification work, a new reliable algorithm aABC-fuzzy-PID is being developed for tuning the PID controller of the AVR system at a microhydropower plant installed as an experimental installation. Unlike most studies in the literature, the implementation was carried out using real physical equipment. Real-time control and monitoring of the system was carried out using a PLC type S7-1200 and TIA Portal V17 software. This study demonstrated that the proposed metaheuristic algorithm can be effectively used with an industrial and simple controller, such as a PLC. The optimal values of K_p , K_i and K_d for PID control of a nonlinear AVR system under different load conditions were adaptively and dynamically obtained.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	9
2 ПРИНЦИПИ РОБОТИ СИСТЕМИ	13
2.1 Принцип роботи експериментальної установки	13
2.2 Контроль напруги.....	14
3 МЕТОД НА БАЗІ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ШТУЧНОЇ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ.....	20
3.1 Сторона нечіткої логіки.....	23
3.2 Метаевристична сторона	25
3.2.1 Вектор розв'язків	31
3.2.2 Цільова функція для офлайн-режиму	32
3.2.3 Налаштування параметрів для автономного дизайну	32
3.3 Експерименти для офлайн-режима	33
3.4 Онлайн-модель aABC-FL	34
3.4.1 Онлайнова цільова функція для aABC-FL	34
3.4.2 Налаштування параметрів для онлайн-проекування aABC-FL.....	35
4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	36
ВИСНОВКИ.....	45
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	46
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51
ДОДАТОК Б Результати конкурентних алгоритмів для бенчмарків SEC2019	59

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АРН – автоматичний регулятор напруги

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПЛК – програмований логічний контролер

SCADA – система диспетчерського керування і збору даних (англ., Supervisory Control and Data Acquisition)

aABC – адаптивна штучна бджолина колонія (англ., Adaptive Artificial Bee Colony)

FL – нечітка логіка (англ., Fuzzy Logic)

OPC UA – уніфікована архітектура відкритої платформи обміну даними (англ., Open Platform Communications Unified Architecture)

TIA Portal – портал повної інтегрованої автоматизації (англ., Totally Integrated Automation Portal)

ВСТУП

Контроль напруги синхронних генераторів, особливо при змінних умовах навантаження, залишається значним і складним завданням у галузі техніки. Незважаючи на те, що для систем автоматичного регулятора напруги (AVR) реалізовано різні методи керування для керування напругою на клеммах синхронних генераторів, метод керування на основі ПІД-регулятора продовжує залишатися одним із найпростіших і широко використовуваних підходів. Визначення оптимальних значень для значень K_p , K_i та K_d має важливе значення для забезпечення ефективної та швидкої роботи ПІД-регулятора.

У цій кваліфікаційній роботі представлено налаштування ПІД-регулятора на основі PLC з використанням підходу адаптивної штучної бджолиної колонії з нечіткої логікою (aABC-FL) для керування напругою на мікрогідроелектростанції, встановленій як експериментальна установка. Управління та моніторинг системи в режимі реального часу здійснювалися за допомогою програмованого логічного контролера (PLC) S7-1200, інтегрованого з інтерфейсом порталу повністю інтегрованої автоматизації та екраном SCADA. Структура aABC-Fuzzy була розроблена з використанням платформи MATLAB/Simulink із зв'язком PLC-MATLAB, встановленим через OPC UA та інтерфейс KEPServerEX. Результати, отримані в результаті експериментів, проведених за різних умов навантаження, показали, що запропонований PID aABC-FL значно мінімізував час встановлення та перерегулювання порівняно з класичним PLC-PID. Крім того, запропонований метод не тільки забезпечив хорошу динамічну реакцію, але й виявився стійким і надійним для реальних фізичних систем AVR.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Контроль напруги на клеммах у синхронних генераторах (SG) був складною проблемою як для академічних досліджень, так і для промислових застосувань протягом десятиліть. Ця проблема виникає через нелінійну природу SG та систем, у яких вони працюють, а також через вплив непередбачуваних параметрів на поведінку системи. Коливання навантаження призводять до коливань напруги, змушуючи схеми керування регулювати напругу збудження або струм збудження SG для відновлення номінальних значень. Пристрої, які регулюють напругу на клеммах синхронних генераторів і підтримують коливання напруги в заданих межах, називаються автоматичними регуляторами напруги (АРН). У паралельно (синхронно) працюючих синхронних генераторах і системах живлення АРН не тільки регулює вихідну напругу, але й забезпечує належний розподіл реактивної потужності між генераторами.

Для покращення можливостей керування автоматичними регуляторами напруги у літературі було запропоновано декілька передових стратегій керування. Було запропоновано дробовий диференціальний регулятор зворотного зв'язку високого порядку, який, як було показано, забезпечує менший відсоток перерегулювання, час встановлення, час наростання та час піку порівняно з іншими контролерами [1]. В іншому роботі нейромережевий прогностичний контролер з конкурентним алгоритмом був запропонований для АРН [2]. Інший запропонований підхід передбачає використання контролера з використанням алгоритму оптимізації Coyote для АРН в енергосистемі [3].

Досягнення надійного, стабільного та динамічного відгуку в системах АРН вимагає визначення оптимальних значень для пропорційних, інтегральних і похідних посилень (K_p , K_i та K_d). Відповідна техніка налаштування для отримання цих оптимальних посилень має важливе значення для забезпечення стабільної роботи системи.

Щоб підвищити надійність ПІД-регуляторів і оптимізувати пропорційно-інтегрально-похідну в автоматичному регуляторі напруги, різні методи оптимізації, методи штучного інтелекту та метаевристичні алгоритми були використані в процесах проектування та налаштування цих систем керування. Огляд літератури показує, що були запропоновані різні методи для оптимізації ПІД-регуляторів у системах АРН, включаючи алгоритм пошуку зозулі [4, 5], алгоритм жовтого сідла козла [6], алгоритм хаотичної чорної вдови [7], алгоритм пошуку майбутнього [8], нелінійний синус-косинусний алгоритм [9], алгоритм на основі викладання–навчання алгоритм оптимізації [10], алгоритм оптимізації кита [11, 12], алгоритм оптимізації койота [3], алгоритм на основі нирки [13], алгоритм стохастичного фрактального пошуку [14], алгоритм оптимізації рою частинок [15], алгоритм штучної бджолоїної колонії [16], алгоритм насіння дерев [17], алгоритм оптимізації сірого вовка [18], імперіалістичний конкурентний алгоритм [19], метаевристична оптимізація [20], оптимізація роєм частинок [21], оптимізація Рунге Кутта [22], оптимізація PSS та H_{∞} [23], монарх оптимізація типу «метелик» [24], налаштування нечіткої PID Sugeno [25], PID дробового порядку [26], гіперевристичний підхід [27] і підхід контролера ковзного режиму [28]. Крім того, були проведені оглядові дослідження дизайну контролера для АРН і метаевристичних алгоритмів, що використовуються для їх оптимізації [29,30].

Системи автоматизованого керування знайшли широке застосування в науці і техніці. У системах промислової автоматизації ПЛК зазвичай віддають перевагу контролерам і часто вважаються основним компонентом системи. У роботі було розроблено нечіткий ПІД-регулятор з використанням MATLAB і ПЛК для керування напругою в системі АРН [31]. В іншому дослідженні було змодельовано справжню концентровану сонячну електростанцію з керуванням системою через ПЛК із використанням нечіткого PID [32]. В іншому дослідженні повідомлялося про керування реальною фізичною системою через ПЛК з використанням глибокої

оптимізації навчання з підкріпленням [33]. У дослідженні додатків управління процесами з використанням ПЛК було запропоновано узагальнений прогностичний PI-контролер для підвищення продуктивності системи [34].

Система АРН складається з чотирьох основних компонентів: підсилювача, збудника, генератора та датчика. Кожен із цих компонентів моделюється як система першого порядку, яка характеризується відповідними коефіцієнтами підсилення, K_a , K_e , K_g і K_s , а також постійними часом T_a , T_e , T_g і T_s . У літературі спостерігають, що існуючі дослідження щодо АРН зосереджені на наступних темах: запропоновані контролери, запропоновані алгоритми оптимізації параметрів, порівняння переваг, методи налаштування, методи аналізу та індекси продуктивності. Були проведені комплексні опитування та порівняння досліджень, пов'язаних з АРН [13,28,30]. У цих дослідженнях зазвичай представлені блок-схеми неконтрольованого, контрольованого та метаевристично керованого АРН, а також їхні відповідні перехідні реакції, ступінчасті реакції та графіки стійкості. Крім того, вони включають графіки полюс-нуль, діаграми Боде, аналіз надійності та аналіз частотної характеристики.

Та сама класична модель АРН, функція передачі та аналогічні або тісно пов'язані діапазони параметрів використовуються майже в усіх дослідженнях. Основна увага була зосереджена на досягненні кращих результатів за допомогою застосованого метаевристичного методу порівняно з тими, що використовувалися в інших дослідженнях.

У цій роботі напруга на клемі мікрогідроелектростанції (МГЕС), встановленої як експериментальна установка, контролювалася за допомогою як класичного PID, так і адаптивного PID штучної бджолиної колонії з нечіткою логікою (aABC-FL PID).

Для керування напругою було запропоновано підхід розподілу завдань між апаратним забезпеченням, у якому більш складні та складні частини програмного забезпечення виконувалися на окремому комп'ютері, таким

чином зменшуючи програмне навантаження на ПЛК. Це дослідження може слугувати цінним прикладом для дослідників, які прагнуть виконувати складні операції за допомогою ПЛК. Підсилення ПІД-регулятора на ПЛК було налаштовано за допомогою алгоритму нечіткої логіки штучної бджолоїної колонії, який було реалізовано в MATLAB/Simulink на окремому комп'ютері. Параметри функції належності (ФН) розробленої нечіткої моделі були динамічно оптимізовані за допомогою запропонованого алгоритму адаптивної штучної бджолоїної колонії (aABC). Основні внески цього дослідження можна перерахувати таким чином:

Техніка aABC-Fuzzy PID була запропонована вперше в конструкції ПІД-регулятора реальної фізичної системи АРН, що відзначає найважливіший аспект оригінальності цього дослідження. На відміну від існуючих досліджень, замість використання класичної моделі АРН і функції передачі, був представлений експериментальний підхід, специфічний для керованої системи. На відміну від багатьох існуючих досліджень, динамічний та адаптивний дизайн управління був реалізований у реальній фізичній системі. Було представлено програму реального часу, яка демонструє практичну цінність і методологію налаштування запропонованого алгоритму з використанням промислового обладнання, такого як ПЛК. Це дослідження демонструє, що метаевристичні алгоритми можна застосовувати в промислових додатках з використанням простих контролерів, таких як ПЛК.

Нечіткий ПІД-регулятор aABC пропонує значні теоретичні та практичні переваги, включаючи продуктивність у реальному часі, налаштування параметрів у режимі онлайн та надійну поведінку конвергенції.

Цей підхід можна застосувати для розробки передових контролерів реального часу для використання як в академічних, так і в промислових програмах. Цей підхід можна поширити на гібридні та великомасштабні електростанції.

2 ПРИНЦИПИ РОБОТИ СИСТЕМИ

Експериментальна установка складається з трьох синхронізованих один з одним синхронних генераторів потужністю 1кВт, трьох односоплових турбін Пельтона, виготовлених за допомогою 3D-принтера, резервуара для води ємністю приблизно одну тонну, відцентрового насоса потужністю 5,5 кВт, який забезпечує необхідний потік і тиск, і перетворювача частоти потужністю 11 кВт, який контролює швидкість насоса. Крім того, в установці використовуються електричні компоненти, такі як аналізатори мережі, пристрої синхронізації, пропорційні клапани, датчики та контактори. Конструкція механічної та електричної систем прототипу, а також сценарій його роботи дуже схожі на реальну МГЕС. S7-1214C DC/DC/DC PLC використовувався для керування напругою та частотою синхронних генераторів на основі навантаження та інших процесів керування.

2.1 Принцип роботи експериментальної установки

У прототипі вода забирається з резервуара приблизною ємністю в одну тонну і подається до пропорційних клапанів через горизонтальний вал, чотириступінчастий насос, що приводиться в дію асинхронним двигуном, і підключену систему трубопроводів. Для контролю тиску води в системі використовується аналоговий датчик. Двигун відцентрового насоса, який керується перетворювачем частоти, підключеним до ПЛК, стабілізує тиск води. Пропорційні клапани регулюють витрату, направляючи воду через форсунки до турбін Пельтона з підвищеною швидкістю. Коли вода проходить через турбіни, вона втрачає енергію і повертається в резервуар. Механічна енергія, що виробляється в турбінах, потім перетворюється в електричну енергію синхронними генераторами, з'єднаними з валом турбіни. Збудження синхронних генераторів здійснюється перетворювачами

постійного струму, які керуються аналоговим сигналом 0–5 В. Частотою SG керує ПЛК, який керує пропорційними клапанами. Вироблена електрична енергія синхронізується та інтегрується в електромережу за допомогою пристроїв синхроскопа. Протягом цих процесів ПЛК безперервно відстежує та контролює систему за допомогою датчиків і мережевих аналізаторів. Крім того, програмне забезпечення PLC-SCADA TIA Portal V17 полегшує моніторинг подій у реальному часі. На рисунку 2.1 показана блок-схема системи.

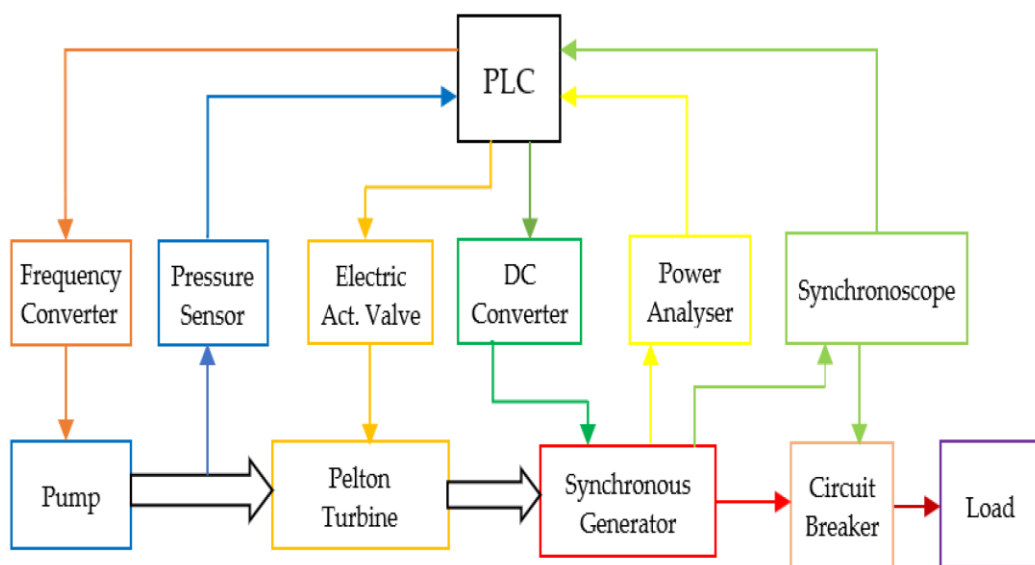


Рисунок 2.1 – Блок-схема системи

2.2 Контроль напруги

Аналогові керуючі входи 0–5 В перетворювачів постійного струму з'єднані з аналоговими виходами ПЛК для керування напругою, виробленою SG. Цей сигнал регулює напругу збудження, тим самим регулюючи вихідну напругу генераторів. Перед синхронізацією SG один з одним напруга генератора повинна відповідати напрузі шин. Процес, детально описаний на блок-схемі на рисунку 2.2, забезпечує відповідність цієї напруги між генераторами та шиною. Цей процес необхідний для успішної синхронізації та припиняється після завершення синхронізації.

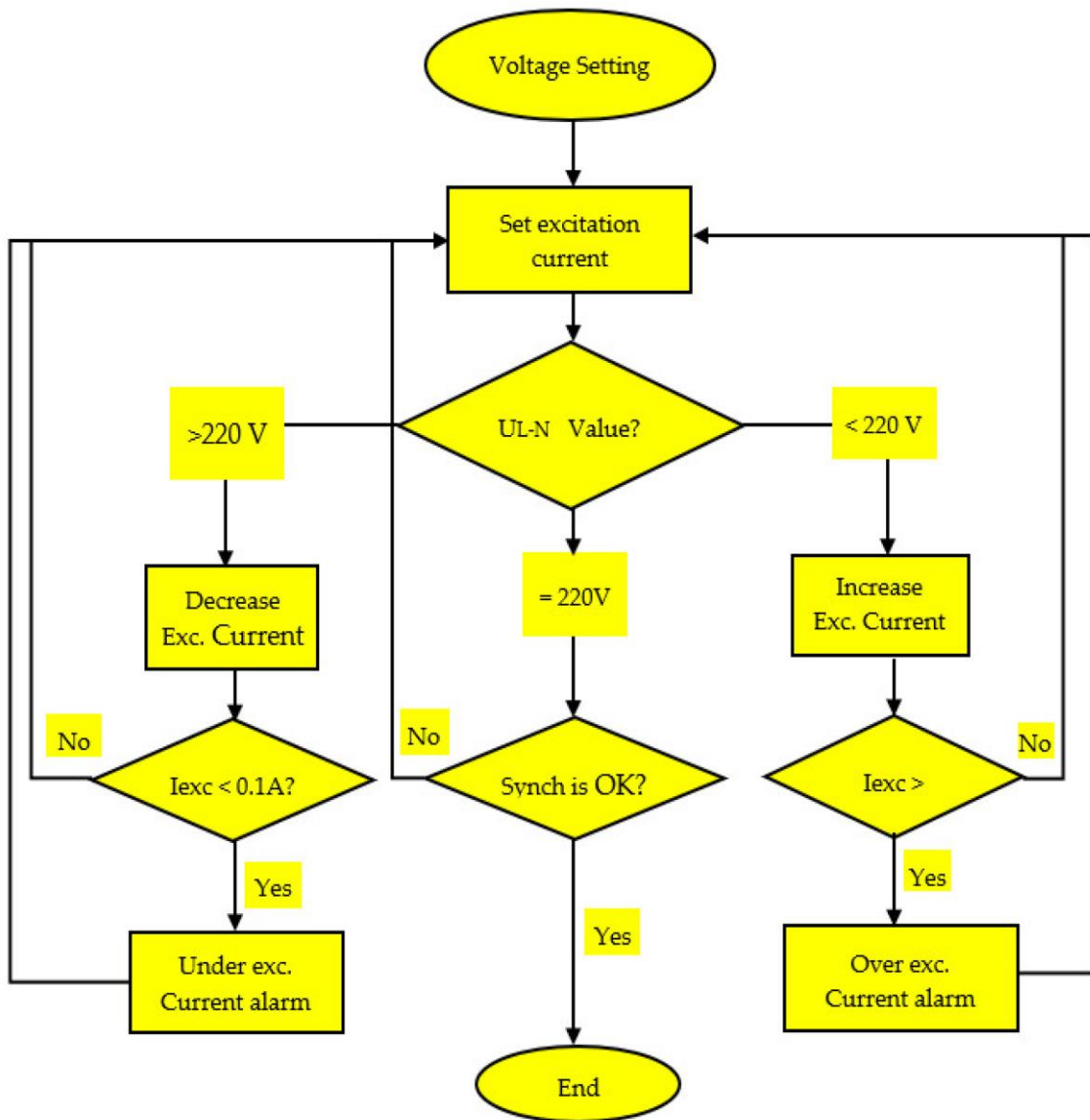


Рисунок 2.2 – Блок-схема керування напругою

Тут I_{exc} – струм збудження, а V_{L-N} – напруга фази-нейтралі.

Номінальні значення SG в дослідній установці такі:

- потужність: 1 кВт;
- швидкість: 1500 об / хв;
- частота: 50 Гц;
- напруга: 380 В змінного струму (фаза-нейтраль: 220В);
- струм: 2,3А AC;
- напруга збудження: 72В постійного струму;
- струм збудження: 2,1А DC;
- номінальний струм і напруга ПГ є діючими значеннями.

Контроль напруги на клеммах SG за змінних умов навантаження досягається за допомогою функції PID_Compact. Алгоритм PID працює відповідно до рівняння

$$y = K_p \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right]$$

Тут y – вихідне значення алгоритму PID, K_p – пропорційне посилення, s – оператор Лапласа, b – вага пропорційної дії, w – задане значення, x – значення процесу, T_I – інтегральний час дії, T_D – час дії похідної, a – коефіцієнт затримки похідної, c – вага похідної дії. На рисунку 2.3 показана блок-схема PID керування напругою за допомогою ПЛК.

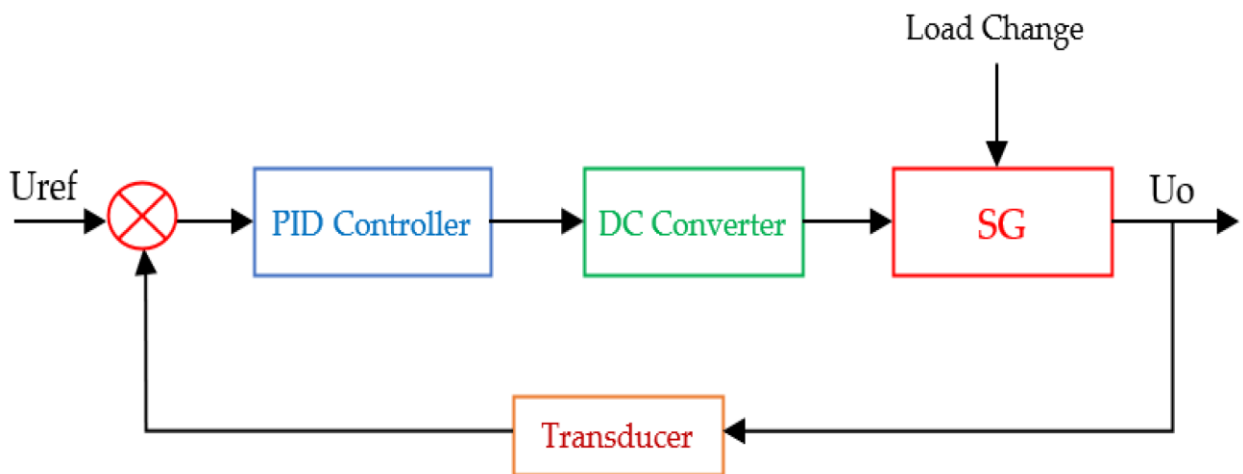


Рисунок 2.3 – Блок-схема PID регулювання напруги

Компактний PID, створений для SG у блоці циклічних переривань OB30 в інтерфейсі TIA Portal V17, показано на рисунку 2.4.

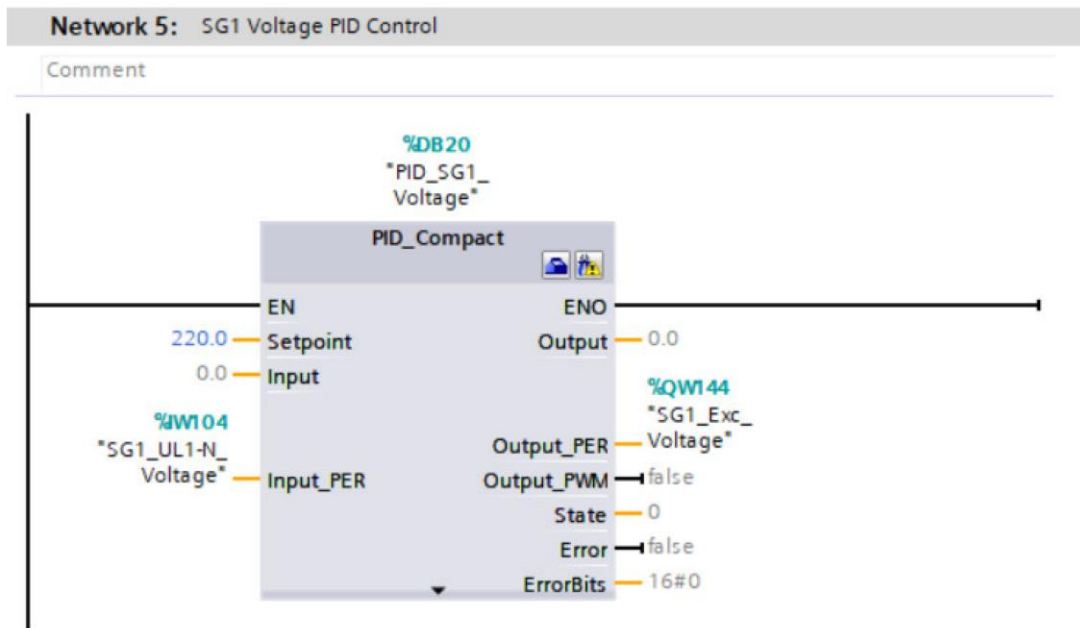


Рисунок 2.4 – Компактний PID на TIA Portal

PID_Compact отримує вимірне значення процесу в контурі керування та після його обробки порівнює значення з заданим значенням. Використовуючи отримане відхилення керування, PID_Compact обчислює вихідне значення, яке швидко адаптується до заданого значення. Для ПІД-регулятора розраховане вихідне значення складається з трьох дій, а саме P, I та D.

Пропорційна дія безпосередньо реагує на відхилення регулювання, збільшуючись пропорційно йому. Інтегральна дія поступово збільшує вихідне значення з часом, доки відхилення контролю не буде повністю збалансоване. Зі швидкістю зміни відхилення керування похідна збільшується, сприяючи швидкій корекції заданого значення. Він зменшується, коли швидкість змін падає, щоб забезпечити стабільність. Під час попереднього налаштування PID_Compact обчислює параметри P, I та D для контрольованої системи, а під час точного налаштування PID_Compact використовується для подальшого налаштування параметрів.

Зміни у встановленому значенні можуть послабити зважування пропорційної дії та регулюються між 0,0 і 1,0. При 1,0 пропорційна дія повністю ефективна для зміни заданого значення, тоді як при 0,0 вона не

впливає. Однак, коли значення процесу змінюється, пропорційна дія залишається повністю ефективною. Зміни у встановленому значенні можуть послабити зважування похідної дії та регулюються між 0,0 і 1,0. При 1,0 похідна дія повністю ефективна для зміни заданого значення, тоді як при 0,0 вона не впливає. Однак, коли значення процесу змінюється, похідна дія залишається повністю ефективною.

Після завершення інших частин програмного забезпечення відповідно до робочого сценарію PID Compact в інтерфейсі TIA Portal використовувався для контролю напруги. Вікно конфігурації в PID Compact було відкрито, і основні параметри були налаштовані. Тип контролера встановлено на напругу. У розділі Input/Output Parameters Input_PER (аналоговий) і Output_PER (аналоговий) вибрано, оскільки вихідна напруга безперервно вимірюється через аналоговий вихід аналізатора потужності, а керуючий сигнал для перетворювача постійного струму з регулюванням напруги також є аналоговим. Задану величину було налаштовано як 220 В. Вихідна напруга генератора постійно вимірювалася як ефективне (RMS) значення. У розділі «PID Parameters» параметри були залишені зі значеннями за замовчуванням, як показано на рисунку 2.5. Ці значення за замовчуванням використовувалися як початкові налаштування параметрів.

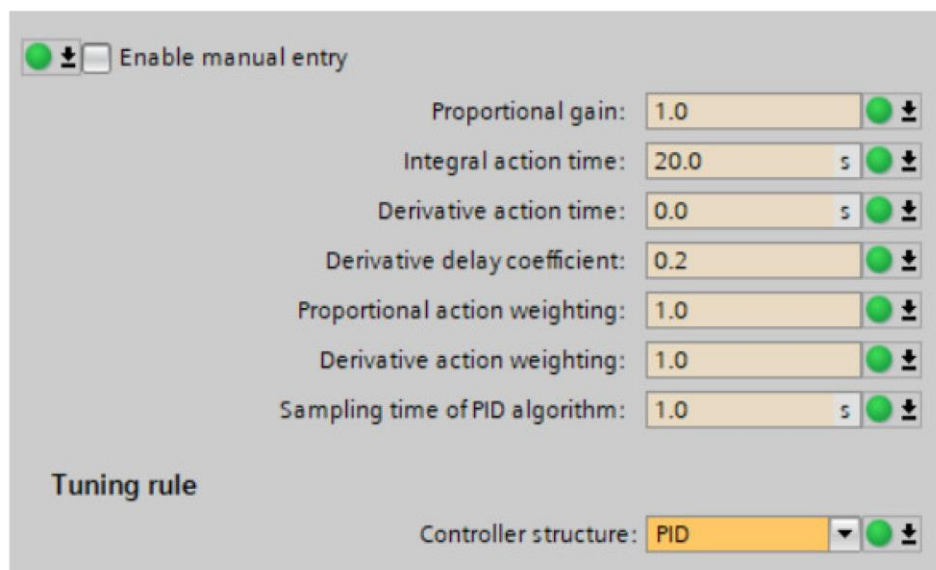


Рисунок 2.5 – Значення параметрів ПІД за замовчуванням (початкові)

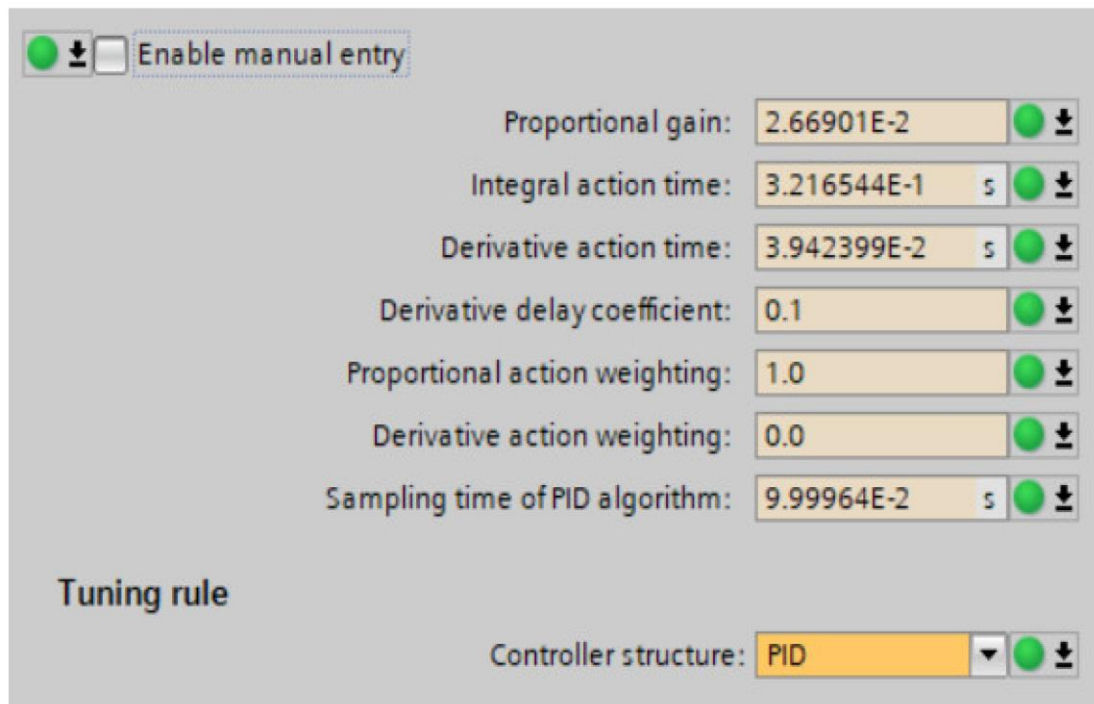


Рисунок 2.6 – Значення параметрів PID, розраховані ПЛК

Після завершення налаштувань конфігурації, згаданих вище, реальна/фізична система була введена в експлуатацію. Було відкрито вікно введення в експлуатацію в PID Contrast, і відповідно було виконано процеси попереднього та точного налаштування. Поки система працювала, відповідні значення K_p , K_i та K_d для системи автоматично розраховувалися на стороні ПЛК після процесів попереднього та точного налаштування. Після цього система контролювалася на основі значень K_p , K_i та K_d , розрахованих ПЛК. Значення, автоматично розраховані ПЛК після процесів попереднього та точного налаштування, показані на рисунку 2.6.

3 МЕТОД НА БАЗІ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ ШТУЧНОЇ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ

У цьому розділі представлено запропонований метод для системи АРН, що працює в реальному середовищі. Метод поєднує ефективну роботу нечіткої логіки в задачах керування з ефективністю адаптивного алгоритму штучної бджолиної колонії (аABC) у задачах числової оптимізації (NOP). У цьому контексті динамічна нечітка система, яка налаштовує параметри PID, досягає балансу між точністю та складністю завдяки аABC [36], що є вдосконаленою версією класичного ABC [37]. Цей метаевристичний підхід спрямований на створення надійної моделі.

У дослідженнях, що регулюють параметри ПІД-регулятора за допомогою системи нечіткої логіки, зазвичай перевагу надають класичній структурі нечіткої ПІД-регулятора. Однак у деяких дослідженнях для набору даних, отриманого шляхом системного моделювання, використовується контролер нечіткої логіки, змодельований метаевристичними алгоритмами, а система керується статичним контролером під час виконання. У запропонованому методі використовується адаптивний контролер нечіткої логіки, що дозволяє системі адаптуватися до середовища за короткий проміжок часу.

У [38] система нечіткої логіки та метаевристичні алгоритми використовувалися разом для адаптивного ПІД-керування. Параметри ПІД-керування оновлювалися під час виконання за допомогою метаевристичного алгоритму, тоді як система нечіткої логіки використовувалася для підвищення ефективності алгоритму. У запропонованому методі для адаптивного керування системою було створено більш надійний нечіткий ПІД-керування, змодельований за допомогою метаевристичного методу.

У цьому дослідженні параметри системи нечіткої логіки нормалізовані в діапазоні $[0, 1]$, а метаевристичний метод коригує параметри функції

належності нечіткої логіки на основі цієї чутливості. Отже, запропонований метод також може бути адаптований для керування іншими нелінійними системами [38-40].

Запропонований метод написано в MATLAB, а застосунок працює на машині з 32 ГБ оперативної пам'яті, процесором i7-1165MG7 2.80 та операційною системою Windows 10.

Метод спрямований на оптимізацію параметрів ПД-регулятора (K_p , K_i та K_d) шляхом врахування похибки (e) результату, отриманого системою, та зміни похибки (ce) порівняно з попереднім кроком, з використанням підходу, який широко використовується в нечітких ПД-проектах. Для підвищення ефективності методу нечіткі змінні були визначені в діапазоні $[0, 1]$, а значення параметрам функції належності (ФН) цих змінних були призначені в тому ж діапазоні. Тому нижня та верхня межі для a_{ABC} , яка шукає оптимальні значення для цих параметрів, були визначені як 0 та 1 відповідно. На попередньому етапі цього дослідження система працювала з випадковими навантаженнями, а дані про похибки та час налаштування, отримані з різними параметрами ПД, були збережені для подальшого аналізу. Був проаналізований набір даних, підготовлений приблизно з 500 експериментів, і для кожної змінної (вхід-вихід) були визначені мінімальні та максимальні значення, як представлено в таблиці 3.1. Потім набір даних був нормалізований до діапазону $[0, 1]$.

Таблиця 3.1 – Мінімальні та максимальні значення змінних у наборі даних

	e	ce	K_p	K_i	K_d
Min	-120	-120	0	0	0
Max	120	120	5	3	1

Похибка та зміна похибки можуть набувати від'ємних значень. Однак, для ефективнішого проектування, вигідно обмежити значення нечітких змінних та метаевристичних методів діапазоном $[0, 1]$. У цьому контексті

зауважте, що мінімальні значення у стовпцях e та ce в таблиці 3., які використовувалися для масштабування, є від'ємними.

Запропонований метод проілюстровано на рисунку 3.1.

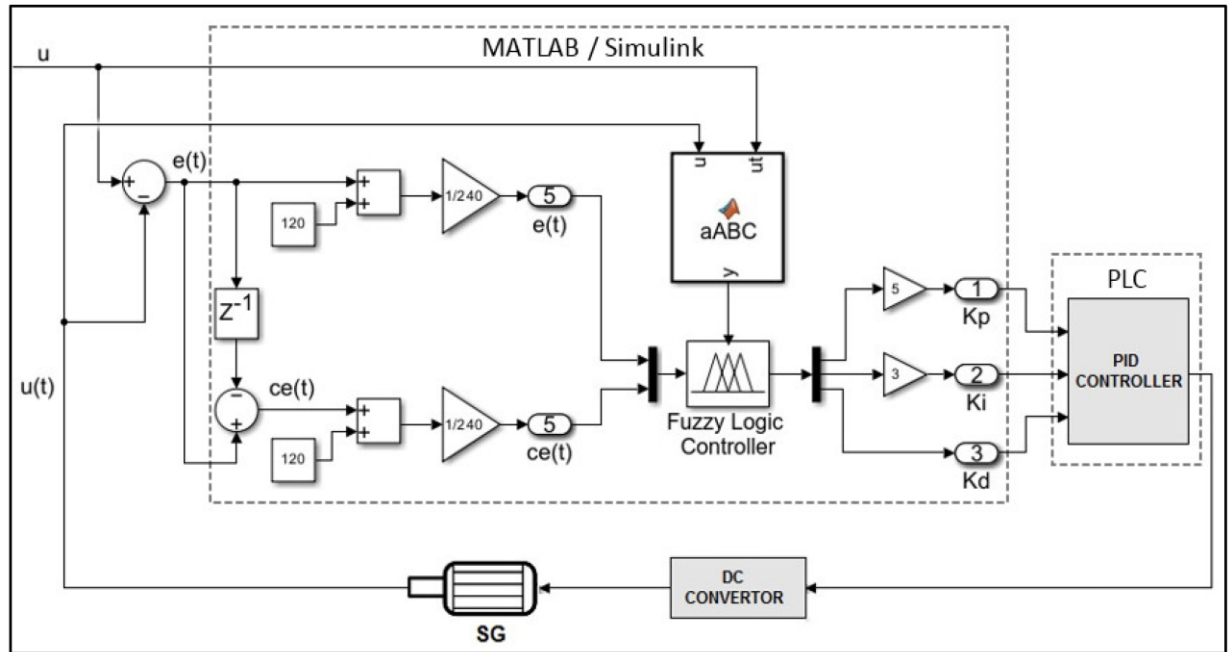


Рисунок 3.1 – Блокова схема aABC-fuzzy-PID

Як показано на рисунку 3.1, вихід системи порівнюється з опорним значенням, визначеним як 220В, і відповідно розраховується похибка. Ця похибка потім вводиться в алгоритм aABC, який шукає параметри нечіткої логіки, що оптимізують параметри ПІД-регулятора для мінімізації похибки на наступному кроці, тим самим досягаючи меншої похибки, ніж очікувалося. Після проектування нової нечіткої моделі поточні значення похибки та зміни похибки масштабуються до діапазону $[0, 1]$ та вводяться в нечітку модель. Значення параметрів ПІД, визначені нечіткою моделлю, потім множаться на необхідні коефіцієнти та призначаються ПІД-регулятору. Деталі нечіткої логіки та методів aABC, що використовуються в цьому методі, описані нижче.

3.1 Сторона нечіткої логіки

У нечіткій логіці (fuzzy logic, FL), призначеній для налаштування параметрів ПІД-регулятора методу, похибка (e) та зміна похибки (ce) використовуються як вхідні змінні, тоді як параметри ПІД-регулятора, що налаштовуються для цих входів (K_p , K_i та K_d), використовуються як вихідні змінні. Для аналізу зв'язків між входами та виходами було використано систему висновків Мамдані. Структура нечіткої моделі, що використовується в методі, представлена на рисунку 3.2.

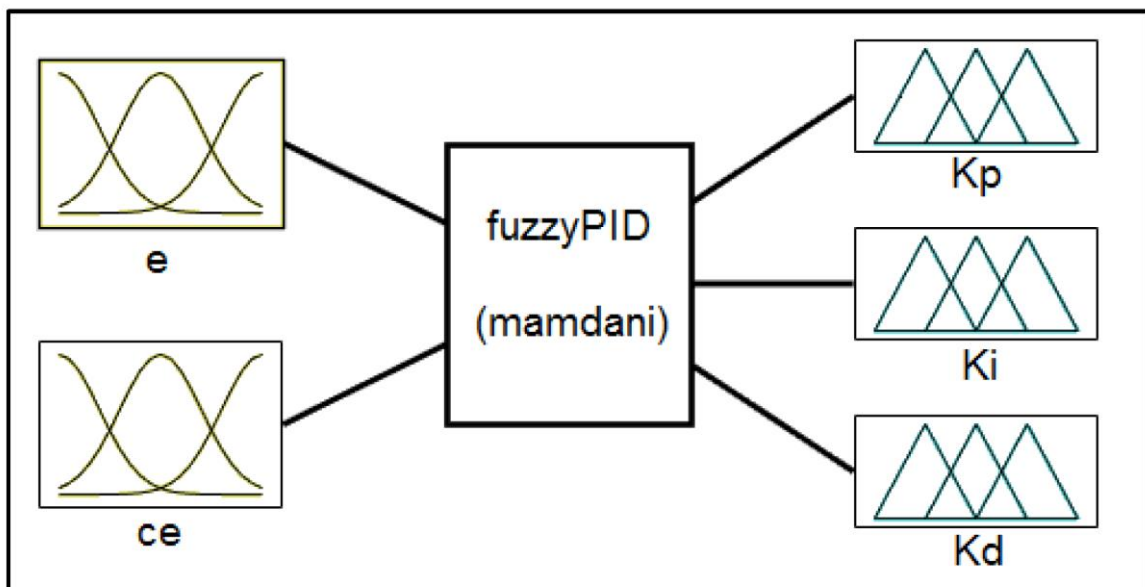


Рисунок 3.2 – Структура сторони FL

Кожна змінна в нечіткій моделі містить ФН, які називаються негативним великим, негативним середнім, негативним малим, нульовим, позитивним малим, позитивним середнім та позитивним великим. Усі ФН розроблені в одному типі, як трикутник (*trimf*), Гаусс (*gaussmf*) та комбінований Гаусс (*gauss2mf*), і продуктивність системи перевіряється з цими типами в попередньому процесі. Тип трикутник – це тип ФН, який зазвичай використовується в нечітких ПІД-системах, що може забезпечити успішні рішення. Його функція має три параметри. Тип Гауса має плавні

переходи замість різких кривих, як тип трикутник. У його функції права та ліва сторони ФН симетричні одна до одної. Крім того, функція має два параметри; таким чином, вона є вигідною з точки зору оптимізації параметрів. Комбінований тип Гауса – це комбінована форма двох різних типів Гауса. Криві на правій та лівій сторонах ФН незалежні одна від одної. У цьому контексті функція є гнучкішою, ніж трикутні та гауссові ФН, і в дослідженнях [41] було отримано більш успішні рішення. Детальна інформація про вибрані ФН наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Функції належності, що використовуються в методі

Найменування	Форма	Формула
Trimf		$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$
Gaussmf		$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$
Gauss2mf		

Математичні формулювання ФН наведено у стовпці формул у таблиці 3.2 як параметри *trimf*: *a* – початкова точка трикутника; *b* – значення, при якому ступінь належності досягає 1; та *c* – третя точка, в якій трикутник завершується. У функціях *gaussmf* та *gauss2mf* σ представляє стандартне відхилення, а *c* – середнє значення для функції Гауса. Для *gauss2mf* ліва крива графіка функції визначається σ^{-1} та c^{-1} , тоді як права крива

визначається σ^2 та c^2 (код MATLAB: $y = gauss2mf(x, [\sigma^{-1}, c^{-1}, \sigma^2, c^2])$) [42] (деталі доступні в MATLAB R2021a).

Нечітку модель було розроблено як систему на основі правил, і для кожного виходу використовувалася таблиця правил у таблиці 3.3. У процесі налаштування моделі правила зберігалися постійними, тоді як для параметрів ФН шукали оптимальні значення.

Таблиця 3.3 – Таблиця правил, що використовується для всіх виходів системи

K _p , K _i , K _d		e						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
се	NL	PL	PL	PL	PL	PM	ZE	ZE
	NM	PL	PL	PL	PL	PM	ZE	ZE
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NM	NM
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
	PS	PM	PM	ZE	NS	NM	NM	NM
	PM	ZE	ZE	NM	NL	NL	NL	NL
	PL	ZE	ZE	NM	NL	NL	NL	NL

3.2 Метаевристична сторона

З точки зору нечіткої логіки запропонованого методу, продуктивність системи покращується шляхом оптимізації параметрів ФН при збереженні правил постійними. У цьому контексті потрібен метаевристичний підхід, який може ефективно налаштовувати числові параметри, ефективно змінювати числові параметри, ефективно сканувати простір пошуку та забезпечувати швидку збіжність. Тому алгоритм aABC є кращим для налаштування нечіткої системи в запропонованому методі. Стандартний ABC – це метаевристичний метод, розроблений для NOP [37]. Він має перевагу над іншими метаевристичними методами завдяки своїй перевазі

меншої кількості параметрів та простоти застосування. Метод був успішно застосований до рішень NOP у різних галузях інженерії з його оригінальною моделлю, вдосконаленими версіями та розширеннями [43, 44]. Алгоритм також забезпечив успішні рішення для оптимізації різних методів штучного інтелекту [45, 46]. aABC – це вдосконалена версія ABC, яка динамічно оновлює параметри ABC під час процесу пошуку, таким чином забезпечуючи алгоритму більш ефективний баланс між експлуатацією та дослідженням. У [36] ваги штучної нейронної мережі були оптимізовані за допомогою алгоритму aABC. Таким чином, ефективність алгоритму для NOP була перевірена на методі штучного інтелекту шляхом порівняння його з сучасними методами.

У стандартному алгоритмі ABC є два параметри: «food» та «limit». Параметр «food» представляє кількість випадкових рішень, які будуть згенеровані спочатку. Кількість штучно зайнятих бджіл та штучних бджіл-спостерігачів, які виконують процес локального пошуку, дорівнює кількості продуктів. Параметр «limit» вказує, скільки разів поточне рішення може бути використане в процесі генерації нового рішення. Кожному продукту призначається однакова кількість граничних значень (будь-яке можливе рішення в області пошуку). У процедурах зі штучно зайнятою бджолою та штучною бджолою-спостерігачем, якщо нове рішення краще за поточне, поточне рішення в матриці рішень замінюється новим рішенням, і лічильник для цього нового рішення скидається. Якщо за обмежену кількість спроб не можна отримати краще рішення з поточного рішення, поточне рішення видаляється з матриці рішень, і генерується нове випадкове рішення.

В алгоритмі aABC пошук здійснюється з урахуванням значень придатності рішень. Значення придатності ($fit(X_i)$) для рішення i обчислюється, як показано в рівнянні

$$fit(X_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(X_i)} & \text{if } (f(X_i) \geq 0) \\ \frac{1}{1 + abs(f(X_i))} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тут $f(X_i)$ представляє значення, обчислене за допомогою цільової функції задачі для розв'язку X_i .

У стандартному алгоритмі ABC кожному розв'язку призначається однакова кількість лімітів. У цьому контексті, якщо краще рішення не може бути отримане з жодного з поточних розв'язків, метою є $limit_{sum} = food * limit$. Така ж кількість спроб також використовується в алгоритмі aABC. Однак, щоб уникнути надмірних витрат часу на невдалі розв'язки та мати можливість ефективно сканувати околиці успішних розв'язків, загальна сума лімітів ($limit_{sum}$) розподіляється відповідно до значень придатності розв'язків. Тому в алгоритмі aABC ліміти для всіх існуючих розв'язків оновлюються на кожній ітерації. Поточна межа для розв'язку i розраховується за допомогою рівняння

$$limit(i) = \frac{fit(X_i) * food * D}{\sum_{j=1} fit(X_j)}$$

Тут D представляє кількість елементів (розмірність) будь-якого вектора рішень.

Одна з головних відмінностей між aABC та ABC полягає в тому, що aABC використовує жадібний підхід у процедурі штучної бджоли-спостерігача. В aABC, після завершення фази штучної залученої бджоли, середнє значення придатності для існуючих рішень розраховується за допомогою рівняння

$$fit_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{food} fit(X_i)}{food}$$

У фазі штучного спостерігача-бджоли для отримання нових рішень використовуються рішення з кращими значеннями придатності, ніж середнє значення придатності.

Підхід сканування простору рішень та стратегія генерації рішень запропонованого методу були протестовані на одноцільових задачах числової оптимізації, а для статистичних тестів aABC були обрані широко використовувані контрольні функції CEC2019. CEC2019 – це набір контрольних функцій, відомий як «100-значний виклик». Набір складається з десяти мультимодальних тестових функцій, які представляють складні задачі оптимізації. Усі функції є функціями мінімізації та масштабовані. Деякі функції (CEC01-CEC03) взяті як є, тоді як деякі (CEC04-CEC10) зміщені та повернуті. Крім того, функції дозволяють учасникам налаштувати до двох параметрів. У таблиці 3.4 представлено діапазон пошуку рішень, розмірності (D) та глобальний оптимум (найкращий) для кожної тестової задачі CEC2019.

Таблиця 3.4 – Функції бенчмарку CEC2019

Ідентифікатор	Формула	Діапазон	D	Best
1	2	3	4	5
CEC01	Задача апроксимації поліномів Чебишева за Сторном	[-8192, 8192]	9	1
CEC02	Задача оберненої матриці Гільберта	[-16,384, 16,384]	16	1
CEC03	Кластер мінімальної енергії Леннарда-Джонса	[-4, 4]	18	1
CEC04	Функція Растрігіна	[-10, 10]	10	1

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5
SEC05	Функція Гривангка	$[-10, 10]$	10	1
SEC06	Функція Вейєрштрасса	$[-10, 10]$	10	1
SEC07	Модифікована функція Швевеля	$[-10, 10]$	10	1
SEC08	Розширена функція Шаффера F6	$[-10, 10]$	10	1
SEC09	Функція «Щасливий кіт»	$[-10, 10]$	10	1
SEC10	Функція Еклі	$[-10, 10]$	10	1

Продуктивність алгоритму aABC порівнювали з результатами, отриманими за допомогою алгоритмів у [48] для того самого набору функцій. Продуктивність алгоритму порівнювали з різними алгоритмами оптимізації, включаючи алгоритм запилення квітів для глобальної оптимізації (FPA), оптимізатор сірого вовка (GWO), алгоритм рою Salp (SSA), пошук зозулі (CS), алгоритм синус-косинус (SCA) та адаптивний алгоритм запилення квітів (AFPA).

Для справедливого порівняння набір параметрів aABC було скориговано відповідно до значення в [49]. Значення «food» для ABC та aABC було встановлено на 15 (зауважте, що в алгоритмах ABC розмір колонії складається з кількості «штучно зайнятих бджіл» та «штучних бджіл-спостерігачів», що дорівнює «food»). «Limit» в ABC та aABC розраховується як $\text{food} * D$.

Алгоритми ABC та aABC були виконані 30 разів незалежно для кожної функції, а максимальне число циклів (MCN) у кожному експерименті було встановлено на 500.

Результати всіх конкурентних алгоритмів оцінювалися на основі найкращих, найгірших, середнього значення та значень стандартного відхилення (SD) у 30 незалежних експериментах для кожної функції. Результати, отримані за допомогою алгоритмів, представлені в Додатку Б.

Якщо оцінити таблицю в додатку Б із загальної точки зору, то можна спостерігати, що алгоритм aABC досягає кращих результатів, ніж інші метаевристики, для тестових задач SEC2019. Алгоритм aABC дав найкращі рішення у п'яти з десяти вибірок (SEC02, SEC03, SEC04, SEC05 та SEC08). Він дав другі найкращі рішення для функцій SEC06, SEC09 та SEC10 та третє найкраще рішення для функцій SEC01 та SEC07. У цьому відношенні він посідає найкраще місце загалом із середнім значенням 1,7.

Для аналізу параметрів алгоритм aABC було протестовано на вибірці SEC01 з бенчмарк-функцій SEC2019 з різними комбінаціями параметрів. Оскільки алгоритм працює в онлайн-режимі з невеликим розміром колонії, в аналізі параметрів «food» алгоритму було призначено невеликі значення. Значення 3, 5 та 7, а також 10, 20 та 50 було призначено параметрам «food» та «limit» відповідно. Отримані результати наведено в таблиці 3.5.

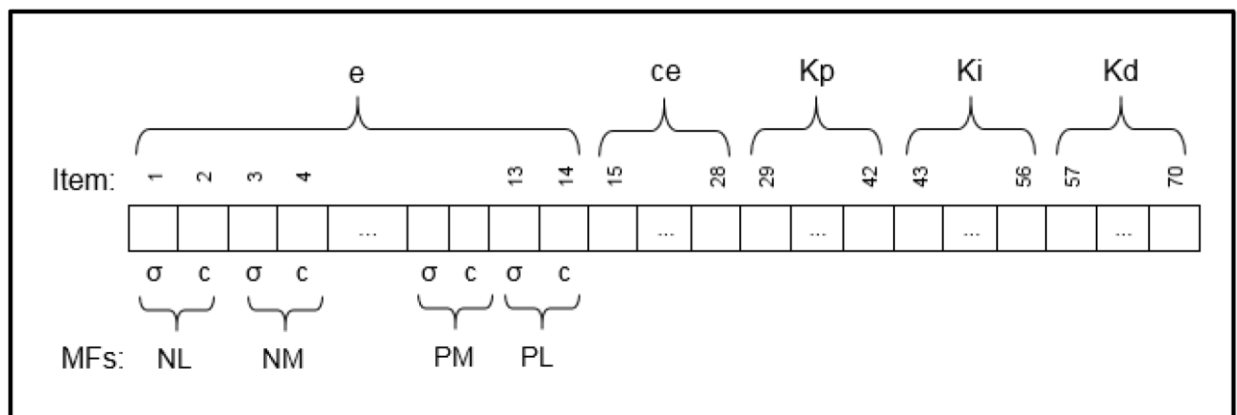
Таблиця 3.5 – Результати, отримані для параметричного аналізу SEC01

Food	Limit	Best	Worst	Mean	SD
3	10	9.73×10^{10}	1.17×10^{12}	7.91×10^{11}	3.34×10^{10}
	20	3.04×10^{10}	4.89×10^{11}	9.07×10^{10}	1.01×10^9
	50	2.41×10^{10}	4.73×10^{11}	7.03×10^{10}	1.04×10^9
5	10	1.40×10^{10}	2.22×10^{11}	8.21×10^{10}	3.81×10^9
	20	2.17×10^9	5.74×10^{10}	6.63×10^9	7.48×10^8
	50	2.21×10^9	5.05×10^{10}	7.87×10^9	8.03×10^8
7	10	5.11×10^9	1.01×10^{10}	9.19×10^9	1.00×10^9
	20	2.46×10^9	7.47×10^9	4.12×10^9	4.11×10^9
	50	2.19×10^9	8.02×10^9	5.01×10^9	6.97×10^9

Під час аналізу результатів у таблиці 3.5 спостерігається, що алгоритм aABC дає кращі результати зі значеннями параметрів food = 5 та limit = 20 порівняно з іншими комбінаціями параметрів.

3.2.1 Вектор розв'язків

Оскільки нечіткі правила в частині FL методу є фіксованими, у метаевристичній частині шукаються лише оптимальні параметри для функцій належності. У попередньому розділі розглядалася нечітка модель з типами ФН *trimf*, *gaussmf* та *gauss2mf*, які були розроблені та протестовані в попередньому дослідженні. З таблиці 3.2 яка містить детальну інформацію про вибрані типи MF, видно, що кожен тип MF має різну кількість параметрів. Тому в експериментах для кожної нечіткої моделі були розроблені вектори рішень різної довжини. На рисунку 3.3 пояснюється вектор, розроблений для нечіткої моделі з функціями належності *gaussmf* в алгоритмі aABC.



Рисунко 3.3 – Структура вектора розв'язку, що використовується в метаевристичній частині методу

Як пояснювалося в попередньому підрозділі, у нечіткій моделі системи є п'ять змінних, два входи та три виходи, і кожна змінна має сім ФН. Отже, довжина будь-якого вектора рішень, який має бути згенерований на стороні aABC системи, дорівнює «параметр $5 \cdot 7 \cdot \text{ФН}$ ». У цьому контексті для нечітких моделей з ФН типів *gaussmf*, *trimf* та *gauss2mf* відповідно були розроблені вектори з 70, 105 та 140 елементами. На рисунку 3.1 показано

структуру вектора рішень, що використовується під час проектування нечіткої моделі з ФН типу gaussmf.

3.2.2 Цільова функція для офлайн-режиму

У попередньому дослідженні було збережено приблизно 500 експериментальних результатів, отриманих з різними параметрами ПД-регулятора. З цих експериментів було відібрано 200 рішень, які досягли найкоротшого часу встановлення з мінімальною похибкою. Навчальний набір (Т) містив 75 зразків, що представляють 200 вибраних рішень.

Результати, отримані за допомогою розробленої нечіткої моделі для параметрів ПД, порівнювалися з цільовими значеннями в навчальному наборі (Т), і для кожної вибірки розраховувалася похибка. Загальна похибка (Е), яка представляє цільову функцію, розраховувалася за допомогою рівняння

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{75} (y_1 - T_{i3})^2 + (y_2 - T_{i4})^2 + (y_3 - T_{i5})^2$$

Зверніть увагу, що перший та другий стовпці в навчальному наборі – це похибка (e) та зміна похибки (se) відповідно.

3.2.3 Налаштування параметрів для автономного дизайну

Алгоритм aABC було виконано 30 разів незалежно для кожної версії нечіткої моделі з різними типами ФН, використовуючи параметри, наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Налаштування параметрів aABC для автономного проектування нечіткого ПД-регулятора

Ім'я	Значення
<i>food</i>	10
<i>limit</i>	100

У кожному експерименті максимальну кількість циклів було встановлено на 500. Для кожної нечіткої моделі було записано мінімальні, максимальні, середні значення та стандартне відхилення помилок, отриманих у 30 випробуваннях.

3.3 Експерименти для офлайн-режима

Запропонований метод було протестовано для проектування оптимальної моделі нечіткого ПД відповідно до підготовленого набору даних. У кожному експерименті максимальну кількість циклів було встановлено на 500, і відповідно було записано мінімальні, максимальні, середні та стандартні відхилення результатів помилок, отриманих у 30 випробуваннях для кожної нечіткої моделі. Результати представлено в таблиці 3.4. Оскільки система була розроблена відповідно до значень, нормалізованих у діапазоні $[0, 1]$, результати в таблиці 3.7 представляють масштабовані значення помилок у цьому діапазоні.

Таблиця 3.7 – Результати офлайн-експериментів

	Min	Max	Mean	SD
trimf	0.0471	0.0516	0.0486	0.0019
gaussmf	0.0452	0.0473	0.0465	0.0006
gauss2mf	0.0464	0.0523	0.0484	0.0022

Коли оцінюються результати в таблиці Додатку Б, можна побачити, що найуспішніші результати з точки зору мінімуму, максимуму, середнього значення та стандартного відхилення отримуються, коли нечітка модель має ФН типу `gaussmf`. Оскільки ФН `gaussmf` має менше параметрів, ніж інші, оптимізувати нечітку модель з цим типом ФН легше. Навпаки, `trimf` має чіткіші криві, ніж інші типи. Простір рішень задачі, що складається з подвійних рішень у діапазоні $[0, 1]$, можна вважати таким, що має гладку поверхню переходу. `gauss2mf` є більш вигідним, ніж функція `gaussmf`, з точки зору оптимізації. Тому вважається, що модель `aABC` з більшою популяцією дає кращі рішення для ФН типу `gauss2mf` шляхом виконання більшої кількості циклів. Однак, в онлайн-оптимізації метою є отримання кращих рішень за короткий час, як правило, з меншою популяцією. Попередні дослідження показують, що за допомогою `gaussmf` можна отримати більш успішні рішення. Як результат, нечітка модель з ФН типу `gaussmf` є кращою в онлайн-оптимізації.

3.4 Онлайн-модель `aABC-FL`

Офлайн-експерименти, проведені на попередньому етапі цього дослідження, дали цінну інформацію про ефективність запропонованої нечіткої моделі та алгоритму `aABC`. Онлайн-модель методу була розроблена на основі цих результатів. У цьому контексті було визначено онлайн-цільову функцію для алгоритму `aABC` та визначено параметри проектування для отримання результатів за короткий час.

3.4.1 Онлайн-цільова функція для `aABC-FL`

У цій роботі метод інтеграла абсолютного значення помилки (IAE), який враховує нещодавні помилки, був обраний як критерій онлайн-продуктивності для `aABC`. Метод IAE, який може однаково зважувати

нещодавні помилки та перехідну характеристику, широко використовується при проектуванні нечітких систем з метаевристичними методами. Якщо значення IAE, розраховане за допомогою рівняння для вектора рішень, краще за попереднє значення IAE, нечітка модель переробляється відповідно до цього вектора

$$IAE = \int_0^t |u - u(t)| dt = \int_0^t |e(t)| dt$$

Тут U – це бажана напруга, а $u(t)$ – фактична напруга, що виробляється системою. Тому в онлайн-процесі значення функції розв'язку $i(f(X_i))$, що використовується в першому рівнянні, є значенням IAE, розрахованим за допомогою рівняння.

3.4.2 Налаштування параметрів для онлайн-проекування aABC-FL

У розробленій системі час відгуку ПЛК трохи перевищує 100 мілісекунд. Отже, загальний час генерації рішення за допомогою aABC та час перепроєкування нечіткої моделі повинні бути виконані менш ніж за 100 мілісекунд для кожного зразка.

Таблиця 3.8 – Налаштування параметрів aABC для онлайн-проекування нечіткого ПД-регулятора

Ім'я	Значення
food	5
limit	20

Враховуючи ці критерії, онлайн-параметри проєкування для aABC наведено в таблиці 3.8.

4 ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

На МГЕС, яка була встановлена як експериментальна установка, було проведено численні експерименти, отримані результати були зареєстровані та перетворені на графіки. Графіки були отримані для обох випадків: коли SG1 працює окремо та коли всі три SG працюють разом синхронно. У цьому розділі представлені результати експериментів з раптовими та великими коливаннями навантаження (з навантаженнями 50%, 75% та 100% від номінальної потужності SG), які суттєво змінюють напругу на клеммах SG, замість коливань навантаження малої потужності, які мають дуже незначний вплив на значення напруги на клеммах. У цих експериментах навантаження вмикалися в точці $t = 0$ та у формі імпульсного переходу.

Результати експериментів від холостого ходу до навантаження 500 Вт (0–50% навантаження) та від навантаження 500 Вт до холостого ходу (зняття навантаження) зображено на рисунках 4.1 та 4.2 відповідно. В експерименті зі звичайним ПД-регулятором (PLC-PID) мінімальна напруга становила 200,2 В (максимальне недовищення становило 19,8 В), а максимальна напруга – 234,3 В (максимальне перевищення становило 14,3 В). Напруга досягла заданого значення відповідно за 10 та 13 с при управлінні класичним ПД-регулятором.

В експерименті з використанням aABC-fuzzy-PID мінімальна напруга становила 217,2 В (максимальне недорегулювання становило 2,8 В), а максимальна напруга – 223,2 В (максимальне перерегулювання становило 3,2 В). Значення напруги досягло заданого значення за 2 та 3 с в експериментах з навантаженням та скиданням навантаження відповідно.

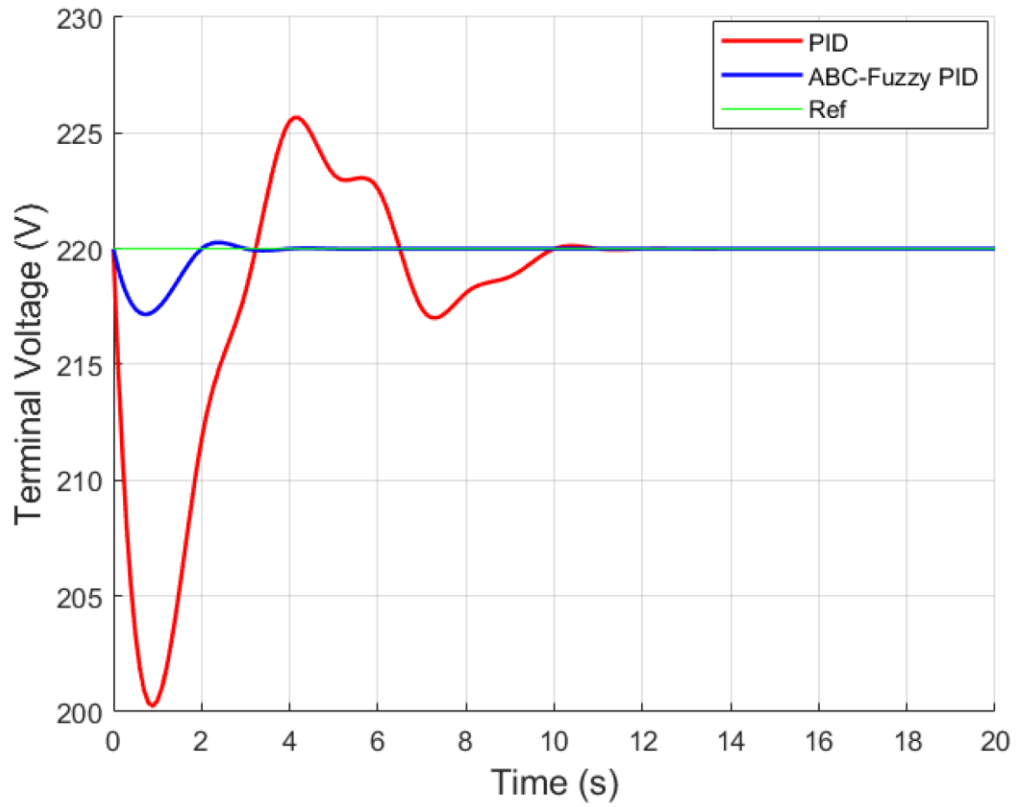


Рисунок 4.1 – Експеримент з навантаженням: 0–500 Вт

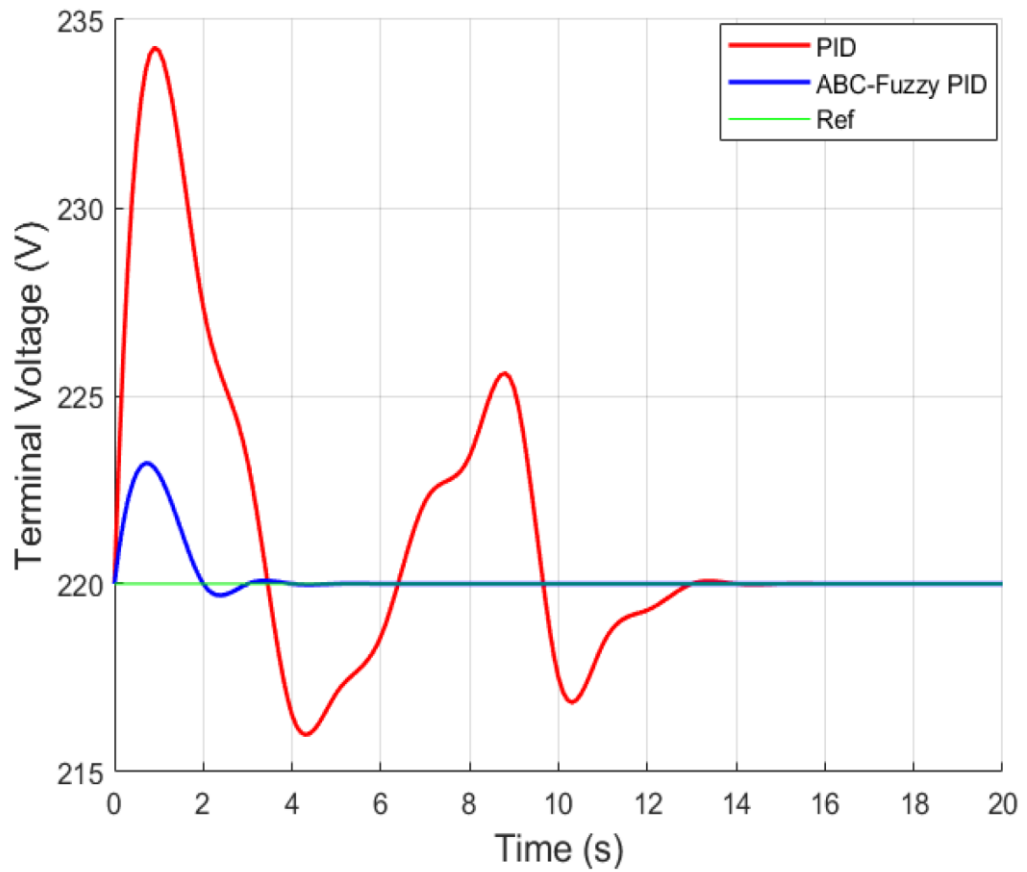


Рисунок 4.2 – Експеримент зі скидання навантаження: 500–0 Вт

На рисунках 4.3 та 4.4 показано результати експериментів від холостого ходу до навантаження 750 Вт (0–75% навантаження) та від навантаження 750 Вт до холостого ходу (зняття навантаження). В експерименті з використанням звичайного ПІД-регулятора (PLC-PID) мінімальна напруга становила 259,7 В (максимальне недотримання напруги становило 60,3 В), а максимальна напруга – 253,5 В (максимальне перевищення – 33,5 В). Значення напруги досягло заданого значення за 14 та 15 с відповідно. В експерименті з aABC-fuzzy-PID мінімальна напруга становила 213,2 В (максимальне недотримання напруги становило 6,8 В), а максимальна напруга – 230,4 В (максимальне перевищення – 10,4 В). Значення напруги досягло заданого значення за 3 та 4 с в експериментах з навантаженням та скиданням навантаження відповідно.

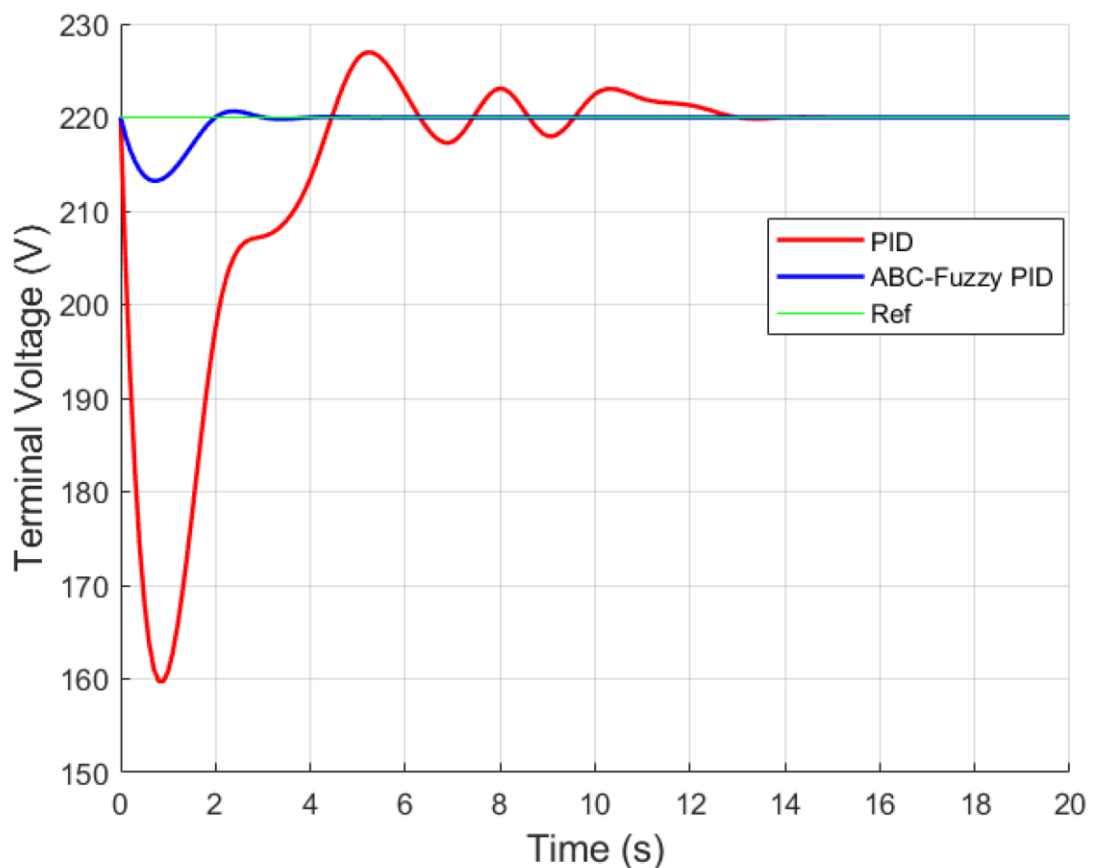
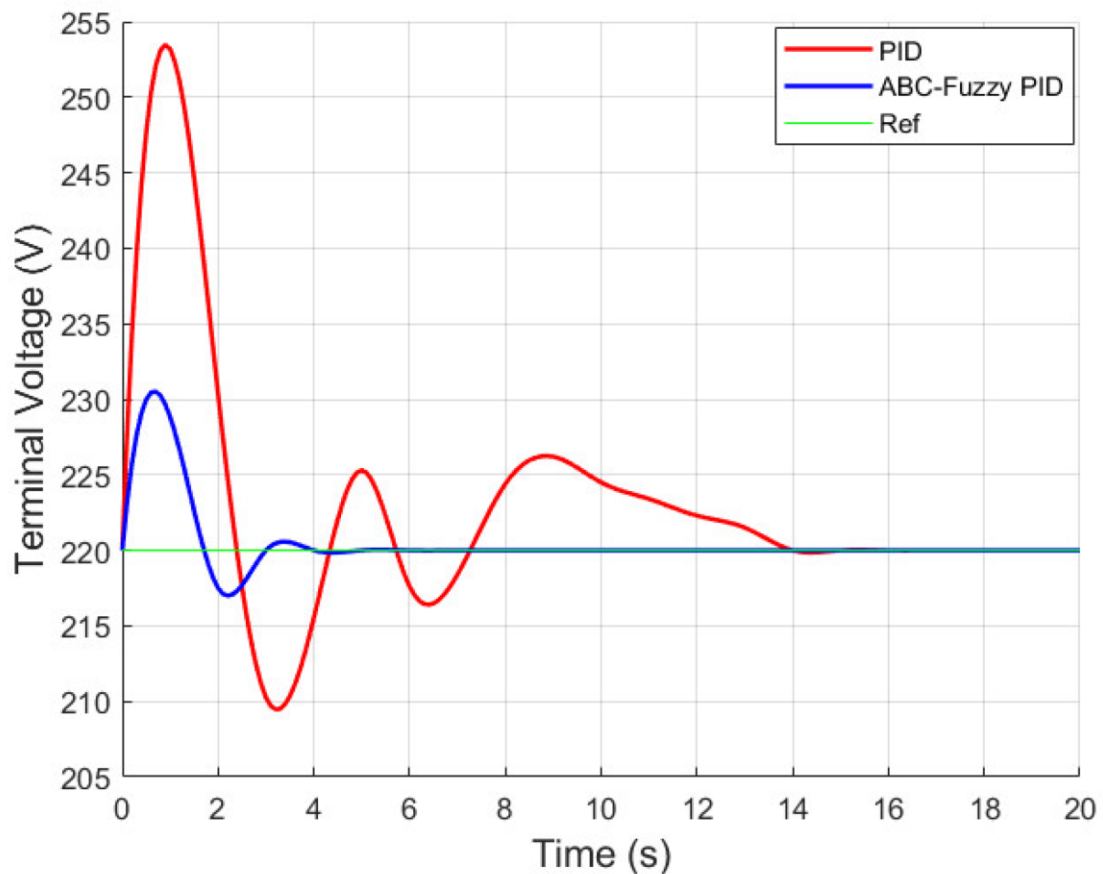


Рисунок 4.3 – Експеримент з навантаженням: 0–750 Вт



Рисунгко 4.4 – Експеримент зі скидання навантаження: 750–0 Вт

Результати експериментів від холостого ходу до навантаження 1000 Вт (0–100% навантаження) та від навантаження 1000 Вт до холостого ходу (зняття навантаження) показано на рисунку 4.5 та 4.6 відповідно. Мінімальна напруга в експерименті зі звичайним ПІД-регулятором становила 140,6 В (максимальне недотримання напруги становило 79,4 В), а максимальна напруга – 295,5 В (максимальне перевищення – 75,5 В). Значення напруги досягло заданого значення за 17 та 18 с. В експерименті з використанням аABC-fuzzy-PID мінімальна напруга становила 205,5 В (максимальне недотримання напруги становило 14,5 В), а максимальна напруга – 238 В (максимальне перевищення – 18 В). Значення напруги досягло заданого значення за 4 та 4 с відповідно.

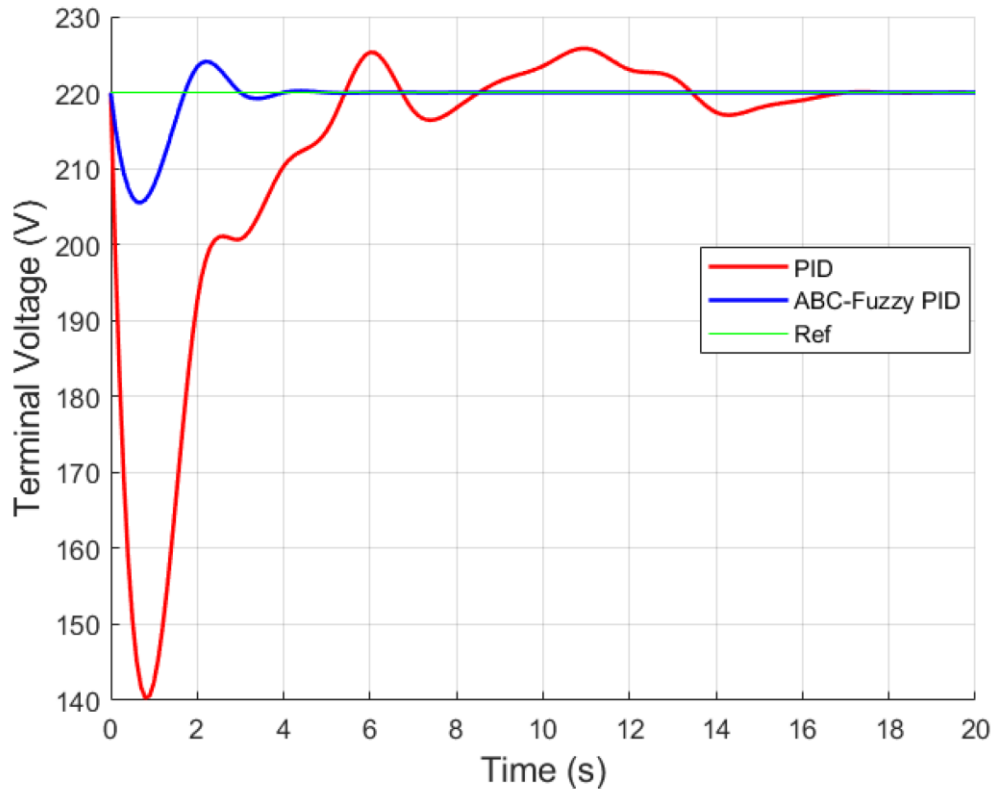


Рисунок 4.5 – Експеримент з навантаженням: 0–1000 Вт

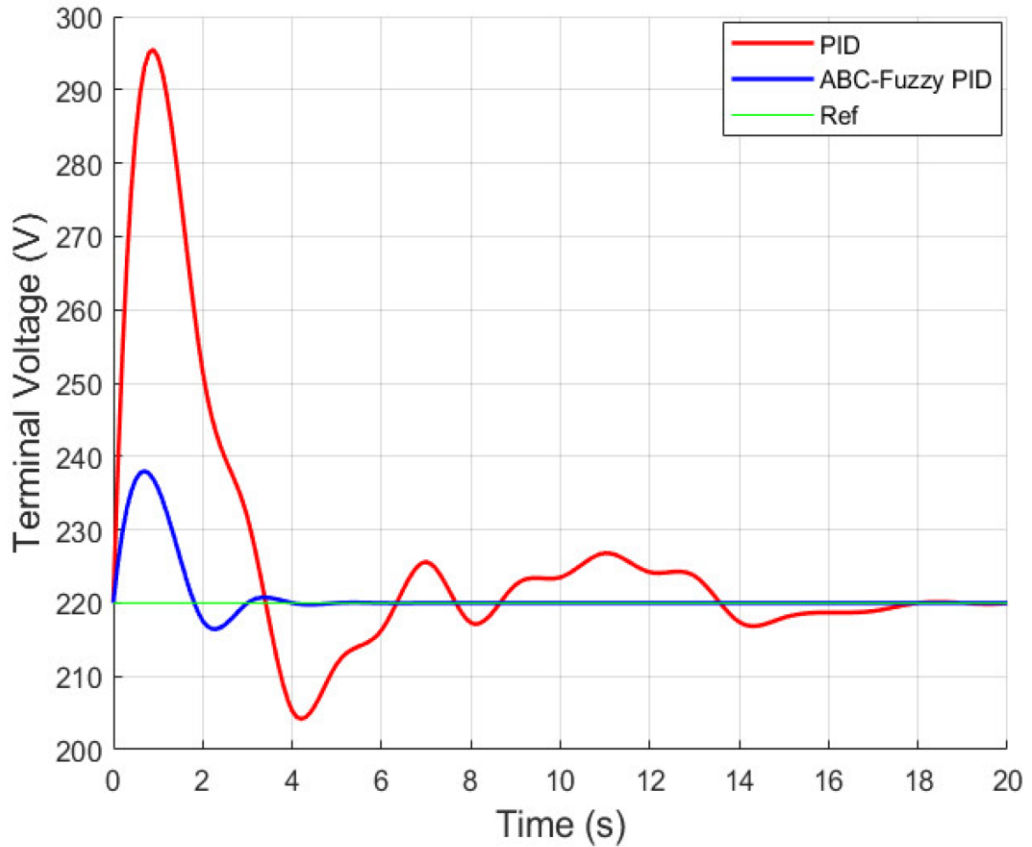


Рисунок 4.6 – Експеримент зі скидання навантаження: 1000–0 Вт

На рисунках 4.7 та 4.8 показано результати експериментів із синхронізованими генеруючими генераторами від холостого ходу до навантаження 2000 Вт (навантаження 0–67%) та від навантаження 2000 Вт до холостого ходу (зняття навантаження). При використанні традиційного ПІД-регулятора мінімальна та максимальна напруги становили 169,6 В та 243,6 В (максимальне зниження та максимальне перевищення становили 50,4 В та 23,6 В) відповідно. Напруга досягла встановленого значення за 13 та 14 с. З використанням нечіткого ПІД-регулятора α ABC мінімальна та максимальна напруги становили 213,4 В та 227,8 В (максимальне зниження та максимальне перевищення становили 6,6 В та 7,8 В) відповідно. Напруга досягла встановленого значення за 3 та 4 с відповідно.

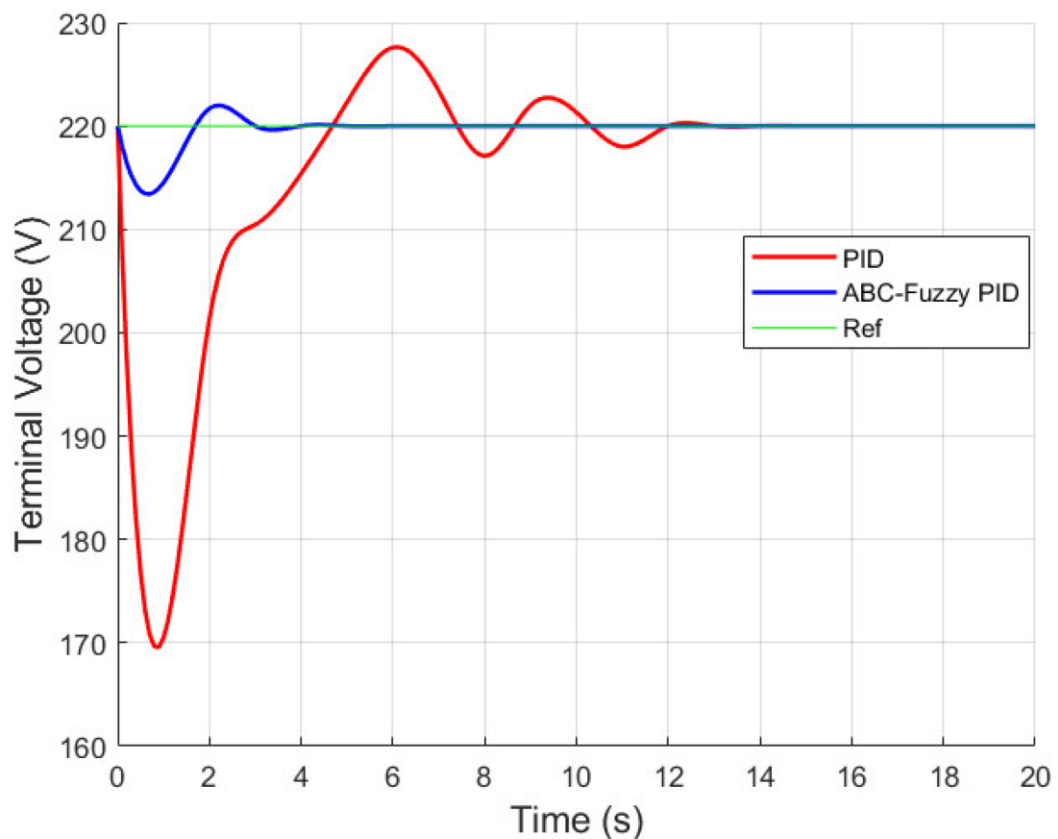


Рисунок 4.7 – Експеримент з навантаженням: 0–2000 Вт (синхронізовано)

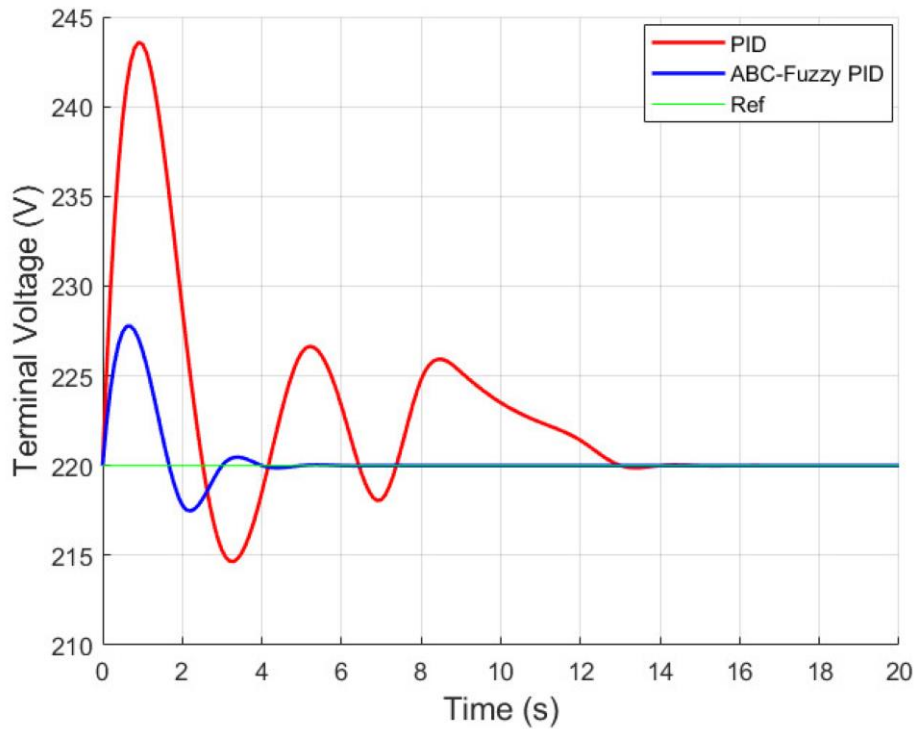


Рисунок 4.8 – Експеримент зі скидання навантаження: 2000–0 Вт

Результати, отримані в експериментах з традиційним PID та aABC-FL-PID, наведено в таблицях 4.1 та 4.2 для навантаження та скидання навантаження відповідно.

Таблиця 4.1 – Порівняння PID та aABC-fuzzy-PID для експериментів з навантаженням

Експеримент	Час встановлення (с)		Макс. збільшення (V)	
	ПД	aABC-FL-PID	ПД	aABC-FL-PID
0–500 Вт	10	2	19,8 (9%)	2,8 (0,7%)
0–750 Вт	14	3	60,3 (27,4%)	6,3 (3,1%)
0–1000 Вт	17	4	79,4 (36,1%)	14,5 (6,6%)
0–2000 Вт (синхронізація)	13	3	50,4 (22,9%)	6,6 (3%)

Таблиця 4.2 – Порівняння PID та aABC-fuzzy-PID для експериментів зі скидання навантаження

Експеримент	Час встановлення (с)		Макс. збільшення (V)	
	ПІД	aABC-FL-PID	ПІД	aABC-FL-PID
0–500 Вт	10	2	19,8 (9%)	2,8 (0,7%)
0–750 Вт	14	3	60,3 (27,4%)	6,3 (3,1%)
0–1000 Вт	17	4	79,4 (36,1%)	14,5 (6,6%)
0–2000 Вт (синхронізація)	13	3	50,4 (22,9%)	6,6 (3%)

Випробування навантаження та розвантаження (скидання навантаження) під час експериментів проводилися у складних умовах, з раптовими та значними коливаннями навантаження (50%, 75% та 100% від номінальної потужності системи). У реальних енергосистемах такі раптові зміни навантаження на цих рівнях спостерігаються рідко. Однак, за більш поступових або менших коливань навантаження (наприклад, 10% або 20% від номінальної потужності), у нашій системі вихідна напруга досягала заданого значення протягом 1 с або менше.

Крім того, згідно зі стандартом IEC 60038 (Міжнародна електротехнічна комісія IEC Стандартні напруги) в енергосистемах допустимі коливання напруги $\pm 10\%$ від номінальної напруги. Тому значення напруги в діапазоні від 198 В до 242 В вважаються прийнятними. Враховуючи ці значення, навіть у найскладнішому експерименті (100% раптове навантаження) час встановлення можна вважати прийнятним, якщо

він менше 3 с. Навіть в експерименті зі 100% раптовим навантаженням, проведеному за допомогою ABC-fuzzy-PID, значення напруги постійно підтримувалося в межах прийняттого діапазону. Час встановлення часто коротший за 1с. Більше того, генератори пар (SG), що використовуються в експериментах, не є комерційними генераторами, а призначені для експериментальних цілей. Очікується, що кращих результатів можна досягти з комерційними SG, використовуючи запропонований контролер.

ВИСНОВКИ

В рамках кваліфікаційної роботи розробляється новий надійний алгоритм aABC-fuzzy-PID для налаштування ПІД-регулятора системи АРН на мікрогідроелектростанції, встановленій як експериментальна установка. На відміну від більшості досліджень в літературі, впровадження проводилося з використанням реального фізичного обладнання. Контроль і моніторинг системи в режимі реального часу здійснювалися за допомогою ПЛК типу S7-1200 і програмного забезпечення TIA Portal V17. Це дослідження продемонструвало, що запропонований метаевристичний алгоритм можна ефективно використовувати з промисловим і простим контролером, таким як ПЛК. Адаптивно та динамічно отримано оптимальні значення K_p , K_i та K_d для ПІД-регулювання нелінійної системи АРН за різних умов навантаження. Зв'язок PLC-MATLAB було встановлено за допомогою протоколу OPC UA та інтерфейсу KEPServerEX. За допомогою запропонованого aABC-fuzzy-PID спостерігалось значне скорочення часу встановлення та максимальних значень перерегулювання порівняно з класичним PLC-PID.

В ході роботи пропонується застосування запропонованої стратегії керування до гібридних і великомасштабних електростанцій буде цінною областю дослідження. У подальших дослідженнях ці запропоновані методи можуть бути також інтегровані методи контролю за подіями та попередньо визначеного часу. Більше того, результати, отримані з використанням різних метаевристичних алгоритмів, багатоцільової оптимізації та гібридних підходів, таких як поєднання MPC або ANN з налаштуванням aABC, будуть обговорюватися в майбутніх дослідженнях. Крім того, плануємо отримати еквівалентні схеми та математичну модель системи та реалізувати нові підходи до керування з використанням методів змішаної невизначеності або політопної невизначеності

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ayas, M.S. Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system. *Electr. Eng.* 2019, 101, 1221–1233.
2. Elsis, M. Design of neural network predictive controller based on imperialist competitive algorithm for automatic voltage regulator. *Neural Comput. Appl.* 2019, 31, 5017–5027.
3. Ляшенко, О., Стародубцев, М., Макаренко, Г. і Пашенко, О. (2024) «Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній», *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4(30)), с. 85–96. doi: 10.30837/2522-9818.2024.4.085.
4. Bingul, Z.; Karahan, O. A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system. *J. Frankl. Inst.* 2018, 355, 5534–5559.
5. Sikander, A.; Thakur, P. A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system. *ISA Trans.* 2020, 100, 235–243.
6. Oziablo, P.; Mozyrska, D.; Wyrwas, M. Fractional-variable-order digital controller design tuned with the chaotic yellow saddle goatfish algorithm for the AVR system. *ISA Trans.* 2022, 125, 260–267.
7. Munagala, V.K.; Jatoth, R.K. Improved fractional $PI\lambda D\mu$ controller for AVRsystem using Chaotic Black Widow algorithm. *Comput. Electr. Eng.* 2022, 97, 107600.
8. Elsis, M.; Soliman, M. Optimal design of robust resilient automatic voltage regulators. *ISA Trans.* 2021, 108, 257–268.
9. Suid, M.H.; Ahmad, M.A. Optimal tuning of sigmoid PID controller using Nonlinear Sine Cosine Algorithm for the Automatic Voltage Regulator system. *ISA Trans.* 2022, 128, 265–286.

10. Chatterjee, S.; Mukherjee, V. PID controller for automatic voltage regulator using teaching–learning based optimization technique. *Electr. Power Energy Syst.* 2016, 77, 418–429.
11. Mosaad, A.M.; Attia, M.A.; Abdelaziz, A.Y. Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR System. *Ain Shams Eng. J.* 2019, 10, 755–767.
12. Ozgenc, B.; Ayas, M.S.; Altas, I.H. A hybrid optimization approach to design optimally tuned PID controller for an AVR System. In *Proceedings of the 2020 International Congress on Human Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 26–27 June 2020.*
13. Ekinci, S.; Hekimoğlu, B. Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access* 2019, 7, 39935–39947.
14. Çelik, E. Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system. *Neural Comput. Appl.* 2018, 30, 1991–2002.
15. Al Gizi, A.J.H. A particle swarm optimization, fuzzy PID controller with generator automatic voltage regulator. *Soft Comput.* 2019, 23, 8839–8853.
16. Gozde, H.; Taplamacioglu, M.C. Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *J. Frankl. Inst.* 2011, 348, 1927–1946.
17. Köse, E. Optimal Control of AVR System With Tree Seed Algorithm-Based PID Controller. *IEEE Access* 2020, 8, 89457–89467.
18. Kuri, R.K.; Paliwal, D.; Sambariya, D.K. Grey Wolf Optimization Algorithm based PID controller design for AVR Power system. In *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 18–19 October 2019.*
19. Yinggan, T.; Zhao, L.; Han, Z.; Bi, X.; Guan, X. Optimal gray PID controller design for automatic voltage regulator system via imperialist competitive algorithm. *Int. J. Mach. Learn. Cyber* 2016, 7, 229–240.

20. Gozde, H. Robust 2DOF state-feedback PI-controller based on meta-heuristic optimization for automatic voltage regulation system. *ISA Trans.* 2020, 98, 26–36.
21. Zamani, M.; Ghartemani; Sadati, M.K.; Parniani, M. Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. *Cont. Eng. Pract.* 2009, 17, 1380–1387.
22. Izci, D.; Ekinçi, S. An improved RUN optimizer based real PID plus second-order derivative controller design as a novel method to enhance transient response and robustness of an automatic voltage regulator. *e-Prime Adv. Electr. Eng. Electron. Energy* 2022, 2, 100071.
23. Verrelli, C.M.; Marino, R.; Tomei, P.; Damm, G. Nonlinear robust coordinated PSS-AVR control for a synchronous generator connected to an infinite bus. *IEEE Trans. Autom. Control* 2021, 67, 1414–1422.
24. Sambariya, D.K.; Gupta, T. Optimal design of PID controller for an AVR system using monarch butterfly optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC—2017)*, Indore, India, 17–19 August 2017.
25. Al Gizi, A.J.H.; Mustafa, M.W.; Al-geelani, N.A.; Alsaedi, M.A. Sugeno fuzzy PID tuning, by genetic-neutral for AVR in electrical power generation. *Appl. Soft Comput.* 2015, 28, 226–236.
26. Ortiz-Quisbert, M.E.; Duarte-Mermoud, M.A.; Milla, F.; Castro-Linares, R.; Lefranc, G. Optimal fractional order adaptive controllers for AVR applications. *Electr. Eng.* 2018, 100, 267–283.
27. Gutierrez, D.F.Z.; Rivera, G.H.V.; Cervantes, J.G.A.; Amaya, I.; Duarte, J.M.C. Designing heuristic-based tuners for fractional-order PID controllers in automatic voltage regulator systems using a hyper-heuristic approach. *Fractal Fract.* 2024, 8, 223.
28. Furat, M.; Gücü, G.G. Design, implementation, and optimization of sliding mode controller for automatic voltage regulator system. *IEEE Access* 2022, 10, 55650–55674.

29. Çavdar, B.; Sahin, E.; Sesli, E. On the assessment of meta-heuristic algorithms for automatic voltage regulator system controller design: A standardization process. *Electr. Eng.* 2024, 106, 5801–5839.
30. Sivanandhan, A.; Thriveni, G. Optimal design of controller for automatic voltage regulator performance enhancement: A survey. *Electr. Eng.* 2023, 106, 3705–3720.
31. Al Gizi, A.J.H.; Mustafa, M.W.; Al Zaidi, K.M.A.; Al-Zaidi, M.K.J. Integrated PLC-fuzzy PID Simulink implemented AVR system. *Electr. Power Energy Syst.* 2015, 69, 313–326.
32. Dettori, S.; Iannino, V.; Colla, V.; Signorini, A. An adaptive Fuzzy logic-based approach to PID control of steam turbines in solar applications. *Appl. Energy* 2018, 227, 655–664.
33. Lawrence, N.P.; Forbes, M.G.; Loewen, P.D.; McClement, D.G.; Backström, J.U.; Gopaluni, R.B. Deep reinforcement learning with shallow controllers: An experimental application to PID tuning. *Control. Eng. Pract.* 2022, 121, 105046.
34. Levashenko, V., Liashenko, O., Kuchuk, H. (2020). Building Decision Support Systems based on Fuzzy Data. *Advanced Information Systems*, 4 (4), 48–56. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>
35. Briones, O.; Alarcón, R.; Rojas, A.J.; Sbarbaro, D. Tuning Generalized Predictive PI controllers for process control applications. *ISA Trans.* 2022, 119, 184–195.
36. Hamdan, A.M.K.; Ekmekci, D. Prediction of monkeypox infection from clinical symptoms with adaptive artificial bee colony-based artificial neural network. *Neural Comput. Appl.* 2024, 36, 13715–13730.
37. Karaboga, D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization; Technical Report for Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005.
38. Ляшенко О.С., Знайдюк В.Г., Фомін Є.Є. Адаптивний метод налаштування ПІД контролера // АСУ та прилади автоматики, 2025, 185(3)

39. Ahmed, H.; Asarry, A.; Hairuddin, A.A.; Hassan, M.K.; Liu, Y.; Onwudinjo, E.C.U. Online DE Optimization for Fuzzy-PID Controller of Semi-Active Suspension System Featuring MR Damper. *IEEE Access* 2022, 10, 129125–129138.
40. Oleksii Liashenko, Olesia Barkovska, Chiai Al-Atroshi, Oleh Datsok, Sergey Liashenko. "Model of the Work of the Neurocontroller to Control Fuzzy Data from the Sensors of the Climate Control Subsystem "Smart House". *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8 (1.2), 2019, Pp. 70-74. ISSN 2278-3091 doi: 10.30534/ijatcse/2019/1281.22019
41. Huang, H.C.; Chuang, C.C. Artificial Bee Colony Optimization Algorithm Incorporated With Fuzzy Theory for Real-Time Machine Learning Control of Articulated Robotic Manipulators. *IEEE Access* 2020, 8, 192481–192492.
42. Nikolic, M.; Šelmic, M.; Macura, D.; Calic, J. Bee Colony Optimization metaheuristic for fuzzy membership functions tuning. *Expert Syst. Appl.* 2020, 158, 113601.
43. Guo, J.; Li, Y.; Du, B.; Wang, K. Multi-objective fuzzy partial disassembly line balancing considering preventive maintenance scenarios using enhanced hybrid artificial bee colony algorithm. *Expert Syst. Appl.* 2024, 237, 121681.
44. Chen, C.H.; Jeng, S.Y.; Lin, C.J. Adaptive Fuzzy Neural Network Based on a Multi-Strategy-Based Artificial Bee Colony for Mobile Robot Control. *Mathematics* 2020, 8, 1223.
45. Kumar, N.K.; Gopi, R.S.; Kuppusamy, R.; Nikolovski, S.; Teekaraman, Y.; Vairavasundaram, I.; Venkateswarulu, S. Fuzzy Logic-Based Load Frequency Control in an Island Hybrid Power System Model Using Artificial Bee Colony Optimization. *Energies* 2022, 15, 2199
46. Marjani, A.; Babanezhad, M.; Shirazian, S. Application of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) in the numerical investigation of Cu/water nanofluid convective flow. *Case Stud. Therm. Eng.* 2020, 22, 100793.