

ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи

Харківський національний університет
радіоелектроніки

каф. ЕОМ

Адаптивний метод нечіткої логіки для
налаштування ПІД контролера в системі
керування напругою

Ст.групи СПм-23-4
Фомін Є.Є.

Керівник
Знайдюк В.В.

2025

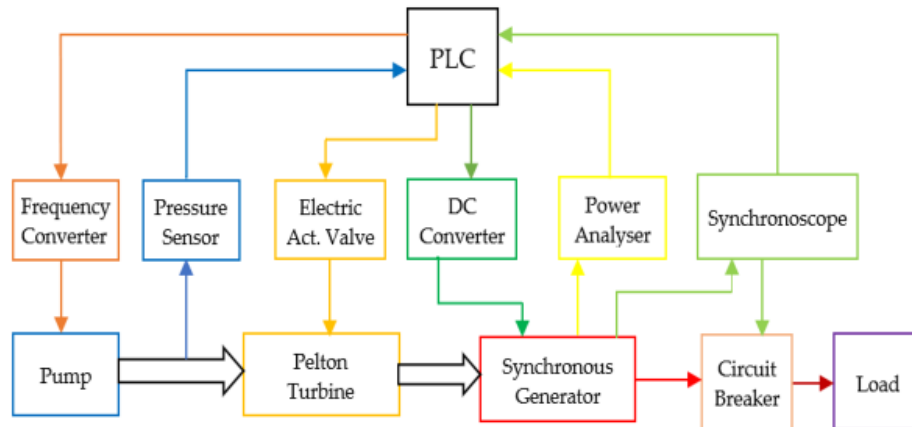
Мета та задачі кваліфікаційної роботи

- **Мета роботи** запропонувати адаптивний метод метод нечіткої логіки для налаштування ПІД контролера в системі керування напругою

Задачі кваліфікаційної роботи:

- Провести аналіз технологічної установки
- Розглянути схему РІД регулювання напруги
- Запропонувати метод нечіткої логіки для налаштування ПІД контролера
- Провести тестування в середовищі MatLab

Принцип роботи експериментальної установки



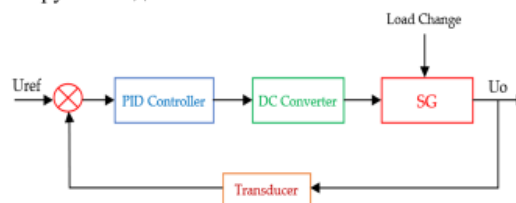
3

Схема PID регулювання напруги

- Контроль напруги на клеммах SG за змінних умов навантаження досягається за допомогою функції PID_Controller. 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 показана блок-схема PID керування напругою за допомогою ПЛК.



4

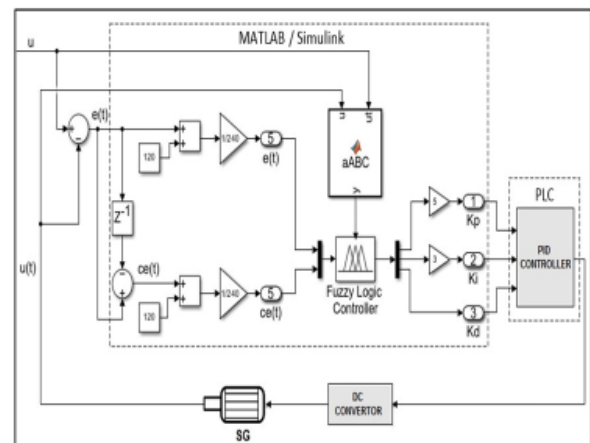
Адаптивний алгоритм штучної бджолоїної колонії (Artificial Bee Colony)

- В роботі 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 бджолоїної колонії (aABC) у задачах числової оптимізації. У цьому контексті динамічна нечітка система, яка налаштовує параметри PID, досягає балансу між точністю та складністю завдяки aABC, що є вдосконаленою версією класичного ABC.
- 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.

5

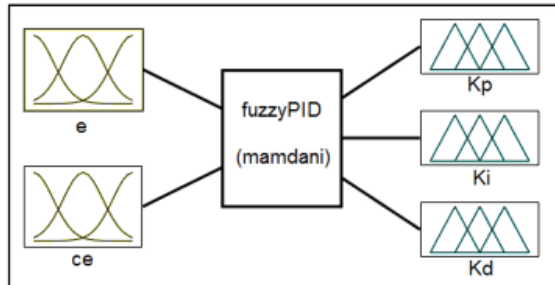
Схема aABC-fuzzy-PID

- Як показано на рисунку, 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.



6

Сторона нечіткої логіки



Структура FL

Функції належності, що використовуються в методі.

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

7

Онлайнова 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.

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

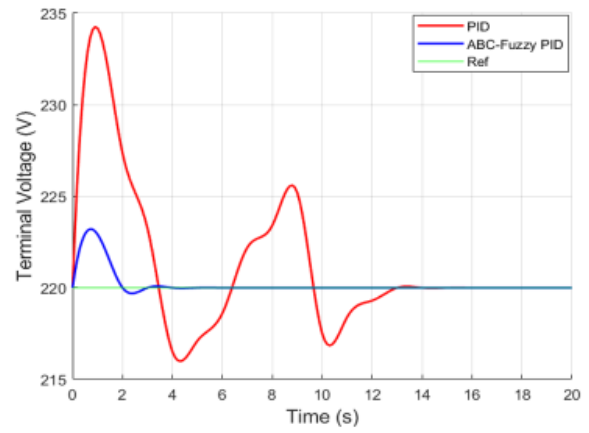
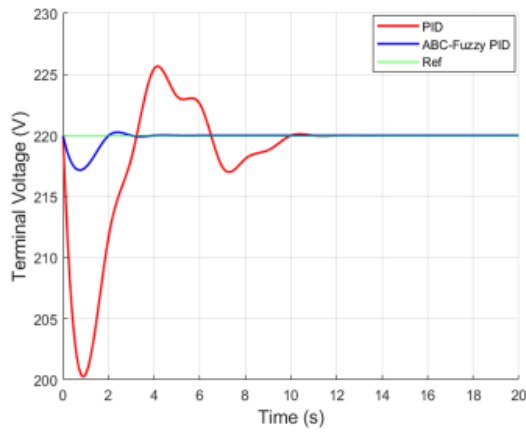
- У розробленій системі час відгуку ПЛК трохи перевищує 100 мілісекунд. Отже, загальний час генерації рішення за допомогою aABC та час перепроєктування нечіткої моделі повинні бути виконані менш ніж за 100 мілісекунд для кожного зразка. Враховуючи ці критерії, онлайн-параметри проєктування для aABC наведено в таблиці

Налаштування параметрів для онлайн-проєктування aABC-FL

Ім'я	Значення
food	5
limit	20

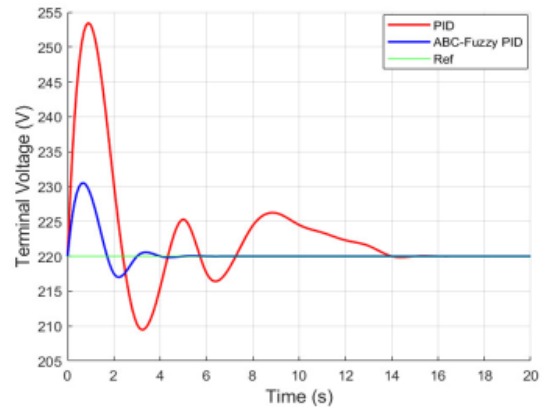
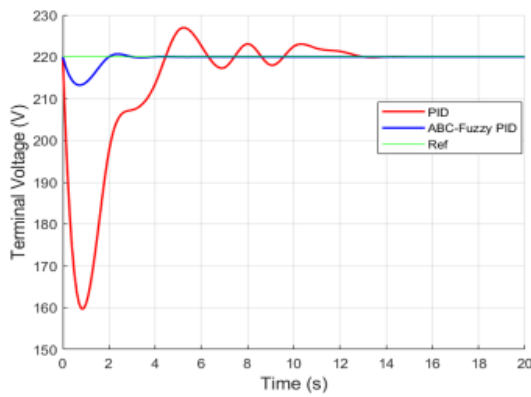
8

Результати експериментів від холостого ходу до навантаження 500 Вт



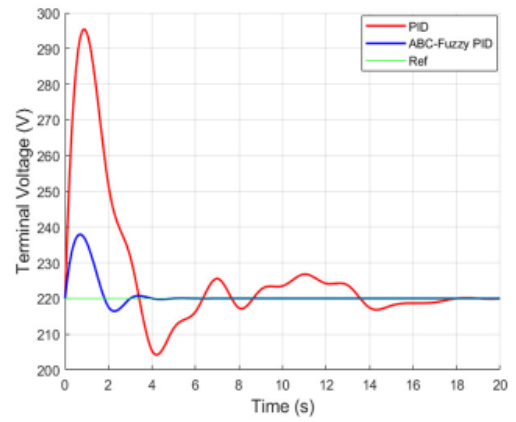
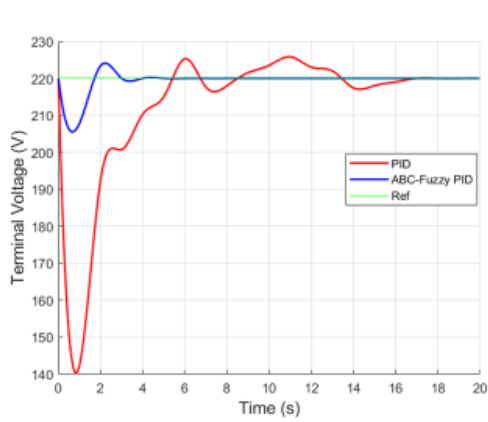
9

Результати експериментів від холостого ходу до навантаження 750 Вт



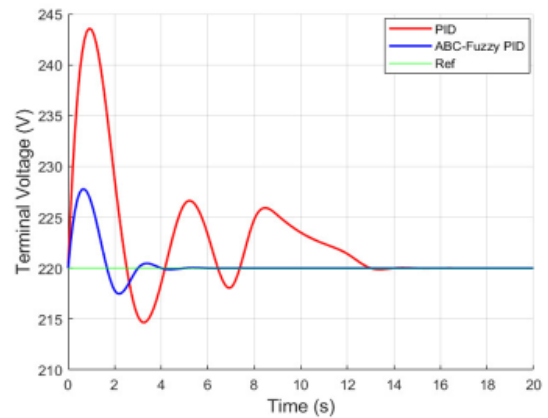
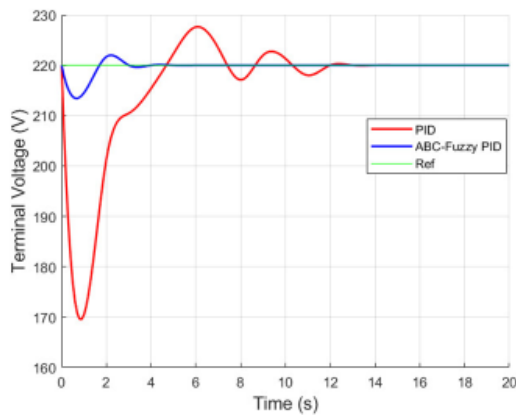
10

Результати експериментів від холостого ходу до навантаження 1000 Вт



11

Результати експериментів із синхронізованими генеруючими генераторами від холостого ходу до навантаження 2000 Вт



12

Порівняльний аналіз результатів

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

Порівняння PID та aABC-fuzzy-PID для експериментів з навантаженням.

Порівняння PID та aABC-fuzzy-PID для експериментів зі скидання навантаження

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

13

Висновки

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 APH 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.

Результати дослідження подані в фаховий журнал категорії Б «АСУ та прилади автоматики» у вигляді науковій статті Ляшенко О.С., Знайдюк В.Г., Фомін Є.Є. Адаптивний метод налаштування ПІД контролера (дата подачі 20.06.2025)

14

ДОДАТОК Б

Результати конкурентних алгоритмів для бенчмарків CEC2019

Function	Alg.	Best	Worst	Mean	SD	
CEC01	FPA	1.66×10^8	1.34×10^9	4.94×10^8	2.36×10^8	
	GWO	4.04×10^4	1.22×10^9	1.17×10^8	2.39×10^8	
	SSA	1.87×10^8	4.03×10^{10}	7.73×10^9	1.04×10^{10}	
	CS	1.00×10^{10}	1.00×10^{10}	1.00×10^{10}	0.00×10^0	
	SCA	1.60×10^8	2.08×10^{10}	6.90×10^9	6.70×10^9	
	AFPA	1.05×10^6	1.75×10^8	2.52×10^7	3.59×10^7	
	ABC	1.90×10^7	2.58×10^9	5.78×10^8	1.12×10^8	
	aABC	1.76×10^7	2.02×10^9	3.91×10^8	6.51×10^7	
	CEC02	FPA	1.80×10^1	3.18×10^1	2.14×10^1	3.35×10^0
		GWO	1.73×10^1	1.74×10^1	1.73×10^1	2.11×10^{-2}
SSA		1.73×10^1	1.73×10^1	1.73×10^1	4.75×10^{-4}	
CS		1.73×10^1	1.73×10^1	1.73×10^1	2.86×10^{-4}	
SCA		1.74×10^1	1.77×10^1	1.75×10^1	8.77×10^{-2}	
AFPA		1.73×10^1	1.73×10^1	1.73×10^1	2.80×10^{-5}	
ABC		1.73×10^1	1.73×10^1	1.73×10^1	3.13×10^{-6}	
aABC		1.73×10^1	1.73×10^1	1.73×10^1	1.05×10^{-8}	
CEC03		FPA	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	1.56×10^{-7}
		GWO	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	2.01×10^{-6}
	SSA	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	2.93×10^{-12}	
	CS	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	9.81×10^{-11}	
	SCA	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	1.00×10^{-4}	
	AFPA	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	2.78×10^{-14}	
	ABC	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	3.07×10^{-6}	
	aABC	1.27×10^1	1.27×10^1	1.27×10^1	2.11×10^{-10}	

CEC04	FPA	9.12×10^1	1.98×10^2	1.26×10^2	2.54×10^1
	GWO	2.35×10^1	1.43×10^3	1.60×10^2	3.41×10^2
	SSA	1.19×10^1	7.86×10^1	3.74×10^1	1.85×10^1
	CS	3.67×10^1	5.82×10^2	1.94×10^2	1.19×10^2
	SCA	4.94×10^2	2.25×10^3	1.40×10^3	4.08×10^2
	AFPA	2.06×10^1	4.09×10^1	2.92×10^1	5.41×10^0
	ABC	5.97×10^1	2.85×10^2	3.33×10^2	2.77×10^2
	aABC	1.19×10^1	6.92×10^1	2.98×10^1	1.99×10^1
CEC05	FPA	1.35×10^0	1.80×10^0	1.60×10^0	9.38×10^{-2}
	GWO	1.05×10^0	1.85×10^0	1.41×10^0	2.72×10^{-1}
	SSA	1.04×10^0	1.74×10^0	1.24×10^0	1.44×10^{-1}
	CS	1.04×10^0	2.00×10^0	1.44×10^0	2.50×10^{-1}
	SCA	2.06×10^0	2.38×10^0	2.21×10^0	7.55×10^{-2}
	AFPA	1.03×10^0	1.08×10^0	1.06×10^0	1.25×10^{-2}
	ABC	1.07×10^0	1.81×10^0	1.47×10^0	2.38×10^{-1}
	aABC	1.03×10^0	1.09×10^0	1.10×10^0	1.72×10^{-2}
CEC06	FPA	8.94×10^0	1.16×10^1	1.04×10^1	7.77×10^{-1}
	GWO	7.78×10^0	1.20×10^1	1.06×10^1	9.26×10^{-1}
	SSA	1.71×10^0	8.55×10^0	4.69×10^0	1.76×10^0
	CS	7.73×10^0	1.01×10^1	9.18×10^0	6.53×10^{-1}
	SCA	9.20×10^0	1.18×10^1	1.08×10^1	6.45×10^{-1}
	AFPA	8.25×10^0	1.16×10^1	1.03×10^1	7.95×10^{-1}
	ABC	9.71×10^0	8.89×10^0	1.01×10^1	3.76×10^0
	aABC	3.07×10^0	7.19×10^0	4.11×10^0	1.74×10^0
CEC07	FPA	2.65×10^1	4.93×10^2	2.84×10^2	8.92×10^1
	GWO	-1.34×10^2	1.02×10^3	4.69×10^2	3.61×10^2
	SSA	-1.27×10^2	7.61×10^2	2.69×10^2	2.24×10^2
	CS	-1.50×10^2	3.63×10^2	1.41×10^2	1.17×10^2
	SCA	3.66×10^2	1.05×10^3	7.04×10^2	1.70×10^2

	AFPA	-4.56×10^2	1.81×10^2	7.83×10^1	6.45×10^1
	ABC	1.06×10^2	1.15×10^3	6.44×10^2	9.13×10^2
	aABC	-1.46×10^2	1.51×10^2	1.13×10^2	5.55×10^2
CEC08	FPA	4.96×10^0	6.24×10^0	5.66×10^0	3.27×10^{-1}
	GWO	3.39×10^0	6.83×10^0	5.09×10^0	9.83×10^{-1}
	SSA	2.49×10^0	6.38×10^0	5.05×10^0	7.80×10^{-1}
	CS	4.59×10^0	5.80×10^0	5.28×10^0	3.13×10^{-1}
	SCA	4.68×10^0	6.62×10^0	6.01×10^0	5.02×10^{-1}
	AFPA	2.94×10^0	5.63×10^0	4.86×10^0	8.36×10^{-1}
	ABC	3.01×10^0	7.22×10^0	5.91×10^0	6.07×10^{-1}
	aABC	2.38×10^0	5.10×10^0	4.11×10^0	2.41×10^{-1}
CEC09	FPA	3.70×10^0	6.28×10^0	4.72×10^0	6.46×10^{-1}
	GWO	2.61×10^0	7.70×10^0	4.52×10^0	1.02×10^0
	SSA	2.36×10^0	2.73×10^0	2.49×10^0	9.24×10^{-2}
	CS	2.56×10^0	3.09×10^0	2.78×10^0	1.31×10^{-1}