

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійна програма
«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних
об'єктів»

На тему: «РОЗРОБКА СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ ФАЗ В ТРИФАЗНІЙ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ»

КНУ.МР.141.25.667с-10

Здобувач
групи СЕП-24м

/підпис/

Олег ЧЕРВІНЧУК

/ім'я, прізвище/

Завідувач кафедри:
д.т.н., проф.

/підпис/

Олег СІНЧУК

/ім'я, прізвище/

Керівник:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ім'я, прізвище/

Гарант ОП:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ім'я, прізвище/

Кривий Ріг – 2025

Криворізький національний університет
Факультет: *електротехнічний*
Освітній рівень: *магістр*
Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**
Червінчука Олега Андрійовича

1. Тема роботи: Розробка системи балансування фаз в трифазній електромережі
2. Строк подання студентом роботи: 16 грудня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: полягає в розробці системи автоматичного балансування фаз у трифазній низьковольтній мережі на основі нечіткої логіки Мамдані, що здатна адаптивно керувати переключенням електроприймачів між фазами, підвищуючи якість електроенергії і мінімізуючи втрати потужності
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):
I. Загальні дані про системи балансування фаз в трифазних електромережах; II. Створення нечіткого логічного контролеру для балансування фаз в трифазній електромережі; III. Оцінювання якості роботи нечіткого логічного контролера балансування фаз
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Варіанти трифазних систем: симетрична; несиметрична; Функції приналежності до входів системи нечіткого логічного виводу: CD – «різниця струмів»; UB – ступінь несиметричності; Функції приналежності до виходу системи нечіткого логічного виводу: SM – «кількість переключених електроприймачів»; Функції відгуку системи нечіткого логічного виводу; Приклади нечіткого логічного виводу в системі з трикутними і гауссовими функціями приналежності; Приклади балансування фаз за 4, 7 і 20 кроків роботи системи нечіткого керування; Ефективність роботи системи балансування фаз

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Обробка літератури	01.09.2025–14.09.2025
2	Виконання розділу 1	15.09.2025–01.10.2025
3	Виконання розділу 2	02.10.2025–25.10.2025
4	Виконання розділу 3	26.10.2025–14.11.2025
5	Завершення оформлення роботи	15.11.2025–24.11.2025
6	Антиплагіатна перевірка	25.11.2025–16.12.2025
7	Підготовка презентації та доповіді	16.12.2025–17.12.2025

Дата видачі завдання: 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____

Олег ЧЕРВІНЧУК

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему дисбалансу фаз в трифазних низьковольтних електричних мережах, що виникає через нерівномірний розподіл однофазних споживачів, роботу нелінійного обладнання та інтеграцію розосереджених джерел енергії.

Об'єкт дослідження – процеси електропостачання в трифазних електричних мережах.

Предмет дослідження – процес автоматизованого балансування фаз у трифазній низьковольтній електромережі.

Для вирішення проблеми дисбалансу фаз запропоновано систему автоматизованого балансування фаз на основі нечіткого логічного контролера, який використовує два вхідні параметри – абсолютну різницю струмів між фазами та відносний коефіцієнт незбалансованості – для прийняття рішень про дискретне перемикання одиничних електроприймачів між фазами. Досліджено два варіанти реалізації нечіткого логічного контролера – з трикутними та гауссовими функціями приналежності. На основі 1000 симуляцій у середовищі MATLAB проведено комплексний аналіз ефективності, збіжності та якості балансування. Результати показали, що обидва підходи забезпечують високу стабільність і точність: понад 75% симуляцій завершуються з коефіцієнтом незбалансованості не більше 0,016 та різницею струмів не більше 1,5 А. При цьому система з трикутними функціями приналежності демонструє трохи кращу швидкість, тоді як гауссові функції дають дещо вищу концентрацію результатів у найточнішому діапазоні. Запропонована система придатна для інтеграції в інтелектуальні системи управління електромережами (Smart Grid).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ТРИФАЗНА ЕЛЕКТРОМЕРЕЖА, БАЛАНСУВАННЯ ФАЗ, НЕЧІТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ.....	5
Розділ 1. Загальні дані про системи балансування фаз в трифазних електромережах	7
1.1 Загальні дані про дисбаланс фаз в трифазній електромережі.....	7
1.2 Причини виникнення дисбалансу фаз	9
1.3 Вплив дисбалансу фаз на електромережу й електроприймачів.....	11
1.4 Сучасні здобутки в галузі балансування фаз в трифазній електромережі.....	12
Висновки до розділу 1	18
Розділ 2. Створення нечіткого логічного контролера для балансування фаз в трифазній електромережі	19
2.1 Фазифікація нечіткого контролера	19
2.2 База правил	27
2.3 Агрегація.....	30
2.4 Дефазифікація	30
2.5 Приклад нечіткого логічного висновку.....	30
Висновок до розділу 2	33
Розділ 3. Оцінювання якості роботи нечіткого логічного контролера балансування фаз.....	34
3.1 Принцип моделювання автоматизованої системи керування балансуванням фаз	34
3.2 Результати симуляцій балансування фаз з використанням нечіткого логічного контролера.....	35
Висновки до розділу 3	47

Висновки	49
Список використаних джерел	51

ВСТУП

Активний розвиток побутових розподільних електромереж, використання електричних обігрівачів, кондиціонерів, зарядних станцій для електромобілів, а також впровадження малих відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрогенератори, зростає нерівномірність розподілу електроприймачів між фазами. Це призводить до фазного дисбалансу, який проявляється у вигляді різниці струмів і напруг у фазах, що негативно впливає на роботу всієї електричної системи.

Наявність фазного дисбалансу викликає додаткові втрати потужності у трансформаторах і лініях електропередачі, призводить до перегріву елементів мережі, скорочення терміну їх експлуатації, підвищення ризику аварійних ситуацій і погіршення якості електроенергії. Для трифазних споживачів, особливо асинхронних електродвигунів, це може спричиняти вібрації, перегрів, втрату моменту, нерівномірне навантаження обмоток, що у підсумку знижує надійність промислових установок. Крім того, наявність фазного дисбалансу порушує відповідність електричних параметрів мережі нормативним стандартам, зокрема ДСТУ EN 50160, що визначає вимоги до якості електроенергії.

Традиційні методи балансування фаз, що ґрунтуються на ручному перерозподілі споживачів між фазами, є малоефективними в умовах динамічного змінення споживання. Тому виникає потреба у створенні інтелектуальних систем, здатних автоматично виявляти та компенсувати фазний дисбаланс у режимі реального часу. Розробка таких систем із використанням мікроконтролерів, керованих перетворювачів та алгоритмів цифрової обробки сигналів дає змогу підвищити ефективність розподілу електроенергії, зменшити втрати, покращити якість напруги та забезпечити стабільність живлення споживачів.

У контексті переходу до концепції Smart Grid, яка передбачає залучення інформаційних технологій у керування електричними мережами, автоматизоване балансування фаз стає ключовим напрямом розвитку

розподільчих систем. Такі системи дозволяють створювати гнучку, адаптивну та енергоефективну інфраструктуру, здатну самостійно реагувати на зміни режимів роботи, попереджати перевантаження і забезпечувати рівномірний розподіл потужності між усіма фазами.

Отже, розробка системи балансування фаз у трифазній електромережі низької напруги є актуальною задачею, спрямованою на підвищення надійності, стабільності та ефективності сучасних електроенергетичних систем.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ ФАЗ В ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

1.1 Загальні дані про дисбаланс фаз в трифазній електромережі

. Дисбаланс на фазах трифазної електричної мережі являє собою порушення симетрії струмів або напруг у фазах, що призводить до відхилення їх діючих значень та фазових зсувів від умов ідеально збалансованої системи. В ідеальному режимі трифазна система характеризується рівними за величиною фазними напругами та струмами, зсунутими один відносно одного на ± 120 ел. град. Для напруг така система описується як [1]:

$$\begin{aligned} U_A &= U \angle 0 \text{ ел. град.}; \\ U_B &= U \angle -120 \text{ ел. град.}; \\ U_C &= U \angle +120 \text{ ел. град.} \end{aligned} \quad (1.1)$$

А для струмів [1]:

$$\begin{aligned} I_A &= U \angle \phi \text{ ел. град.}; \\ I_B &= U \angle \phi - 120 \text{ ел. град.}; \\ I_C &= U \angle \phi + 120 \text{ ел. град.}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де ϕ – кут навантаження.

У дійсності електроприймачі, особливо у низьковольтних мережах, переважно є однофазними, що зумовлює нерівномірний розподіл електроприймачів по фазах, унаслідок чого має місце умова:

$$I_A \neq I_B \neq I_C, \quad (1.3)$$

або

$$U_A \neq U_B \neq U_C, \quad (1.4)$$

що свідчить про асиметрію електромережі.

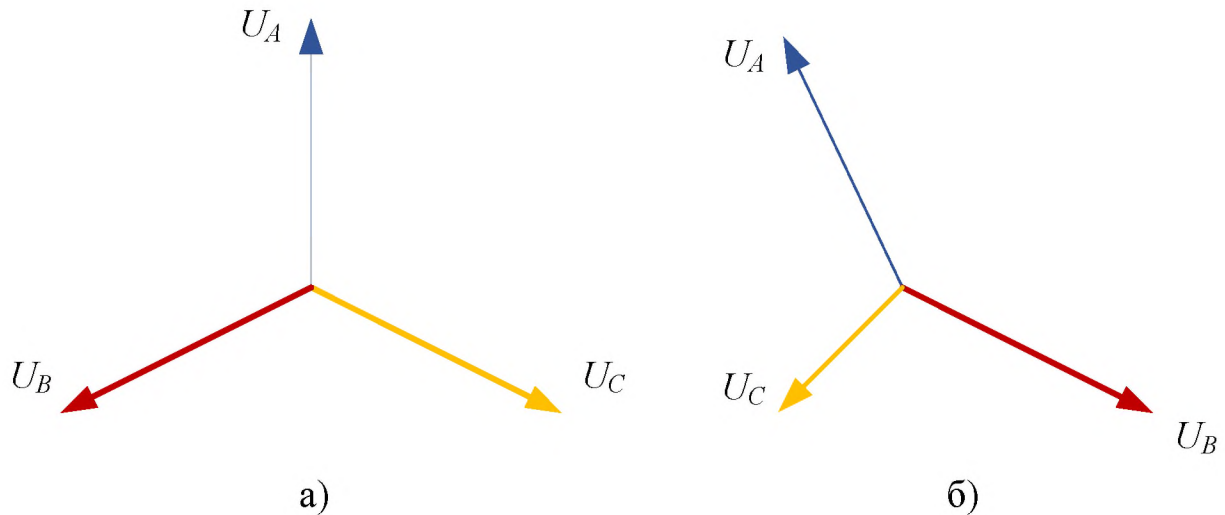


Рисунок 1.1 – Варіанти трифазних систем: а) збалансована; б) дисбалансна

Для кількісного опису дисбалансу застосовується метод симетричних складових, у якому довільна несиметрична система фазних струмів розкладається на три компоненти: пряму, зворотну та нульову послідовності, що задається як-то [1]:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_A \\ \vec{I}_B \\ \vec{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \\ \vec{I}_0 \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

де $\vec{I}_1$ – пряма послідовність;

$\vec{I}_2$ – зворотна послідовність;

$\vec{I}_0$ – нульова послідовність;

$$a = e^{j120^\circ}.$$

Пряма складова відповідає ідеально симетричному режиму та забезпечує корисну передачу потужності, тоді як зворотна та нульова складові виникають лише при асиметрії споживання і є індикатором дисбалансу.

Ступінь дисбалансу:

$$\begin{aligned} k_U &= \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%; \\ k_I &= \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де U_1, I_1 – модулі прямої послідовності напруги та струму;

U_2, I_2 – модулі зворотної послідовності напруги та струму.

$k_{U,I} > 2...4\%$ вважається таким, що може негативно впливати на роботу електрообладнання.

1.2 Причини виникнення дисбалансу фаз

Дисбаланс фаз у електричних мережах виникає переважно через нерівномірний розподіл однофазних споживачів між трьома фазами, що є типовим для низьковольтних електромереж, де більшість електроприймачів підключена через однофазні відгалуження. У побуті та комерційних установах основну частку електроприладів становлять однофазні, які довільно приєднуються до однієї з фаз, і за відсутності обґрунтованого планування чи моніторингу підключення це призводить до перевантаження однієї фази за умов недовантаження двох інших. У пікові години споживання ситуація погіршується, оскільки користувачі нерівномірно вмикають свої пристрої, що викликає часова нестабільність споживання і формування непередбачуваних режимів роботи електромережі.

До цього додається вплив нелінійних електроприймачів – ПК, частотних перетворювачів, інверторів, зарядних пристроїв та іншої сучасної техніки, яка спотворює форму струму й напруги, породжуючи гармоніки та асиметричні складові. Оскільки такі пристрої працюють на різних фазах із різними споживаннями, фазні струми не лише відрізняються за величиною, а й мають різний спектральний склад, що глибше порушує електромагнітну симетрію системи. До дисбалансу також додають свій внесок трифазні електродвигуни, що експлуатуються в неповнофазному режимі або з

нерівномірним механічним навантаженням на валу, через що фазні струми в обмотках стають неоднаковими і створюють зворотні магнітні поля.

Суттєвий вплив має і фізичний стан мережевої інфраструктури: з часом з'єднання погіршуються через зношеність, ослаблені контакти, корозію клем, механічні пошкодження проводів, деградацію ізоляції або погіршення з'єднань у трансформаторах, що призводить до різниці опорів між фазами і, як наслідок, до нерівномірного розподілу струмів. Особливу небезпеку становить відсутність або неправильне підключення нульового проводу в чотирипровідній системі, через що відбувається зсув нейтральної точки й істотні відхилення фазних напруг від номінальних значень.

Не менш значущим чинником сьогодні є активне впровадження розосереджених джерел електроенергії, зокрема, сонячних панелей і малих вітрових установок, які часто підключаються лише до однієї фази й генерують потужність нерівномірно. У певні періоди доби це може викликати надлишок генерації в одній фазі за одночасного дефіциту в інших, що веде до додаткових втрат і нерівномірності струмів. Аналогічну проблему створюють станції заряджання електромобілів, які у разі неорганізованого підключення, зокрема вночі, можуть спричиняти локальні дисбаланси.

Отже, фазовий дисбаланс є наслідком поєднання технічних, експлуатаційних і технологічних факторів, має динамічний і багатокомпонентний характер, і його неможливо ефективно усунути лише за допомогою статичних методів. Він формується під впливом нерівномірного однофазного споживання, коливань споживання в часі, роботи нелінійного обладнання, стану мережевої інфраструктури та зростання частки децентралізованої генерації, що вимагає застосування інтелектуальних, адаптивних систем управління для підтримки стабільної якості електроенергії та надійного функціонування мережі в цілому.

1.3 Вплив дисбалансу фаз на електромережу й електроприймачів

Наслідки дисбалансу фаз у трифазних електричних мережах проявляються у погіршенні показників якості електроенергії, зниженні ефективності роботи електрообладнання та прискоренні його зносу. При наявності асиметрії в системі з'являються струми зворотної і нульової послідовності, які не беруть участі у корисній передачі потужності, але створюють додаткові електромагнітні та теплові впливи на елементи електромережі. У трансформаторах і кабельних лініях підвищується нагрів фазного проводу з найбільшим струмом, тоді як у інших фазах можливе недовантаження, що призводить до нерівномірного використання робочого ресурсу обладнання. У системах з глухозаземленою нейтраллю збільшення нульової складової струму веде до появи струмів у нульовому проводі, що може спричиняти його перегрів або перевантаження, особливо при тривалому або змінному характері споживання.

Особливо суттєвими наслідки дисбалансу є для асинхронних електродвигунів. Струм зворотної послідовності створює у машині магнітне поле, яке обертається у протилежному напрямку до основного, що зменшує результуючий електромагнітний момент двигуна. Це призводить до падіння корисної потужності, нестабільної роботи та збільшення ковзання. Двигун починає споживати більший струм прямої послідовності для компенсації втрати моменту, що додатково збільшує нагрів обмоток. Зворотний момент викликає механічні пульсації, які з часом призводять до підвищеного зношування підшипників та вібрацій ротора. Теплове навантаження при дисбалансі інколи перевищує теплове навантаження при однаковому середньому струмі у симетричному режимі, що підвищує ризик міжвиткових пошкоджень, деградації ізоляції та скорочення терміну служби машини. У крайньому випадку асинхронний двигун може втратити можливість запуску або зупинитися під дією зворотного крутного моменту.

Для електроджерел, зокрема трансформаторів, дисбаланс викликає збільшення втрат потужності на активний опір обмоток, підвищене

нагрівання і зменшення коефіцієнта корисної дії. У великих енергосистемах наявність асиметрії призводить до появи струмів нульової послідовності, які можуть поширюватися через заземлювальні контури, створюючи додаткові потенціали на поверхні ґрунту та впливаючи на корозію підземних металевих конструкцій. У мережах із розосередженими однофазними споживачами, характерних для житлового сектору, дисбаланс сприяє нерівномірному просіданню напруги у фазах, що може проявлятися як мерехтіння освітлення, зниження ефективності електронних приладів або їх передчасні відмови.

Таким чином, наслідки дисбалансу мають комплексний характер і впливають як на електротехнічне обладнання, так і на якість електроенергії та енергетичну ефективність мережі в цілому. Його ігнорування призводить до підвищення експлуатаційних витрат, збільшення аварійності, необхідності дострокової заміни обладнання та зниження надійності електропостачання споживачів.

1.4 Сучасні здобутки в галузі балансування фаз в трифазній електромережі

У [2] запропоновано оптимальну реконфігурацію фазового балансування шляхом перемикання електроприймачів у мережі IDECO (Ірбід) із застосуванням трьох методів: FFBPNN, RBFNN та гібридного. Найкращі результати показав гібридний підхід. Моделювання виконано в MATLAB та мовою С.

У [3] для оптимізації зміни фаз у асиметричних мережах використано алгоритм оптимізації на основі урагану (НОА) у рамках двоетапної процедури «майстер–підлеглий». Майстер визначає призначення споживачів, підлеглий обчислює втрати потужності за допомогою матричного методу зворотного/прямого потоку. НОА перевірено на тестових мережах із 8, 25 і 37 вузлів і показав кращі результати порівняно з CBGA та DVSA, знижуючи втрати на 24,34%, 4,16% та 19,25% відповідно. Моделювання проведено в MATLAB.

У [4] для проектування контролера балансування фаз за допомогою MATLAB було використано нечітку логіку. Для аналізу потоку потужності було використано програму ETAP. Спроектований нечіткий контролер дозволив зменшити втрати на 3,5%.

У [5] запропоновано змішано-цілочисельну опуклу квадратичну модель для балансування фаз у низьковольтних мережах із урахуванням ВДЕ та їх стохастичності. Потоки потужності лінеаризовано, а вибір фазового перемикача у кожному вузлі реалізовано через політоп Біркгофа B_3 . Ефективність підтверджено на тестовій системі CIGRE.

У [6] розроблено метод розрахунку та компенсації трифазного дисбалансу з використанням розподіленого контролера потоку потужності. Запропонована стратегія управління ефективно зменшує асиметрію, підвищує коефіцієнт використання потужності та забезпечує гнучку конфігурацію.

У [7] запропоновано багатоцільовий метод балансування з урахуванням просторового розташування лічильників, можливості регулювання фази та ступеня дисперсії. На основі відстаней між лічильниками формується цільова функція, яка оптимізується за допомогою алгоритму рою частинок. У тестах трифазний дисбаланс зменшено з 35,24% до 5,19%, а обсяг простору рішень – з 352 до 226, що полегшує практичне застосування.

У [8] реалізовано автоматичну апаратну систему на базі мікроконтролера та реле, яка перемикає однофазних електроприймачів на найменш завантажену фазу. Система ефективно зменшує дисбаланс, струм у нейтралі та підтримує стабільність напруги.

У [9] запропоновано гібридний алгоритм BF-PSO для оптимального фазового розташування бічних ліній і трансформаторів у радіальних і сітчастих мережах. Цільова функція об'єднує нейтральний струм, витрати на перефазування, падіння напруги та втрати у лінії у нечітку багатоцільову форму. Метод перевірено на живильнику №3062 (Ахвас, Іран) і показав кращі результати порівняно з іншими еволюційними алгоритмами.

У [10] розроблено багатоступеневий метаевристичний підхід до балансування фаз, що враховує деревоподібну структуру мережі. Оптимізація розподіляється між головним живильником і гілками для зниження втрат. У тестах на реальній низьковольтній мережі різниця між підходами не перевищувала 1,3%.

У [11] запропоновано систему балансування трифазної чотирипровідної мережі з використанням інвертора як динамічного електроприймача, що споживає енергію від двох акумуляторних блоків для компенсації дисбалансу згідно з алгоритмом керування.

У [12] введено нові індекси балансування фаз для гілок і всієї системи, що дозволяють оцінювати стан мережі та визначати оптимальні комутації. На основі індексів петлі та філіальної станції реалізовано ефективну стратегію реконфігурації мережі. Метод протестовано на 69-шинній системі, показавши значне скорочення обчислювальних витрат і часу, що робить його придатним для застосування в автоматизованих системах у реальному часі.

У [13] досліджуються кілька методологій фазового балансування. Після дослідження кількох технік фазового балансування та на основі цієї методології розроблено прототип для симуляції та досліджено різні ситуації дисбалансу. Для аналізу умов дисбалансу в практичному режимі на основі симуляції розроблено апаратний прототип. Досліджено деякі дисбалансні електроприймачі на прототипі симуляції, а потім на апаратному прототипі та досягнуто найкращого можливого балансування фаз.

У [14] запропоновано метод оптимізації підключення заданої кількості споживачів із заданим тимчасовим споживанням електроенергії до трифазної схеми електропостачання для забезпечення збалансованого споживання електроенергії. В результаті вирішується завдання симетризації електроприймачів за фазами розподільної мережі електроенергетичної системи.

У [15] запропоновано підхід «майстер–підлеглий» на основі алгоритму оптимізації чорної діри (ВНО) для одночасного балансування фаз і

компенсації реактивної потужності у трифазних мережах. Розглянуто два методи: каскадний (CSM) і одночасний (SSM). SSM показав кращі результати – зниження цільової функції на 32,27% (8-шинна система) та 33,52% (27-шинна). Перевірку проведено в MATLAB та DIgSILENT.

У [16] представлена змішано-цілочисельна квадратична опукла (MIQC) модель для балансування фаз у асиметричних мережах. Цільова функція мінімізує втрати, враховуючи активну/реактивну потужність і 6 можливих фазових комбінацій. На тестах із 8, 15 і 25 вузлами MIQC перевершила метаевристичні методи. Моделювання виконано в MATLAB з CVX і Gurobi.

У [17] використано вдосконалений генетичний алгоритм Чу-Бізлі (CBGA) у схемі «майстер–підлеглий» для мінімізації річних експлуатаційних витрат через оптимальне балансування фаз. На модифікованому 37-шинному живильнику досягнуто зниження витрат приблизно на 20%. Вдосконалений CBGA працює у 3–19 разів швидше за класичні алгоритми.

У [18] запропоновано метод управління трифазним дисбалансом на основі індексів перенесення споживання. Визначено еталонну послідовність фаз для вибору оптимального розподілу споживання. Моделювання на реальній мережі підтвердило ефективність методу у покращенні якості електроенергії.

У [19] досліджено методи компенсації незбалансованих трифазних споживачів (зірка/трикутник, заземлені/незаземлені) із застосуванням трьох схем корекції нейтрального струму. Загальний підхід дозволяє одночасно балансувати фази та коригувати коефіцієнт потужності, що після компенсації забезпечує збалансовані струми, синфазні з напругами.

У [20] поєднано генетичні алгоритми та штучну нейронну мережу для автоматичної реконфігурації мережі з метою оптимального балансування фаз. Навчання та тестування виконано в MATLAB на реальних даних. Метод значно зменшує максимальну різницю між фазними струмами порівняно з існуючими підходами.

У [21] запропоновано автоматичну систему трифазного балансування для споживачів з однофазними споживачами, що подолано складності ручного налаштування. Система включає центральний контролер і декілька блокових контролерів-перемикачів. Моделювання в MATLAB Simulink підтвердило ефективність: баланс покращується зі збільшенням кількості груп споживачів.

У [22] для балансування фаз застосовано нечітку логіку Сугено (MIMO, матриця $3 \times 3 \times 3$). Метод простий у обчисленнях і ефективний: дисбаланс зменшено з 30,86% до 5,59%, що відповідає вимогам IEEE std 446–1995.

У [23] запропоновано просте, недороге та надійне евристичне рішення для динамічного балансування фаз у низьковольтних мережах за допомогою трифазних перемикачів без потреби в комунікаціях. Метод враховує кількість і розташування однофазних споживачів і забезпечує розподілене регулювання, підтверджене моделюванням.

У [24] розроблено двоетапний підхід: спочатку нечітка логіка визначає необхідну зміну електроприймача на кожній фазі, потім комбінаторна оптимізація вибирає конкретні точки для перемикачів між фазами. Метод перевірено на мережі Південної Африки.

У [25] показано, що трифазні інвертори фотоелектричних панелей та зарядні пристрої для електромобілів можуть балансувати фази шляхом перерозподілу потужності між фазами. Це знижує втрати, покращує профіль напруги та дозволяє збільшити кількість підключених пристроїв. Запропоновано також локальний контролер для випадків відсутності зв'язку в реальному часі.

Аналіз літературних джерел свідчить, що дисбаланс фаз у низьковольтних мережах є складним, динамічним і випадковим явищем, оскільки споживання постійно змінюються під впливом побутових споживачів, промислових об'єктів та відновлюваних джерел енергії. Традиційні методи балансування, ґрунтовані на жорстких алгоритмах або фіксованих правилах, часто не забезпечують достатньої адаптивності та

точності, особливо за різких і непередбачуваних змін у розподілі електроприймачів. Хоча сучасні оптимізаційні підходи дають значне зниження втрат і асиметрії, їх застосування обмежене через високу обчислювальну складність і великі вимоги до ресурсів у реальному часі, що робить їх непридатними для типових низьковольтних мереж, де контролери мають бути простими, компактними та автономними.

Натомість [4] продемонстрували, що нечітка логіка дозволяє ефективно зменшувати втрати потужності без кардинальної перебудови системи управління, працюючи навіть за умов неточної або неповної інформації. Подібні висновки отримав [24], запропонувавши двостадійний підхід: спочатку нечітка логіка визначає напрямок і обсяг перерозподілу споживачів, а потім виконується комутація, що забезпечує адаптивність до динаміки мережі. У [22] також підтверджено високу ефективність нечіткого управління для досягнення рівня дисбалансу, що відповідає стандартам якості електроенергії, при цьому система залишається обчислювально легкою й придатною для реалізації на недорогих контролерах у реальному часі.

Ці результати обґрунтовують доцільність використання нечіткої логіки Мамдані для балансування фаз: вона добре працює з нечіткими, неповними та змінними даними, забезпечує плавне й адаптивне регулювання, а також дозволяє інтегрувати експертні знання у вигляді зрозумілих лінгвістичних правил «якщо–то», спрощуючи проектування та впровадження. На відміну від оптимізаційних методів, вона не вимагає значних обчислювальних ресурсів і сумісна зі стандартними програмно-апаратними платформами.

Таким чином, мета роботи – створити систему автоматичного балансування фаз у трифазній низьковольтній мережі на основі нечіткої логіки Мамдані, що здатна адаптивно керувати переключенням електроприймачів між фазами, підвищуючи якість електроенергії і мінімізуючи втрати потужності.

Висновки до розділу 1

В розділі визначено, що дисбаланс фаз у трифазних електричних мережах є наслідком нерівномірного розподілу однофазних електроприймачів, впливу нелінійних споживачів, технічного стану мережевої інфраструктури та зростання частки розосереджених джерел енергії. Це явище має динамічний, багатофакторний характер і призводить до погіршення якості електроенергії, збільшення втрат, перевантаження обладнання та скорочення його терміну служби. Сучасні підходи до балансування фаз, зокрема на основі нечіткої логіки, демонструють гарну якість, що обґрунтовує доцільність подальшої розробки інтелектуальних систем управління підключенням електроприймачів на цій основі.

РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРУ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ ФАЗ В ТРИФАЗНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

2.1 Фазифікація нечіткого контролера

Вибір таких змінних, як-то різниця струмів (CD) і коефіцієнт незбалансованості (UB) як вхідних для нечіткої системи керування (НСК) обумовлений потребою забезпечити нечіткому логічному контролеру (НЛК) повну інформацію про стан трифазної мережі для прийняття обґрунтованих рішень. Сама по собі жодна не дає достатньо даних для ефективного балансування, але їх поєднання значно підвищує точність і гнучкість системи.

Різниця струмів є прямою кількісною мірою дисбалансу в амперах і вказує, який обсяг струму потрібно перерозподілити між фазами для досягнення балансу:

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min}. \quad (2.1)$$

Велике значення CD свідчить про суттєвий дисбаланс і потребує активного втручання, навіть за низького загального споживання, оскільки воно пов'язане з ризиком перегріву провідників.

Коефіцієнт незбалансованості (UB), навпаки, відображає відносний рівень дисбалансу як частку від середнього струму і характеризує якість електропостачання, вплив на нульовий провідник та енергетичні втрати:

$$UB = \frac{\max |I_A - I_{\text{сеп}}|, |I_B - I_{\text{сеп}}|, |I_C - I_{\text{сеп}}|}{I_{\text{сеп}}}, \quad (2.2)$$

де $I_{\text{сеп}}$ – середній струм.

Високий UB за низького CD вказує на неефективний розподіл фаз без серйозної загрози перегріву, але з погіршеною якістю електроенергії, тому система все одно виконує помірні коригування. Навпаки, високий CD за низького UB (наприклад, за загального перевантаження мережі) вимагає

обережної, але швидкої реакції, щоб не додати електроприймача на вже завантажену фазу. Завдяки базі правил, що враховує обидва параметри, НЛК адекватно реагує на різні сценарії: при високих CD і UB система визнає критичний стан і застосовує найбільш активну стратегію; при малому CD і високому UB – виконує помірні дії для покращення якості розподілу; при малих значеннях обох показників – утримується від втручання, вважаючи стан мережі майже ідеальним. Таким чином, CD визначає обсяг необхідного переключення, а UB – пріоритет і ступінь критичності втручання, що разом дозволяє НЛК приймати зважені, адаптивні та оптимальні рішення для балансування трифазної мережі.

Вибір формату функцій приналежності (ФП) ґрунтується на фізичних особливостях трифазної мережі та необхідності забезпечити НЛК чутливість і плавність реакції на зміни входних сигналів, як-то різниці струмів (CD) і коефіцієнта незбалансованості (UB).

Для трикутних ФП (ТФП) Координати вершин трикутників (a, b, c) визначають діапазони та ступінь впливу кожної лінгвістичної змінної на рішення системи.

Також розглянемо й ФП Гаусса (ФПГ). Для схожості з ТФП ми встановимо формулу ФПГ так, щоб функція надійно охоплювала область, визначену трикутником.

Для входу CD з універсумом дискурсу 0...100 А ТФП налаштовані так, щоб забезпечити високу чутливість до малих відхилень і поступове, але впевнене реагування при значному дисбалансі. Функція SMALL описує майже ідеальний баланс з максимальною належністю біля нуля, де втручання не потрібне. MEDIUM забезпечує плавний перехід до помітного дисбалансу, з піком при 25 А – типовим порогом, потрібне втручання НСК. LARGE орієнтована на серйозні порушення з максимумом при 60 А, що сигналізує про необхідність істотного перерозподілу електроприймачів між фазами, а її перекриття з MEDIUM у діапазоні 30...45 А дозволяє уникати різких стрибків у керуванні. VERY_LARGE активується при CD понад 70 А і

досягає повної належності біля 100 А, вказуючи на необхідність максимально активного втручання для швидкого відновлення балансу.

ТФП і ФПГ для входу «різниця струмів» зображені на рис. 2.1 і 2.2.

Формули для ТФП:

$$\begin{aligned}
 \mu_{SMALL} &= \begin{cases} x/10, & 0 \leq x \leq 10, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{MEDIUM} &= \begin{cases} x-5 / 20, & 5 \leq x \leq 25, \\ 45-x / 20, & 25 \leq x \leq 45, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{LARGE} &= \begin{cases} x-30 / 30, & 30 \leq x \leq 60, \\ 90-x / 30, & 60 \leq x \leq 90, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{VERY_LARGE} &= \begin{cases} x-70 / 30, & 70 \leq x \leq 100, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

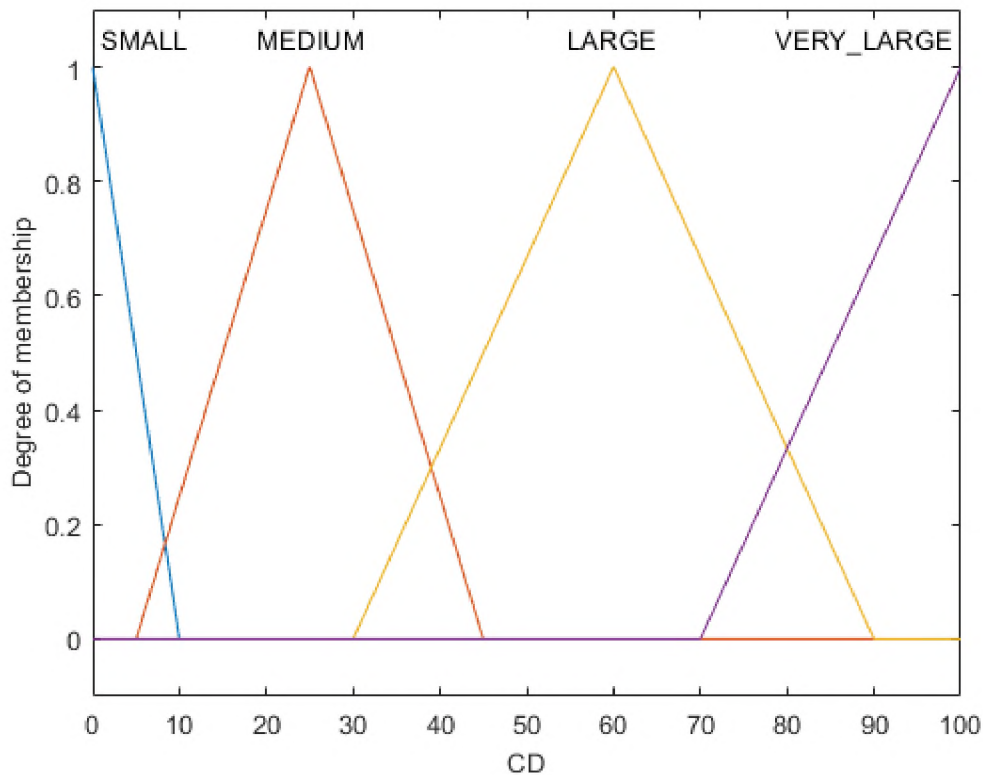


Рисунок 2.1 – ТФП до входу «різниця струмів»

Формули для ФПГ:

$$\begin{aligned}
 \mu_{SMALL} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-0}{2}\right)^2}; \\
 \mu_{MEDIUM} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-25}{6,7}\right)^2}; \\
 \mu_{LARGE} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-60}{10}\right)^2}; \\
 \mu_{VERY_LARGE} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-100}{5}\right)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

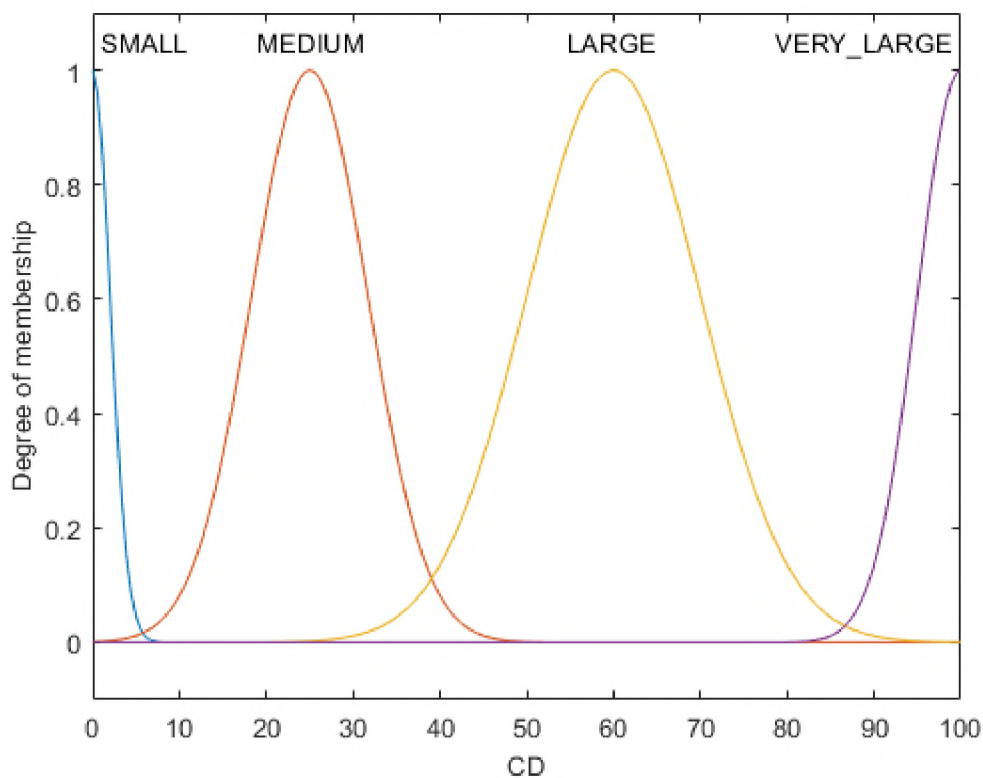


Рисунок 2.2 – ФПГ до входу «різниця струмів»

Для входу UB з універсумом дискурсу 0...1 параметри ТФП враховують технічні норми: LOW відповідає допустимому рівню незбалансованості до 10%, MEDIUM досягає максимуму при 25%, що є порогом істотних втрат і погіршення якості електроенергії, а HIGH активується від 35%, досягає піку при 50% і зберігає вплив до 100%, підкреслюючи критичність сильного дисбалансу. Перекриття між MEDIUM і

HIGH, наприклад у точці 40%, дозволяє системі формувати зважену, адаптивну відповідь.

ТФП і ФПГ для входу «коефіцієнт незбалансованості» зображені на рис. 2.3 і 2.4.

Формули для ТФП:

$$\begin{aligned}\mu_{LOW} &= \begin{cases} y/0,1, & 0 \leq x \leq 0,1, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\ \mu_{MEDIUM} &= \begin{cases} y - 0,05 / 0,2, & 0,05 \leq x \leq 0,25, \\ 0,45 - y / 0,2, & 0,25 \leq x \leq 0,45, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\ \mu_{HIGH} &= \begin{cases} y - 0,35 / 0,15, & 0,35 \leq x \leq 0,5, \\ 1 - y / 0,5, & 0,5 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}\end{aligned}\quad (2.5)$$

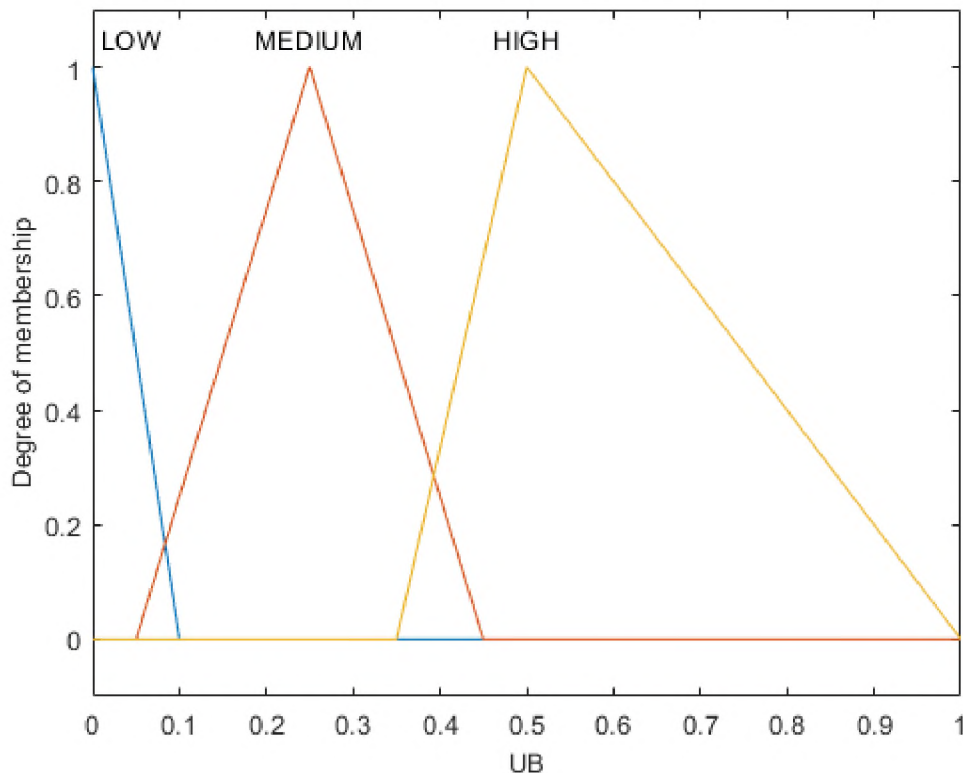


Рисунок 2.3 – ТФП до входу «коефіцієнт незбалансованості»

Формули для ФПГ:

$$\begin{aligned}\mu_{LOW} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-0}{0,02}\right)^2}; \\ \mu_{MEDIUM} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-0,25}{0,067}\right)^2}; \\ \mu_{HIGH} &= e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-0,5}{0,11}\right)^2}.\end{aligned}\tag{2.6}$$

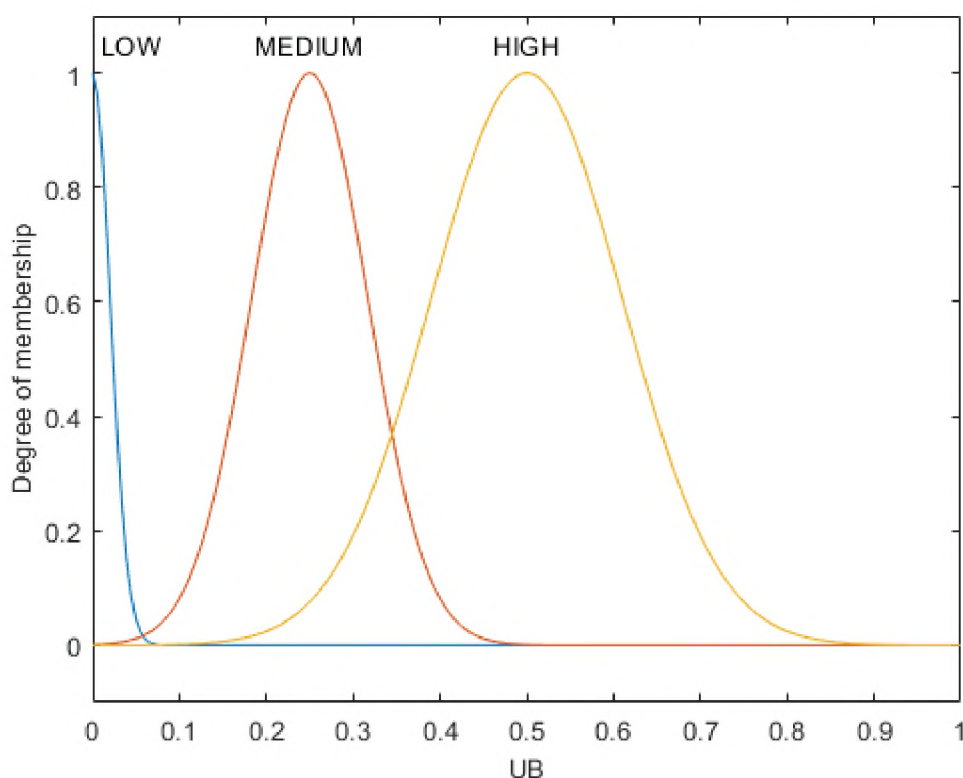


Рисунок 2.4 – ФПГ до входу «коефіцієнт незбалансованості»

Для вихідної змінної рівня перемикавання (SM) з універсумом дискурсу 0...1 ТФП відображають частку струму, яку доцільно переключити: NO_SWITCH забезпечує майже нульове втручання при мінімальній незбалансованості, SMALL_SWITCH і MEDIUM_SWITCH забезпечують плавне зростання інтенсивності перерозподілу (наприклад, 0,6 означає рекомендацію перемкнути близько 60% цільового струму, щоб уникнути перерегулювання), а LARGE_SWITCH генерує сигнал, близький до одиниці, для оперативного усунення критичних ситуацій. Розташування піків і зон перекриття ТФП на осі SM дозволяє процесу дефазифікації формувати

гладке, неперервне вихідне значення, що точно відображає загальну інформацію від усіх активованих правил і адекватно реагує на поточний стан мережі.

ТФП і ФПГ для виходу «рівень перемикавання» зображені на рис. 2.3 і 2.4.

Формули для ТФП:

$$\begin{aligned}
 \mu_{NO_SWITCH} &= \begin{cases} x/0,2, & 0 \leq x \leq 0,2 \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{SMALL_SWITCH} &= \begin{cases} x - 0,1 / 0,2, & 0,1 \leq x \leq 0,3, \\ 0,5 - x / 0,2, & 0,3 \leq x \leq 0,5, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{MEDIUM_SWITCH} &= \begin{cases} x - 0,4 / 0,2, & 0,4 \leq x \leq 0,6, \\ 0,8 - x / 0,2, & 0,6 \leq x \leq 0,8, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \\
 \mu_{LARGE_SWITCH} &= \begin{cases} x - 0,7 / 0,3, & 0,7 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

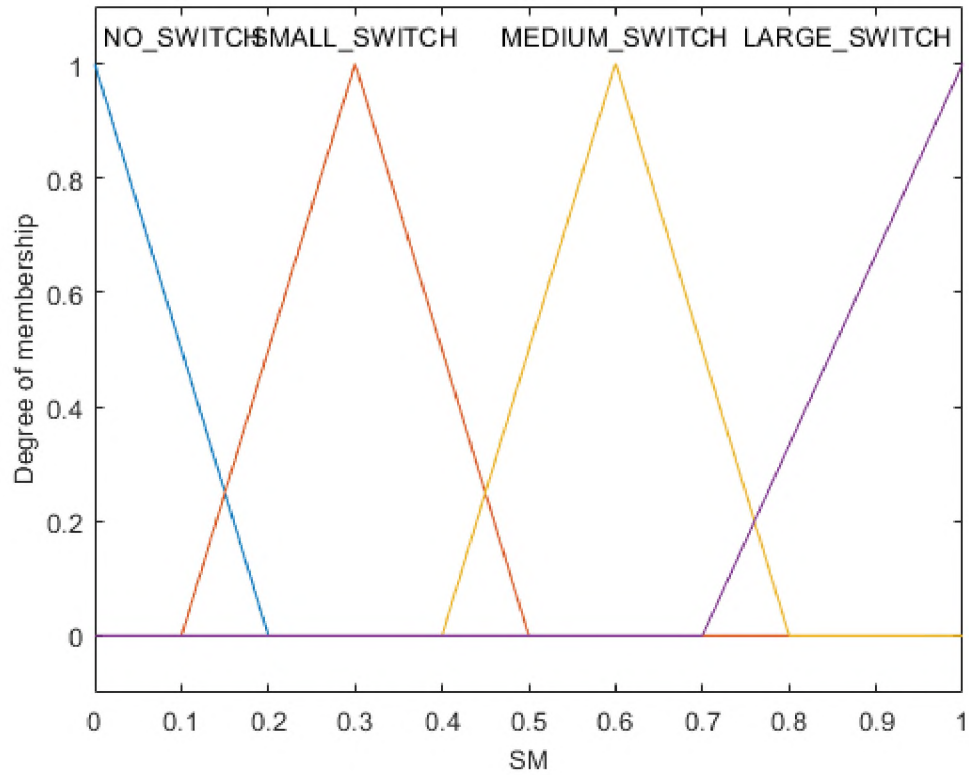


Рисунок 2.5 – ТФП до виходу «рівень перемикання»

Формули для ФПГ:

$$\begin{aligned}
 \mu_{NO_SWITCH} &= e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-0}{0,03} \right)^2} ; \\
 \mu_{SMALL_SWITCH} &= e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-0,3}{0,067} \right)^2} ; \\
 \mu_{MEDIUM_SWITCH} &= e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-0,6}{0,067} \right)^2} ; \\
 \mu_{LARGE_SWITCH} &= e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-1}{0,05} \right)^2} .
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

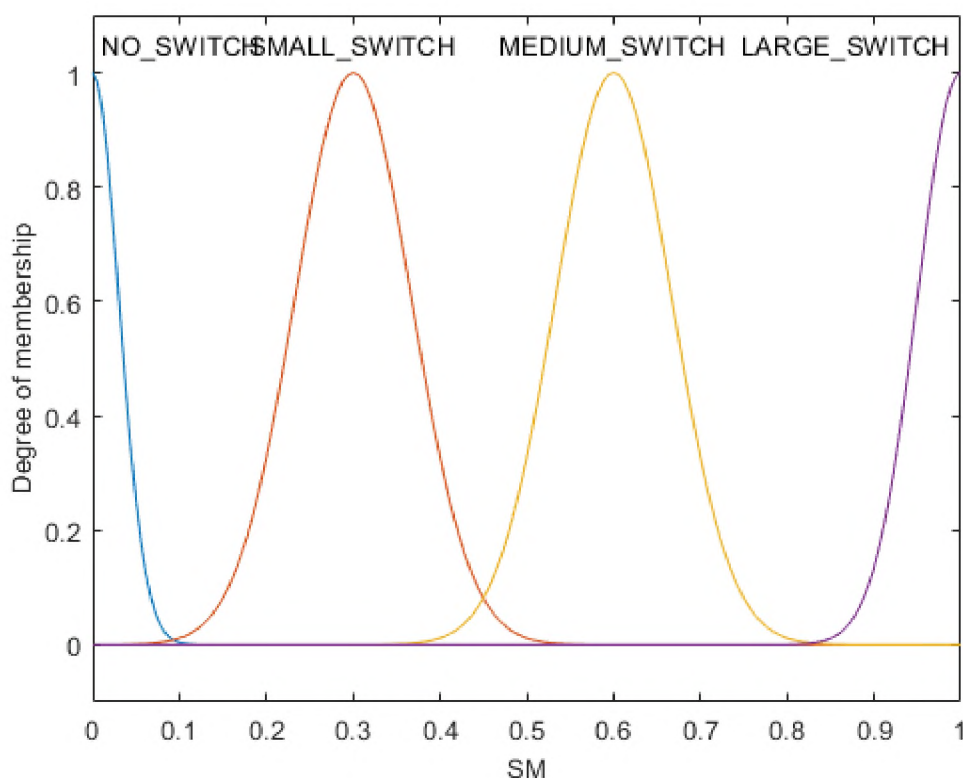


Рисунок 2.6 – ФПП до виходу «рівень перемикання»

2.2 База правил

База нечітких правил створює стратегію роботи НЛК, спрямовану на швидке усунення найбільшої незбалансованості за умови уникнення надмірного коригування у стані, близькому до рівноваги. Кожне правило «ЯКЩО–ТО» моделює емпіричні знання енергетика щодо перерозподілу електроприймачів на фазах залежно від абсолютної різниці струмів (CD) та відносної незбалансованості (UB).

База правил НЛК така:

R1: ЯКЩО $CD \in SMALL$ I $UB \in LOW$, TO $SM \in NO_SWITCH$

R2: ЯКЩО $CD \in MEDIUM$ I $UB \in MEDIUM$, TO $SM \in SMALL_SWITCH$

R3: ЯКЩО $CD \in LARGE$ I $UB \in MEDIUM$, TO $SM \in MEDIUM_SWITCH$

R4: ЯКЩО $CD \in VERY_LARGE$ I $UB \in HIGH$, TO $SM \in LARGE_SWITCH$

R5: ЯКЩО $CD \in SMALL$ I $UB \in HIGH$, TO $SM \in SMALL_SWITCH$

R6: ЯКЩО $CD \in VERY_LARGE$ I $UB \in LOW$, TO $SM \in LARGE_SWITCH$

Правило R1 забезпечує стабільність системи в умовах прийнятного балансу, утримуючись від будь-яких дій, щоб не спровокувати новий дисбаланс.

Правила R2 і R3 охоплюють помірні стани дисбалансу, викликаючи пропорційну реакцію: чим більша різниця струмів при середньому UB, тим інтенсивніше перемикавання.

Правило R4 відповідає за критичні ситуації, коли високі значення обох параметрів потребують максимально агресивного втручання.

Правило R5 вводить інтелектуальну гнучкість: навіть за малої абсолютної різниці струмів, але при високому відносному дисбалансі (наприклад, за дуже низького загального споживання), система виконує мінімальну, але необхідну корекцію.

Правило R6 передбачає малоймовірну, але небезпечну ситуацію, коли велика абсолютна різниця струмів (понад 70 A) становить пряму загрозу для мережі незалежно від низького UB, і тому вимагає рішучої дії.

У сукупності ці правила реалізують двовимірний контроль, у якому рішення про рівень перемикавання (SM) приймається на основі одночасного аналізу кількісної міри дисбалансу (CD) та якісної оцінки його критичності (UB), що дозволяє уникнути жорсткої порогової логіки й забезпечити плавну, адекватну реакцію на будь-який стан мережі.

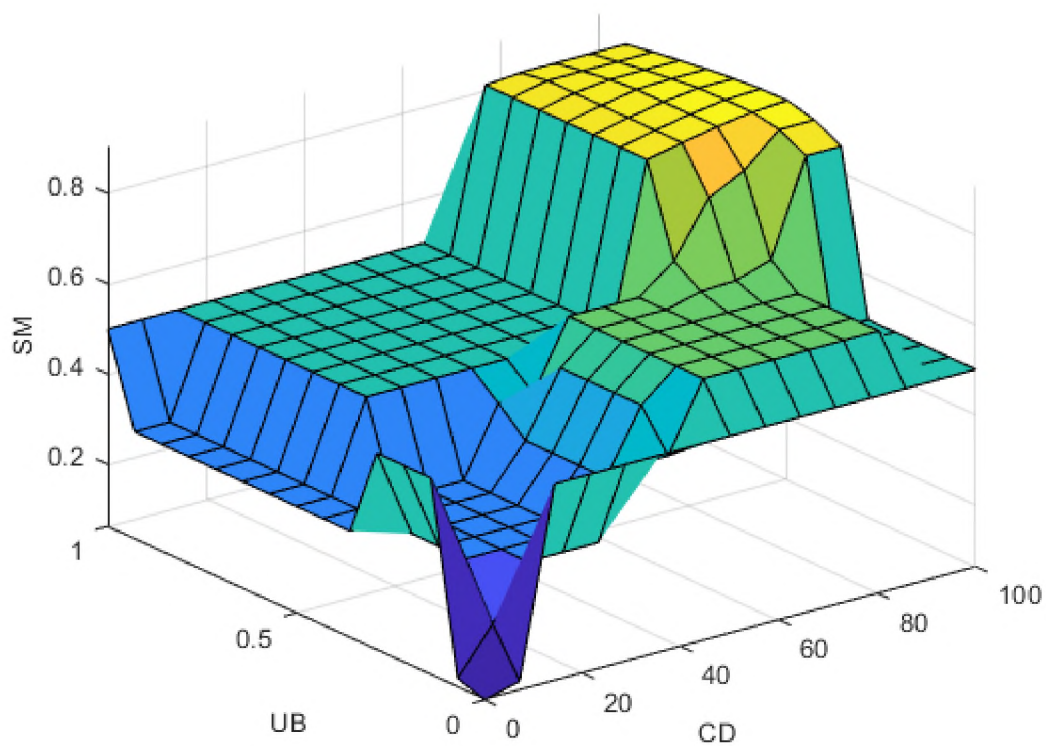


Рисунок 2.7 – Відгук НЛК (трикутні ФП)

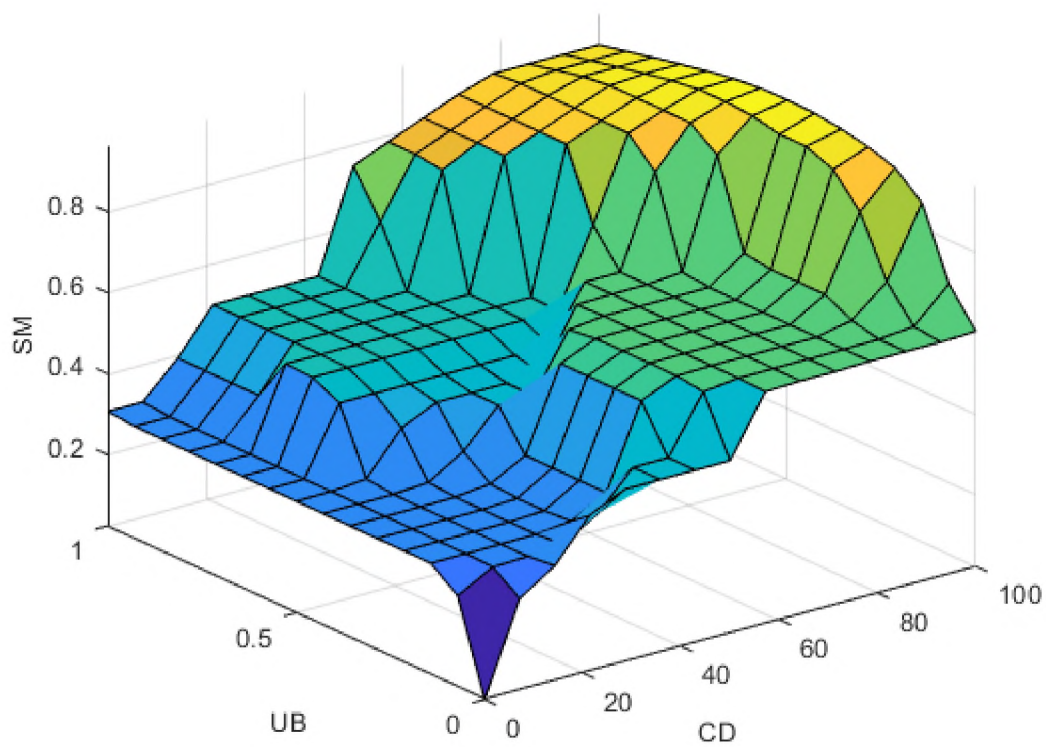


Рисунок 2.8 – Відгук НЛК (ФПГ)

2.3 Агрегація

Агрегація об'єднує всі правила, що мають однакову ФП вихідної змінної. У даній системі, загальна ФП $\mu_{BIX} z$ для вихідної змінної SM обчислюється як s-норма максимуму:

$$\mu_{BIX} z = \max_i \alpha_i T_{norm} \mu_{Ci} z = \max_{i=1}^N \min \alpha_i, \mu_{Ci} z, \quad (2.9)$$

де N – загальна кількість правил (6 у даному випадку).

2.4 Дефазифікація

Для отримання чіткого вихідного значення SM^* (яке використовується для розрахунку фактичного струму перемикавання), використовується метод Centroid, який є стандартним для системи Мамдані:

$$SM^* = \frac{\int_{U_{SM}} z \cdot \mu_{BIX} z dz}{\int_{U_{SM}} \mu_{BIX} z dz}. \quad (2.10)$$

Це чітке значення SM^* потім використовується для визначення фактичної величини струму споживача, якого потрібно перемкнути між найбільш і найменш завантаженими фазами.

2.5 Приклад нечіткого логічного висновку

Робота НЛК балансуванням фаз починається з фазифікації, де чіткі вхідні значення, а саме різниця струмів $CD=38,99$ Ампер та коефіцієнт незбалансованості $UB=0,3955$ $UB = 0.3955$, перетворюються на ступені належності до відповідних лінгвістичних термів.

При використанні ТФП (рис. 2.9), вхід $CD=38,99$ вводить в дію дві ФП: MEDIUM зі ступенем належності 0,3005 та LARGE зі ступенем належності 0,2997. Вхід $UB=0,3955$ також активує два терми: MEDIUM зі ступенем 0.2725 та HIGH зі ступенем 0,3033. На наступному етапі, агрегації

правил, визначаються ступені активації α_i шляхом застосування оператора мінімуму ($\min$) до комбінацій вхідних термів. Наприклад, правило, що стосується CD є MEDIUM і UB є MEDIUM, активується зі ступенем $\min 0,3005; 0,2725 = 0,2725$. Правило для CD є LARGE і UB є HIGH активується зі ступенем $\min 0,2997; 0,3033 = 0,2997$. Ці ступені введення в дію потім застосовуються до відповідних вихідних термів (наприклад, SMALL_SWITCH та MEDIUM_SWITCH), зрізаючи їхні ФП. Кінцевий нечіткий вихід формується шляхом об'єднання (максимуму) усіх зрізаних вихідних термів. Дефазифікація (Centroid) перетворює цей об'єднаний нечіткий вихід у єдине чітке значення SM^* , яке у цьому випадку очікується в діапазоні 0,35 до 0,45, що відповідає помірному перемиканню.

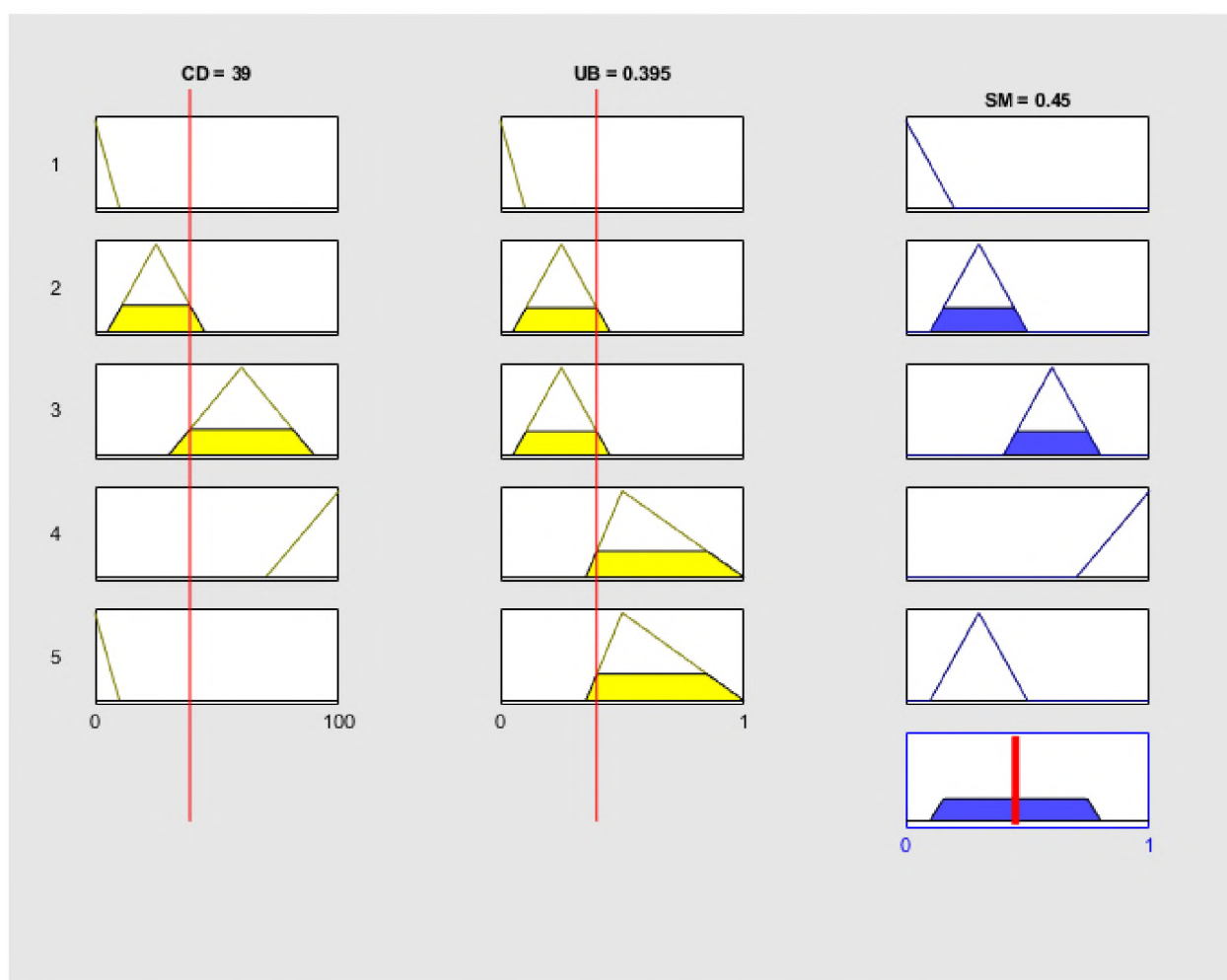


Рисунок 2.9 – Створення висновку НЛК (трикутні ФП)

Якщо ж використовуються ФПГ (рис. 2.10), процес фазифікації дає інші ступені належності через їхню експоненціальну форму. Для $CD=38,99$ ФП MEDIUM активується зі ступенем 0,4851, а LARGE зі ступенем 0,3045. Для $UB=0,3955$ ФП MEDIUM має дуже низький ступінь 0,0076, тоді як HIGH має високий ступінь 0,7852. Ця різниця свідчить про те, що гаусові функції жорсткіше відділяють ФП MEDIUM від HIGH у цьому діапазоні. При агрегації правил, введення в дію, пов'язане з ФП UB є MEDIUM, стає мінімальним (0,0076), оскільки вона «зрізається» цим низьким значенням. Натомість, активація, пов'язана з ФП UB є HIGH, стає домінуючою: наприклад, правило, що вводить в дію MEDIUM_SWITCH (через комбінацію MEDIUM CD та HIGH UB), матиме ступінь $\min 0,4851; 0,7852 = 0,4851$.

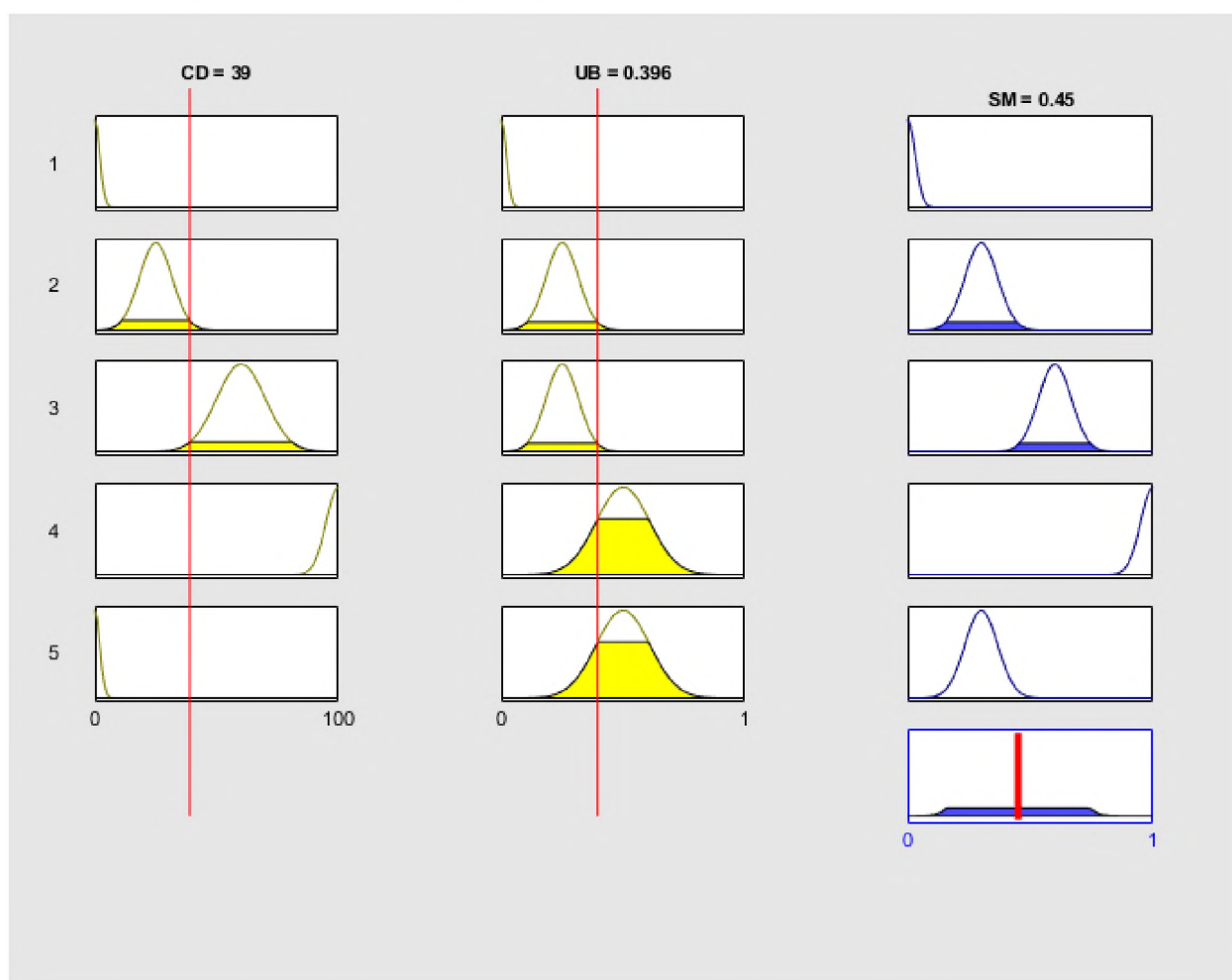


Рисунок 2.10 – Створення висновку НЛК (трикутні ФП)

Оскільки високу активацію отримують терм MEDIUM_SWITCH та LARGE_SWITCH, кінцеве значення SM^* буде зміщено до більшої величини, очікувано в діапазоні 0,55 до 0,65, що означає більш агресивне рекомендоване перемикання порівняно з трикутними функціями. Різниця в результатах підкреслює, як вибір ФП впливає на чутливість і кінцеву стратегію керування системою.

Висновок до розділу 2

У розділі створюється нечіткий логічний контролер для балансування фаз. Обґрунтовується вибір входних змінних (різниці струмів та коефіцієнта незбалансованості) і формату ФП (ТФП та ФПГ) для НЛК, розробляє базу правил, що забезпечує адаптивне та зважене керування, і описує етапи агрегації та дефазифікації. Запропонована структура дозволяє ефективно реагувати на різні режими роботи мережі та забезпечувати балансування фаз у реальному часі.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА БАЛАНСУВАННЯ ФАЗ

3.1 Принцип моделювання автоматизованої системи керування балансуванням фаз

Моделювання автоматизованого балансування фаз відбувається в системі MATLAB через імітування роботи інтелектуального комутаційного пристрою в реальній трифазній електромережі, який провадить послідовний процес прийняття рішень про переключення одиничних електроприймачів між фазами за допомогою нечіткої логіки. Замість динамічної симуляції фізичних процесів, НЛК фокусується на дискретному керуванні станом електромережі.

На початку моделювання відбувається ініціалізація системи. Завантажується попередньо створений НЛК, яка містить ФП та базу правил потрібних для балансування. Далі створюється віртуальна трифазна мережа, що складається з одиничних електроприймачів, кожне з яких має свій фіксований струм (випадково згенерований в діапазоні 1...10 А). Ці електроприймачі спочатку незбалансовано розподіляються по трьох фазах А, В і С. Використовується функція, яка підсумовує струми всіх електроприймачів на кожній фазі, визначаючи поточні фазні струми та, відповідно, ступінь незбалансованості.

Основний процес керування відбувається в циклі. На кожному кроці циклу, що імітує дискретний момент часу, виконуються такі етапи. Спочатку відбувається вимірювання та аналіз. Визначаються найбільш завантажена фаза ($I_{\max}$) та найменш завантажена фаза ($I_{\min}$). На основі цих значень обчислюються вхідні змінні для нечіткої системи: абсолютна різниця струмів (CD) та коефіцієнт незбалансованості (UB).

Далі відбувається прийняття рішення НЛК. Розраховані значення CD та UB подаються на вхід НЛК. Система нечіткої логіки обробляє ці вхідні дані відповідно до своєї бази правил та ФП, використовуючи алгоритм висновку

Мамдані. На виході НЛК видає значення (SM) нормовану величину від 0 до 1, що вказує на бажану активність дії. На етапі виконання перемикання система переводить бажану активність SM у цільовий струм перемикання. НЛК шукає на найбільш завантаженій фазі одне з тридцяти одиничних електроприймачів, чий струм найкраще відповідає цьому цільовому струму (мінімізуючи різницю). Це імітує пошук оптимального електроприймача для переключення. Після вибору ідентифікований одиничний електроприймач логічно переключається з найбільш завантаженої фази на найменш завантажену фазу.

Наприкінці кожного кроку відбувається оновлення стану. Перераховуються нові фазні струми, і якщо різниця струмів (CD) стає меншою за встановлений допуск, цикл припиняється. Усі проміжні значення фазних струмів та коефіцієнта незбалансованості зберігаються. Після завершення циклу, виводиться фінальний стан.

3.2 Результати симуляцій балансування фаз з використанням нечіткого логічного контролера

Для оцінювання роботи автоматизованої системи балансування фаз потрібно провести не одну, а багато симуляцій і потім провести фінальне аналізування даних.

Дисбаланс фаз у низьковольтних трифазних електромережах є випадковим. Кожна симуляція моделює інший початковий стан мережі – різне число електроприймачів, різні значення споживаних струмів, різні конфігурації переключень.

Це підтверджується результатами роботи НЛК з рис. 3.1 – 3.3, де балансування досягається за різне число кроків.

Велика кількість симуляцій дозволяє порівняти різні варіанти реалізації НЛК (наприклад, з ТФП та ФПГ) в середніх умовах.

Зробимо 1000 симуляції роботи системи балансування фаз.

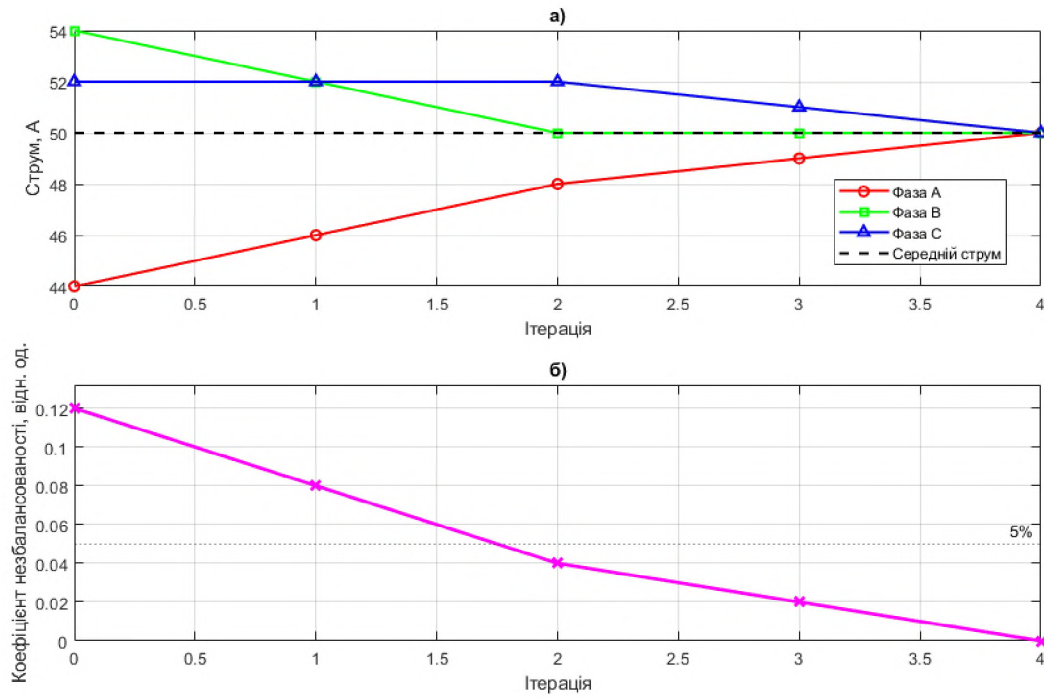


Рисунок 3.1 – Автоматизоване балансування фаз в електромережі (за 4 кроки)

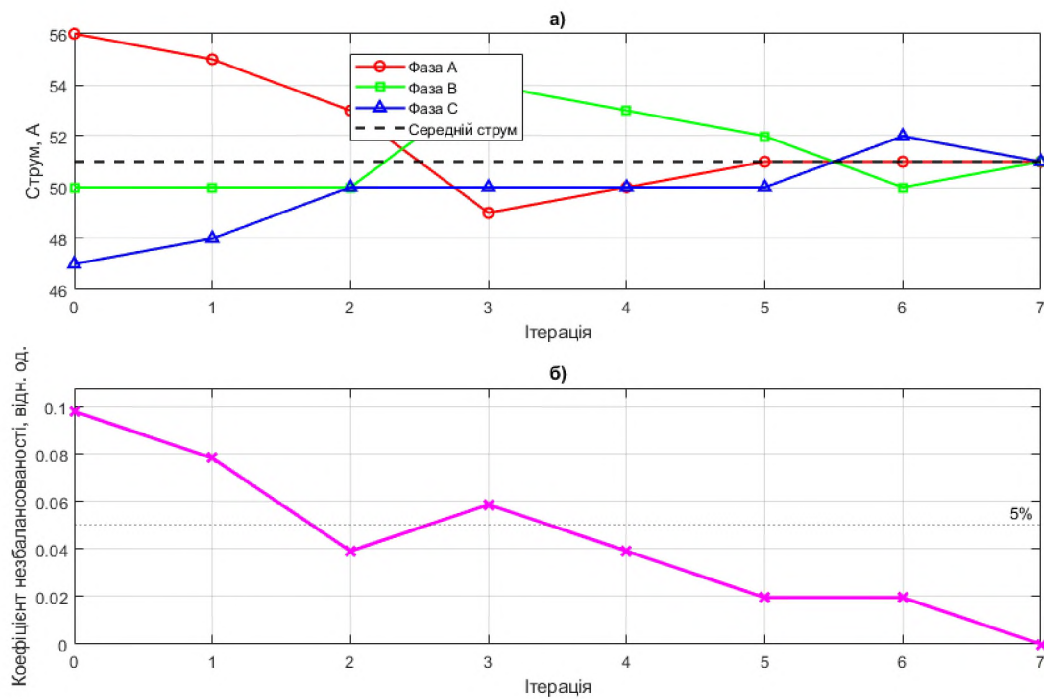


Рисунок 3.2 – Автоматизоване балансування фаз в електромережі (за 7 кроків)

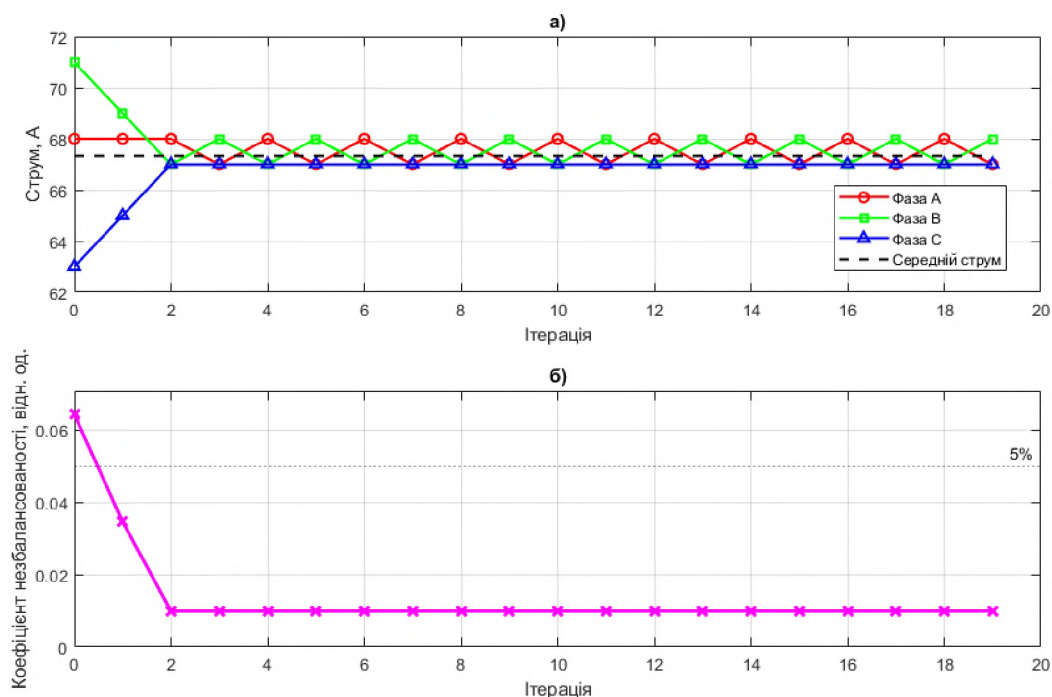


Рисунок 3.3 – Автоматизоване балансування фаз в електромережі (за 20 кроків)

Спочатку беремо НЛК з ТФП.

Аналіз рис. 3.4 свідчить про те, що найбільша частка симуляцій (71,1%) завершилася на 20-ому кроці. Це вказує на те, що 20 є максимальною дозволеною кількістю кроків на одну симуляцію, і значна більшість процесів фактично досягає цього ліміту, не змігши завершитися раніше. Такий високий відсоток симуляцій, що досягають верхньої межі, може свідчити про те, що система часто не встигає повністю збалансувати фази в межах заданого часу або кількості кроків, а отже про можливу недостатню швидкість або відсутність електроприймачів, котрих можна переключити для отримання збалансованості.

Тут спостерігається більш рівномірний і поступовий розподіл для проміжних значень кількості кроків. Найвищі серед значень до 20 спостерігаються при 7 кроках (4,8%), 6 кроках (4,2%) та 5 кроках (3,8%). Також помітний пік на 4 кроках (3,2%) і поступове зниження з подальшим зростанням числа кроків.

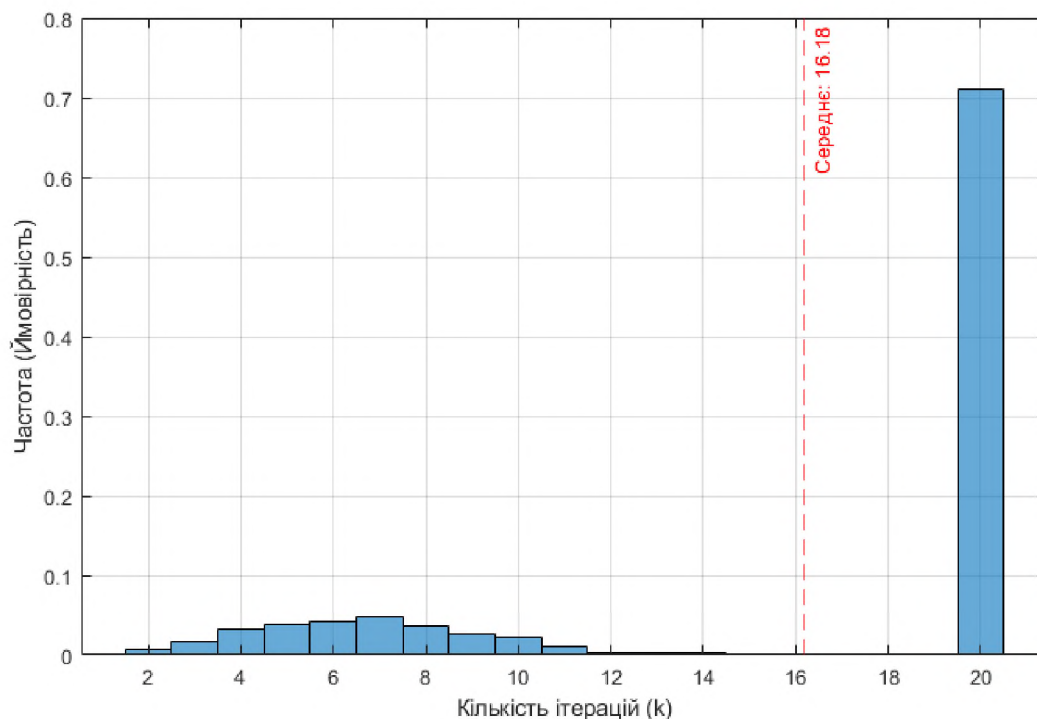


Рисунок 3.4 – Розподіл числа кроків необхідних до балансування фаз у НЛК з ТФП

Відзначається також наявність ненульових значень аж до 15 кроків (0,1%), тоді як у діапазоні 16...19 кроків частка дорівнює нулю. Такий розрив до 20-го кроку додатково підтверджує те, що саме 20 є обмеженням, після досягнення якого процес припиняється незалежно від того, чи досягнуто повного балансу. Це також може означати, що між 15-ю і 20-ю кроками система не спроможна досягти умови завершення, і тому всі такі процеси умовно завершуються на 20-му кроці.

Далі подивимось щодо різниці струмів (рис. 3.5). Найвища частка симуляцій (51,1%) припадає на різницю струмів, рівну 1,5 А. Другим за поширеністю є значення 0,5А, яке спостерігається у 28,9%. Разом ці два значення охоплюють понад 80% усіх симуляцій, що свідчить про те, що в переважній більшості випадків система завершує процес балансування з досить невеликою різницею струмів.

Подальший розподіл характеризується різким спадом: значення 2,5А (5,2%) симуляцій, 3,5А (8,8%), 4,5А (2,3%), 5,5А (1,7%), 6,5А (0,7%), 7,5А

(0,8%), 8,5A (0,1%), 9,5A (0,3%) і 10A (0,1%). Більшість симуляцій (80.0%) завершується з різницею струмів не більше 1,5A, що може вважатися задовільним з точки зору якості балансування. Лише в незначній частині випадків (менше 20%) різниця перевищує це значення, причому тільки у 1.2% симуляцій вона досягає рівня понад 7,5A. Такий розподіл свідчить про високу стабільність та надійність роботи НЛК з ТФП, оскільки викиди у бік великих значень різниці струмів є рідкісними й обмеженими за величиною.

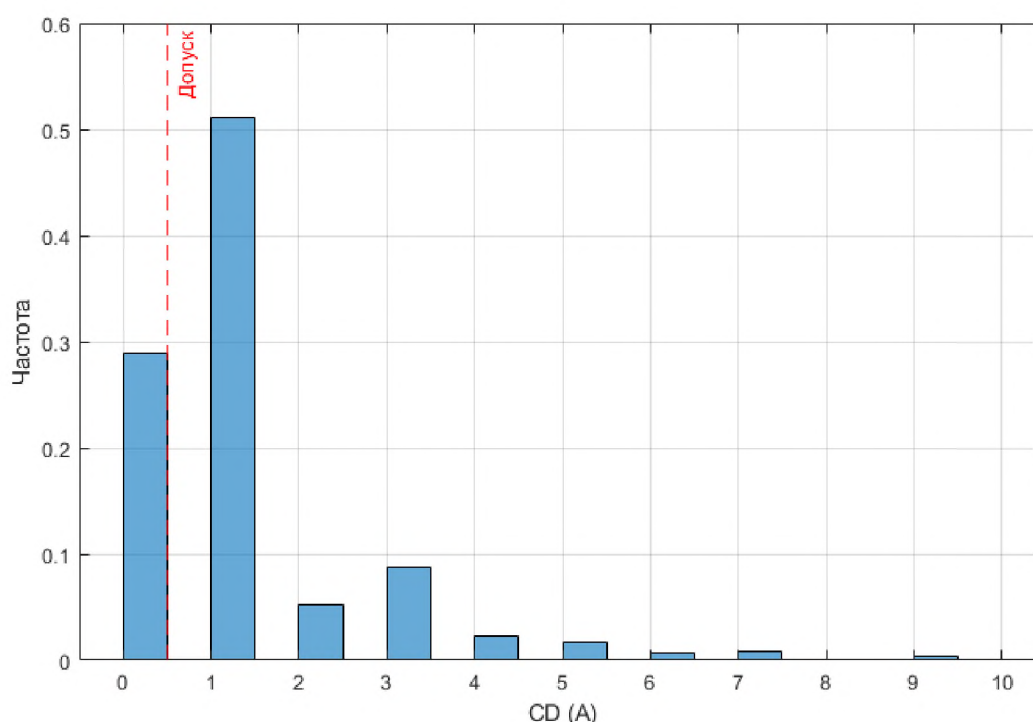


Рисунок 3.5 – Розподіл різниці струмів при досягненні (останній крок) балансування фаз у НЛК з ТФП

Далі подивимось щодо коефіцієнту незбалансованості (рис. 3.6). Найчастіше зустрічається значення коефіцієнта 0,0156, яке спостерігається у 51,2% симуляцій. Це свідчить про те, що в понад половині випадків система досягає досить низького рівня незбалансованості, що може вважатися високим рівнем якості балансування. Другим за поширеністю є значення 0,0052, яке фіксується у 28,1% симуляцій, що підкреслює здатність НЛК з ТФП зменшувати дисбаланс.

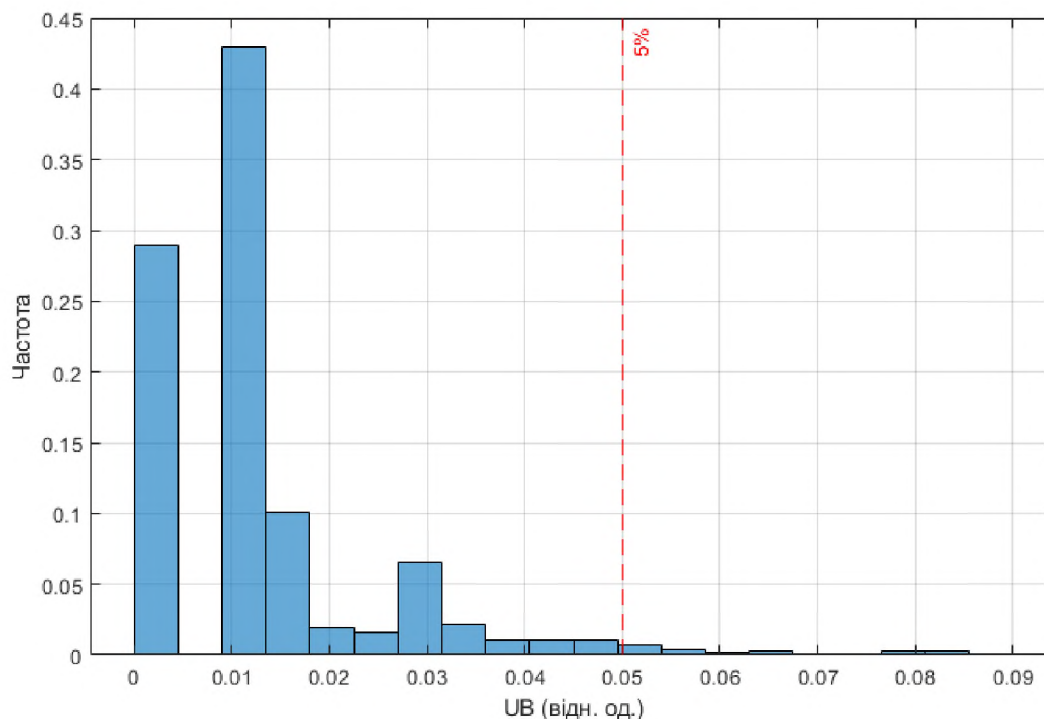


Рисунок 3.6 – Розподіл коефіцієнту незбалансованості при досягненні (останній крок) балансування фаз у НЛК з ТФП

Подальший розподіл демонструє швидке зниження частки зі зростанням коефіцієнта. Так, значення 0,0312 зустрічається у 4,3% симуляцій, 0,026 (3,2%), 0,0208 (3,4%), 0,0364 (2,9%), а інші значення від 0,0416 до 0,104 мають частки не вищі за 1,2%, причому багато з них – лише по 0,1–0,3%,

Разом значення коефіцієнта незбалансованості, що не перевищують 0,0156, охоплюють майже 80% усіх симуляцій, що є показником високої стабільності та ефективності керування. Навіть у найгірших реалізаціях коефіцієнт залишається нижчим за 0,08, що також може бути прийнятним залежно від технічних вимог до системи. Розподіл має виражену концентрацію у нижній частині діапазону, що свідчить про надійну та передбачувану роботу нечіткого контролера з ТФП. Лише в окремих випадках система не досягає високої точності балансування, але й ці відхилення є обмеженими та рідкісними, що загалом підтверджує високу якість реалізованого алгоритму керування.

Тепер беремо НЛК з ФПГ.

Аналіз рис. 3.7 показує, що найбільша частка симуляцій (76,5%) завершилася за 20 кроків, що є значно вищою за всі інші значення. Це свідчить про те, що в більшості випадків системі не вдається досягти балансу раніше, і лише на 20-му кроці досягається умова завершення процесу. Таке різке зростання частки саме на останній межі діапазону може означати, що 20 кроків є заданим максимальним лімітом симуляції.

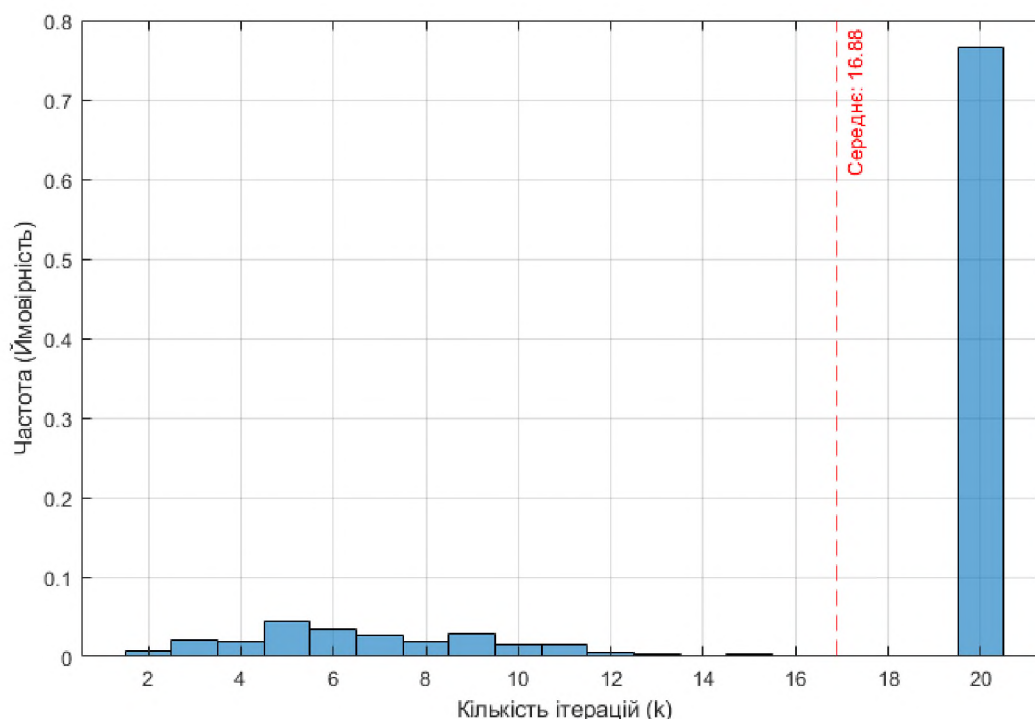


Рисунок 3.7 – Розподіл числа кроків необхідних до балансування фаз у НЛК з ФПГ

Інші значення розподілені набагато рівномірніше. Найвищі частки серед значень до 20 спостерігаються при 5 кроках (4,5%), 6 кроках (3,5%) та 9 кроках (2,8%). Мінімальні значення зафіксовані при 12, 13, 14, 16...19 кроках, де або дорівнює нулю, або дуже мала (0,2%). Це може говорити про те, що балансування не є гладким і передбачуваним – існує кілька «пікових» точок, у яких НЛК частіше досягає балансу, але в цілому вона вимагає багато кроків.

Також варто зазначити, що навіть при малих значеннях кількості кроків, таких як 2 або 3, ненульова – 0,6% і 2% відповідно, що свідчить про можливість дуже швидкої збіжності в окремих сценаріях початкових умов або конфігурацій системи. Разом із тим, зростання частки з 14 до 20 кроків (від 0 до 0,765) дуже різке, що показує жорстку межу в 20 кроків, яку НЛК часто не може подолати раніше.

Далі подивимось щодо різниці струмів (рис. 3.8). Аналіз даних показує, що найбільша частка симуляцій (51.2%) припадає на різницю струмів, рівну 1,1А, що є найменшим значенням у представленому діапазоні. Це свідчить про те, що в половині всіх випадків система досягає досить високої точності балансування. Наступне значення 0,55А (26.5%) також часто є в симуляціях. Таке значення різниці струмів є вдвічі менше за попереднє, але, ймовірно, все ще може вважатися прийнятним з точки зору технічних вимог до якості балансування.

Подальші значення розподілені значно рідше. Так, різниця струмів 2,2 зустрічається у 5,9%, 3,3А (10,4%), 4,4А (1,7%), 5,5А (1,6%), а всі інші значення (від 6,05А до 11А) не більше 1,1%, причому деякі значення (наприклад, 1,65А, 2,75А, 3,85А тощо) взагалі не спостерігалися в жодній зі 1000 симуляцій.

Разом із тим, варто відзначити, що понад 77% симуляцій (сума часток для різниць 0,55А і 1,1А) завершуються з різницею струмів не більше 1,1А, що вказує на високу якість НЛК. Лише в незначній частині випадків (менше 23%) різниця перевищує це значення, причому лише у 2,3% випадків вона досягає рівня понад 5,5А. Це свідчить про те, що хоч більшість реалізацій працюють стабільно, у деяких випадках система не здатна досягти прийнятного рівня балансу.

Загалом, розподіл різниці струмів є дуже нерівномірним і сконцентрованим у нижній частині діапазону, що підтверджує стійкість та ефективність системи НЛК з ФПГ в більшості сценаріїв

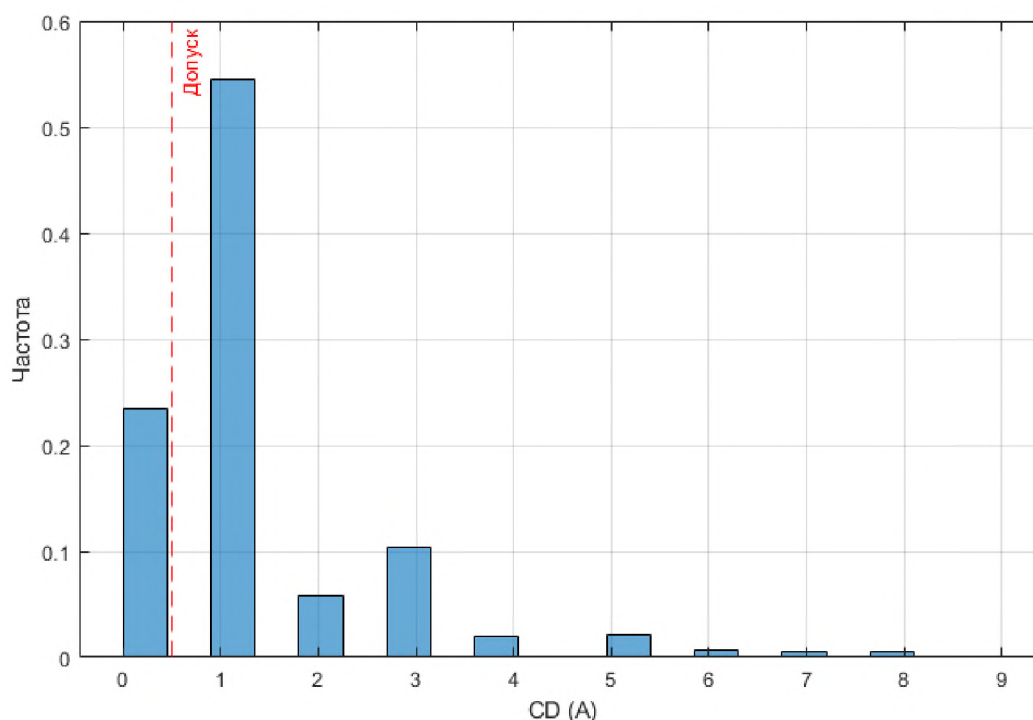


Рисунок 3.8 – Розподіл різниці струмів при досягненні (останній крок) балансування фаз у НЛК з ФПГ

І зробимо аналіз для коефіцієнта незбалансованості. Найбільша частка симуляцій (49,6%) припадає на значення коефіцієнта 0,0156, що свідчить про те, що майже в половині випадків система досягає досить низького рівня незбалансованості. Наступне за поширеністю (0,0052) зустрічається у 26,5% симуляцій, що також вказує на дуже високу якість балансування, адже це навіть менший рівень незбалансованості. Разом ці два значення охоплюють понад 76% усіх симуляцій, що підкреслює високу ефективність нечіткого контролера в більшості сценаріїв.

Подальший розподіл демонструє швидке спадання частки зі зростанням коефіцієнта незбалансованості. Так, значення 0,0312 спостерігається у 6,1%, 0,026 (3,1%), 0,0208 (3,7%), а інші значення від 0,0364 до 0,104 зустрічаються ще рідше від 0,1% до 3,9%. Лише кілька симуляцій (по 0,1...0,3%) завершуються з коефіцієнтом незбалансованості понад 0,07, а деякі значення у верхній частині діапазону (наприклад, 0,0884, 0,0936, 0,0988, 0,104) взагалі мізерні або нульові.

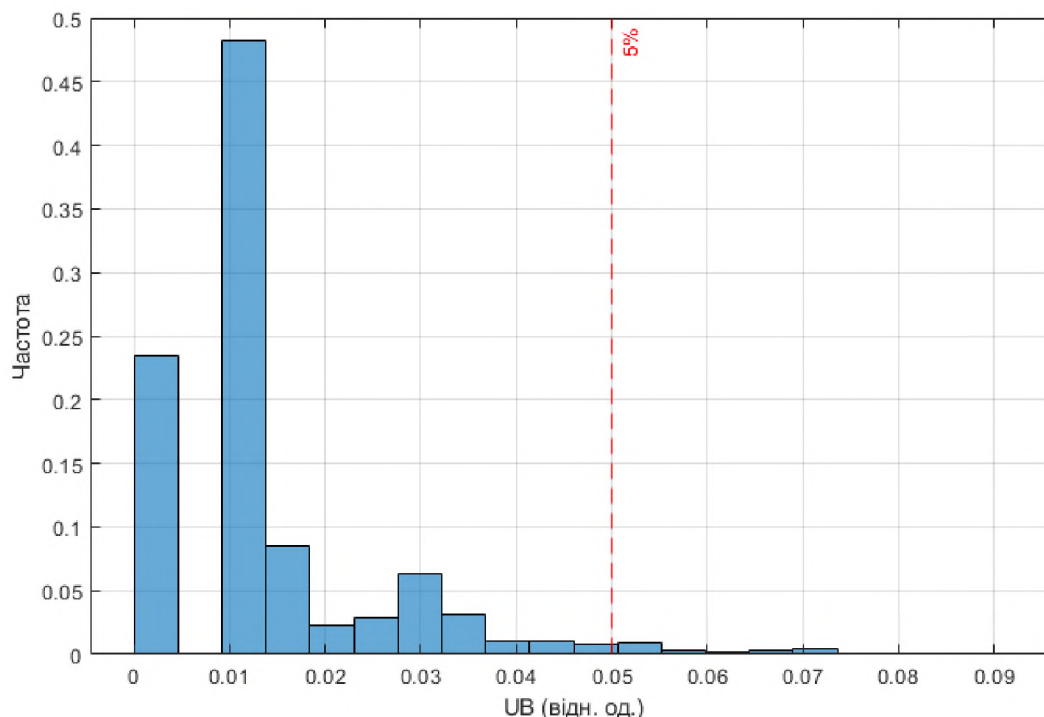


Рисунок 3.9 – Розподіл коефіцієнту незбалансованості при досягненні (останній крок) балансування фаз у НЛК з ФПГ

Цікавим є те, що між основними піками (0,0052 і 0,0156) існують проміжні значення з малими частками, що може вказувати на те, що система часто зупиняється у певних характерних станах, відповідних цим рівням незбалансованості. Також варто зазначити, що навіть у найгірших випадках коефіцієнт незбалансованості залишається нижчим за 0,11, що говорить про загалом добру стабільність.

Таким чином, НЛК з ТФП продемонструвала високу здатність до ефективного балансування фаз: у переважній більшості симуляцій коефіцієнт незбалансованості є дуже низьким, а викиди у бік погіршення якості балансу є рідкісними й обмеженими за величиною. Це свідчить про те, що НЛК добре налаштований і забезпечує стабільну та надійну роботу системи в більшості умов, хоча й залишається невелика ймовірність досягнення гірших результатів.

Порівняння результатів розподілу кількості кроків, необхідних для досягнення балансування фаз НЛК з ТФП і ФПГ, показує низку важливих відмінностей у поведінці двох варіантів системи керування.

Найбільш помітна особливість обох розподілів – значна частка симуляцій, які завершуються на верхній межі дозволеної кількості кроків (20). У випадку ФПГ становить 76,5%, тоді як для ТФП вона дещо нижче 71,1%. Це вказує на те, що обидві системи часто не встигають повністю збалансувати фази в межах відведеного часу.

Середня кількість кроків також відрізняється: для ТФП вона дорівнює приблизно 16,18, а для ФПГ – 16,88. Також відчутна різниця у долях симуляцій, які завершуються за 10 кроків або менше: для ТФП це 27% усіх симуляцій, тоді як для ТФГ – лише 21,2%. У проміжному діапазоні кількості кроків (від 4 до 8) частка для ТФП вищі, ніж для ФПГ: наприклад, на 6-му кроці частка симуляцій з ТФП становить 4,2% проти 3,5% для ФПГ, на 7-му – 4,8% проти 2,6%.

Отже, хоча обидві конфігурації контролера демонструють значну частку симуляцій, що досягають ліміту в 20 кроків, система з ТФП працює ефективніше: вона має нижчу середню кількість кроків, вищу частку швидких завершень і меншу залежність від максимального обмеження. Це може свідчити про кращу придатність ТФП для даної задачі балансування фаз у порівнянні з ФПГ.

Порівняння розподілів різниці струмів на завершальному кроці для НЛК з ТФП і ФПГ, отриманих у 1000 симуляціях, виявляє як схожості, так і принципові відмінності в поведінці двох варіантів.

Насамперед, обидва розподіли демонструють виражену концентрацію результатів у нижній частині діапазону. У випадку ТФП найчастіше зустрічається значення різниці струмів 1,5А у 51,1%, а другим за поширеністю є 0,5А (28,9%). Для гауссових функцій домінуючим є значення 1,1 (51,2%), а другим – 0,55А (26,5%). Хоча числові значення відрізняються (через особливості нормалізації), їхня структура схожа: у кожному випадку

більше половини симуляцій мають одне найбільше значення, а ще приблизно чверть менше, але також низьке значення. Це свідчить про те, що обидві НЛК у більшості випадків досягають прийнятного рівня точності балансування.

Що стосується якості балансування, то частка симуляцій з різницею струмів не більше за перше ненульове значення (0,5А для ТФП та 0,55А для ФПГ) практично однакова – 28,9% проти 26,5%. Так само загальна частка низьких різниць струмів (два перших значення) – 80% для ТФП і 77,7% для ФПГ свідчить про ефективність обох НЛК у більшості сценаріїв.

У той же час, розподіл випадків де різниця струмів перевищує 5А практично схожі. Для ТФП сума часток від 5,5А до 10А становить 3,7%, для ФПГ – від 5,5А до 11А складає 3,8%. Отже, ймовірність значного дисбалансу практично однакова для обох типів ФП.

Таким чином, хоча ТФП та ФПГ мають різні масштаби вихідних значень, загальна якість балансування, розподіл дуже схожий. Обидва підходи дають прийнятні результати у понад 77% випадків низької різниці струмів і рідко призводять до великих відхилень, що свідчить про стійкість системи НЛК незалежно від типу.

Порівняння розподілів коефіцієнта незбалансованості на завершальному кроці для НЛК з ТФП і ФПГ, виявляє як схожості, так і відмінності в загальній ефективності.

У випадку ТФП домінуючим значенням коефіцієнта незбалансованості є 0,0135, яке спостерігається у 43% симуляцій. Другим за поширеністю є значення 0,0045 (28,9%), що разом дає 71,9% симуляцій з дуже низьким рівнем незбалансованості. У випадку ФПГ домінує значення 0,0156 з часткою 49,6%, а другим є 0,0052 (26,5%), що разом становить 76,1% симуляцій. Таким чином, обидва НЛК демонструють високу якість балансування в більшості випадків, хоча контролер з ФПГ має трохи вищу загальну частку кращих результатів.

Важливо зазначити, що для ТФП існують деякі ненульові частки в діапазоні від 0,018 до 0,0315 (зокрема 10,1% при 0,018 і 6,6% при 0,0315),

тоді як для ФПГ максимальна частка після двох основних значень припадає на 0,0312 (6,1%). Це означає, що обидві НЛК мають схожу частку проміжних результатів, де незбалансованість помітна, але не критична.

Що стосується найгіршого дисбалансу з коефіцієнтом понад 0,05 їх частка дуже мала в обох НЛК. Для ТФП сума часток від 0,054 до 0,09 лише 2,4%, тоді як для ФПГ – від 0,052 до 0,104 складає 2,7%. Це свідчить про те, що обидві конфігурації НЛК добре уникли великих відхилень і забезпечують стабільну роботу в умовах різних початкових підключень електроприймачів у електромережі.

Загалом, обидва НЛК забезпечують високу якість балансування фаз, з переважною більшістю симуляцій, у яких коефіцієнт незбалансованості не перевищує 0,016. Контролер з ФПГ має вищу концентрацію результатів у найкращому діапазоні, тоді як система з ТФП демонструє більш рівномірний розподіл у проміжних значеннях. Різниця є незначними, і обидва НЛК можна вважати ефективними для задачі балансування фаз.

Висновки до розділу 3

На підставі проведеного моделювання та аналізу результатів 1000 симуляцій роботи нечіткого логічного контролера балансування фаз з ТФП і ФПГ можна зробити висновок, що обидві конфігурації забезпечують високу якість і стабільність керування. У більшості випадків (понад 75%) досягається низький рівень незбалансованості та мала різниця фазних струмів, що свідчить про ефективність застосування нечіткої логіки для даної задачі. Хоча значна частка симуляцій завершується на максимальній кількості кроків, що вказує на обмеження швидкості збіжності, система практично завжди уникне критичного дисбалансу. ТФП демонструють трохи кращу здатність до швидкого завершення процесу, тоді як ФПГ – вищу концентрацію результатів у найточнішому діапазоні. Загалом, обидва підходи є надійними й придатними для практичного застосування в системах автоматизованого балансування фаз.

ВИСНОВКИ

1. Фазовий дисбаланс у низьковольтних трифазних мережах є поширеною та багатофакторною проблемою, спричиненою нерівномірним підключенням однофазних споживачів, роботою нелінійного обладнання, станом мережевої інфраструктури та зростанням частки розосереджених джерел енергії. Це явище негативно впливає на ефективність, надійність і якість електропостачання, зумовлюючи додаткові втрати, перегрів обладнання та скорочення терміну його служби.

2. Застосування нечіткої логіки Мамдані є доцільним та ефективним підходом до побудови системи автоматичного балансування фаз, оскільки вона забезпечує адаптивне, гнучке та інтуїтивно зрозуміле керування навіть за умов неточних, неповних або змінних вхідних даних. Використання двох вхідних змінних абсолютної різниці струмів і відносного коефіцієнта незбалансованості дозволяє контролеру адекватно реагувати на різні режими роботи мережі.

3. Розроблений НЛК демонструє високу ефективність: у понад 77% симуляцій досягається низький рівень незбалансованості та мала різниця струмів, що відповідає вимогам до якості електроенергії. При цьому кількість випадків з великим дисбалансом не перевищує 3,8%, що свідчить про надійність НЛК.

4. Вибір типу ФП впливає на динаміку та точність керування: ТФП трохи швидше збіжність і меншу залежність від максимального ліміту кроків, тоді як ФПГ дають трохи більшу концентрацію результатів у найточнішому діапазоні коефіцієнта незбалансованості. Обидва варіанти є придатними для практичного застосування, а вибір залежить від пріоритетів – швидкості чи точності.

5. Запропонована система автоматизованого балансування фаз з НЛК є ефективною, що робить її перспективною для інтеграції в інтелектуальні системи розподільних мереж (Smart Grid). Вона забезпечує балансування шляхом дискретного перемикання реальних електроприймачів

і може бути легко адаптована під різні кліматичні, технічні та споживчі умови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хілов, В.С. (2021). Теоретичні основи електротехніки: підручник. Національний технічний університет “Дніпровська політехніка.
2. Alhmoud, L., Nawafleh, Q., & Merrji, W. (2021). Three-Phase Feeder Load Balancing Based Optimized Neural Network Using Smart Meters. *Symmetry*, 13(11), 2195. <https://doi.org/10.3390/sym13112195>
3. Cruz-Reyes, J. L., Salcedo-Marcelo, S. S., & Montoya, O. D. (2022). Application of the Hurricane-Based Optimization Algorithm to the Phase-Balancing Problem in Three-Phase Asymmetric Networks. *Computers*, 11(3), 43. <https://doi.org/10.3390/computers11030043>
4. Elaydi, H., & Alqaramani, O. (2023). Grid Load Balancing Using Phase Adapter Via Fuzzy Logic. 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209543>
5. Garces, A., Gil-González, W., Montoya, O. D., Chamorro, H. R., & Alvarado-Barrios, L. (2021). A Mixed-Integer Quadratic Formulation of the Phase-Balancing Problem in Residential Microgrids. *Applied Sciences*, 11(5), 1972. <https://doi.org/10.3390/app11051972>
6. Guo, G., Zhan, X., Wang, J., Liu, Z., Feng, K., Peng, F., Gong, D., Tang, A., Xiang, C., & Wang, Z. (2024). Research on the three-phase load imbalance control of the active distribution network based on the distributed power flow controller. *Frontiers in Energy Research*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1414084>
7. Hao, F., Wang, S., Lin, G., & Wang, D. (2025). Multi-Objective Balancing Method of Three-Phase Load Considering Phase Adjustment Feasibility and Dispersion Degree. 2025 5th International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computing Technology (EECT), 1–5. <https://doi.org/10.1109/EECT64505.2025.10966995>
8. Haq, S. U., Arif, B., Khan, A., & Ahmed, J. (2018). Automatic three phase load balancing system by using fast switching relay in three phase

distribution system. 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPESG.2018.8384514>

9. Hooshmand, R. A., & Soltani, S. (2012). Fuzzy Optimal Phase Balancing of Radial and Meshed Distribution Networks Using BF-PSO Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1), 47–57. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2167991>

10. Ivanov, O., Băiceanu, F.-C., Nemeş, C.-M., Grigoraş, G., Ţuchendria, B.-E., & Gavrilăş, M. (2025). A Multistage Algorithm for Phase Load Balancing in Low-Voltage Electricity Distribution Networks Operated in Asymmetrical Conditions. *Symmetry*, 17(10), 1589. <https://doi.org/10.3390/sym17101589>

11. Jagtap, A., Aware, R., Kumar, N., & Aranke, V. (2022). Load Balancing of Three Phase Four Wire Domestic Load By Using Buck-Boost Converter (SSRN Scholarly Paper No. 4075411). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4075411>

12. Kashem, M. A., & Ganapathy, V. (2002). Three-phase load balancing in distribution systems using index measurement technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(1), 31–40. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(01)00009-6)

13. Khan, A., & Ali, M. (2023). Three-Phase Load Balancing in Distribution Systems Using Load Sharing Technique. *Engineering Proceedings*, 46(1), 18. <https://doi.org/10.3390/engproc2023046018>

14. Kopyakova, V., Niemchenko, K., & Vikhtynska, T. (2022). Using of search methods for effective three-phase feeder load balancing. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 351–352. <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969293>

15. Medina-Gaitán, D. F. A., Roza-Rodriguez, I. D., & Montoya, O. D. (2023). Optimal Phase-Balancing in Three-Phase Distribution Networks Considering Shunt Reactive Power Compensation with Fixed-Step Capacitor Banks. *Sustainability*, 15(1), 366. <https://doi.org/10.3390/su15010366>

16. Montoya, O. D., Grisales-Noreña, L. F., & Rivas-Trujillo, E. (2021). Approximated Mixed-Integer Convex Model for Phase Balancing in Three-Phase Electric Networks. *Computers*, 10(9), 109. <https://doi.org/10.3390/computers10090109>
17. Montoya, O. D., Molina-Cabrera, A., Grisales-Noreña, L. F., Hincapié, R. A., & Granada, M. (2021). Improved Genetic Algorithm for Phase-Balancing in Three-Phase Distribution Networks: A Master-Slave Optimization Approach. *Computation*, 9(6), 67. <https://doi.org/10.3390/computation9060067>
18. Pan, J., Liu, J., Chen, X., & Zhong, K. (2021). Three-phase unbalanced load control based on load–electricity transfer index. *Energy Reports*, 7, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.064>
19. Singh, B., Saxena, A., & Kothari, D. P. (1998). Power factor correction and load balancing in three-phase distribution systems. *Proceedings of IEEE TENCON '98. IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control (Cat. No.98CH36229)*, 2, 479–488 vol.2. <https://doi.org/10.1109/TENCON.1998.798259>
20. Suleiman, A. A., Shobowale, K. O., Ter, K. P., Sunday, Y. S., Otokiti, R., Bonet, M. U., & Maafan, A. M. (2022). Feeder Load Balancing Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network. *Mekatronika*, 4(1), 20–29. <https://doi.org/10.15282/mekatronika.v4i1.7494>
21. Sutaya, I. W., Ariawan, K. U., & Nurhayata, I. G. (2021). The design of automatic three phases load balancing for dynamic electrical installation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1810(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1810/1/012002>
22. Syamsiana, I. N., Hassidiqi, H., Kusuma, W., Novfowan, A. D., Sumari, A. D. W., & Wiharya, C. (2025). Advanced load balancing techniques using MIMO fuzzy logic: A panel distribution case study at state polytechnic of Malang. *MethodsX*, 14, 103197. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103197>
23. Taghipour Boroujeni, S., Mardaneh, M., & Hashemi, Z. (2016). A Dynamic and Heuristic Phase Balancing Method for LV Feeders. *Applied*

Computational Intelligence and Soft Computing, 2016(1), 6928080.
<https://doi.org/10.1155/2016/6928080>

24. Ukil, A., & Siti, W. (2008). Feeder load balancing using fuzzy logic and combinatorial optimization-based implementation. *Electric Power Systems Research*, 78(11), 1922–1932. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.03.020>

25. Weckx, S., & Driesen, J. (2015). Load Balancing With EV Chargers and PV Inverters in Unbalanced Distribution Grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(2), 635–643. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2402834>