

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

АЛЕКСЕЄНКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 665

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження, аналіз та вдосконалення методик визначення втрат  
електроенергії в системах електропостачання.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

---

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр.  
Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело

\_\_\_\_\_ А. О. Алексеєнко

(підпис, ініціали та прізвище здобувачавищої освіти)

Керівник роботи

Пінкін Анатолій Анатолійович

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології

Житомир – 2020

## **АНОТАЦІЯ**

Алексєнко А. О. Дослідження, аналіз та вдосконалення методик визначення втрат електроенергії в системах електропостачання.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Ключові слова: вдосконалення, методика, втрати, електро-енергія, системами, електропостачання.

В кваліфікаційній роботі було розглянуто новий напрямок розв'язання актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності оптимального керування параметрами нормального режиму систем електропостачання критеріальним методом із застосуванням нейронечіткого моделювання в умовах неповноти вихідних даних.

## **SUMMARY**

Alekseenko A. A. Research, analysis and improvement of methods for determining electricity losses in power supply systems.

Qualification work for a master's degree in specialty 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

Keywords: improvement, technique, losses, electric power, systems, power supply. The qualification work considered a new direction of solving the current scientific and applied problem of improving the efficiency of optimal control of the parameters of the normal mode of power supply systems by the criterion method using neurofuzzy modeling in conditions of incomplete source data.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СЕП.....	8
1.1 Причини складності керування режимами сучасних ЕЕС.....	8
1.2 Дослідження та аналіз методів нормування технологічних втрат електроенергії в ЕЕС.....	9
Висновки до першого розділу.....	11
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	12
2.1 Алгоритми розрахунку параметрів НР ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних.....	12
2.1.1 Алгоритми розв’язання задач великої міри складності КП за допомогою методів нейронечіткого моделювання.....	13
2.1.2. Алгоритми розрахунку параметрів базисного режиму критеріальним методом із застосуванням нейрон-нечіткого моделювання.....	15
2.1.3. Алгоритм розрахунку ПЗТВП.....	15
2.2. Ранжування регулюючих пристроїв за коефіцієнтом якості функціонування.....	17
2.2.1. Моделювання коефіцієнта якості функціонування РПН трансформатора.....	19
2.2. Алгоритм визначення параметрів режиму ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних.....	20
Висновки до другого розділу.....	24
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ...	25
3.1. Визначення керуючих впливів.....	26

3.2. Визначення нормативного значення	
технічних втрат електроенергії .....	26
Висновки до третього розділу.....	27
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29
ДОДАТКИ.....	30

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Дослідження та аналіз енергетичних систем показують що їх параметри перебувають у нестабільному стані, що негативно впливає на якість та втрати електроенергії.

Це пов'язано з рядом факторів, які впливають на системи електропостачання від початкової генерації до електроспоживачів включно.

Такими факторами являються:

- негативний вплив генерації нетрадиційних джерел енергії, які підключені до систем електропостачання;
- відсутність можливості керування узгодження їх роботи між собою і впливом змінного, випадкового споживання електроенергії різними споживачами з тривалим, короткочасним, повторно короткочасним режимами роботи.

На даний час керування енергетичними системами електропостачання виконується диспетчерами вручну і автоматичне керування тільки енергетичними об'єктами.

Для цього використовуються автоматизовані системи диспетчерського керування, які працюють на основі отримання і обробки вимірювальної інформації про їх параметри в роботі.

Пріоритетним напрямком по зменшенню втрат електричної енергії повинно бути розробка та впровадження ефективних АСДК для створення відповідних режимів в роботі енергетичних систем.

Ефективність і точність системи визначається відповідністю алгоритмів, математичних моделей, які закладаються в основу їх роботи.

Дослідження і аналіз показують, що при підвищенні ефективності відповідного керування, краще застосовувати одну методологічну базу і використовувати системний підхід на всіх етапах від формування математичної моделі до практичної реалізації відповідних рішень. Також слід відмітити, що

ефективним є використання узагальнених методів теорії подібності а також моделювання походу вирішення даного завдання.

Для розв'язку оптимізаційних завдань і аналізу отриманих результатів краще використовувати критеріальний метод. Цей метод є комплекс прийомів прийомів принципів для отримання наукових і практичних результатів.

Тому дослідження, аналіз та вдосконалення методик визначення втрат електроенергії в системах електропостачання на основі узагальнення алгоритмів рішень і розробки засобів критеріального моделювання для оптимального керування параметрами нормального режиму роботи систем електропостачання являється актуальною.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження полягає у зменшенні втрат потужності в системах електропостачання з регулятором під напругою трансформаторів з урахуванням їх технічного стану.

Відповідно до мети в роботі розв'язуються наступні основні задачі:

- вдосконалення методики визначення керуючих впливів трансформаторами з регуляторами під напругою з урахуванням коефіцієнта якості їх функціонування;

- дослідження та аналіз застосування методів та засобів нейрон - нечіткого моделювання в енергетиці;

- розробка методик розв'язування задач критеріального програмування високої міри складності, а саме задач визначення оптимальних параметрів нормального режиму систем електропостачання;

- дослідження та аналіз діючих методів розрахунку оптимальних параметрів нормального режиму та існуючих методів нормування втрат систем електропостачання;

- розробка методик розв'язування задач визначення керуючих впливів на регулятори під напругою трансформаторів систем електропостачання, з використанням нейро-нечіткого моделювання;

- розробка методики визначення планового значення технічних втрат потужності в трансформаторах, в електричних мережах критеріальним методом з застосуванням нейро-нечіткого моделювання;

**Об'єктом дослідження** кваліфікаційної роботи є нормальні режими систем електропостачання.

**Предметом дослідження** є оперативне керування параметрами режиму систем електропостачання в умовах отримання неповноти вихідних даних.

### **Методи досліджень**

зменшенні втрат потужності в системах електропостачання з регулятором під напругою трансформаторів з урахуванням їх технічного стану вирішуються при допомозі нейро-нечіткого моделювання, критеріальний метод.

### **Перелік публікацій.**

1. Алексеєнко А. О. Дослідження режимів роботи силових трансформаторів. Збірник. Частина 2 с. 26-30. 4 Міжнародна науково-практична конференція «Біоенергетичні системи». 28–29 травня 2020 року Поліський наці. Університет.

2. Алексеєнко А. О., Прядко В. А., Дослідження та аналіз методів визначення витрат та втрат електроенергії. Матеріали науково-практичної конференції «Студенські читання 2020». Житомир: ПНУ, 26 жовтня 2020 р

3. Алексеєнко А. О., Лось Р. В., Прядко В. А., Дослідження та аналіз систем симетрування в мережах електропостачання. Матеріали науково-практичної конференції «Студенські читання 2020». Житомир: ПНУ, 26 жовтня 2020 р.

## **РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СЕП**

### **1.1 Причини складності керування режимами сучасних ЕЕС**

Проаналізувавши сучасний стан енергетики в країні можна зробити висновок, що більшість енергетичного обладнання відпрацювали свій технічний ресурс і морально застаріли [1].

На трансформаторних підстанціях апарати керування, захисту автоматики і оперативно-диспетчерського керування потребують заміни, капітального ремонту. Обладнання підстанції 10-220 кВ на 70 % відпрацювало свій технічний ресурс і потребує в багатьох випадках розвитку систем електропостачання [2].

В електроенергетичних системах, які мають велику протяжність і декілька ступенів трансформації, можна виділити такі основні причини складності керування режимами сучасних систем.

Головні причини складності керування режимами сучасних ЕЕС [2].

1. Процеси виробництва, передачі, споживання електроенергії жорстко обмежений в часі.
2. Масштабність загального виробництва електроенергії.
3. Більшість електрообладнання систем електропостачання морально і фізично застаріло, відпрацювавши по два терміни експлуатації.
4. Відсутність розвитку систем електропостачання.
5. Необхідність впровадження нових засобів керування в систем електропостачання.

Такі причини приводять до необґрунтованих втрат електроенергії, погіршення якості електроенергії, збільшення аварійних ситуацій, збитків в системах електропостачання.

Дослідження та аналіз систем електропостачання дають можливість зробити висновок, що тільки маючи обґрунтовані нормативні втрати можна визначитися з ефективними рішеннями по зменшенню втрат електроенергії.



## 1.2 Дослідження та аналіз методів нормування технологічних втрат електроенергії в ЕЕС

Нормативом називають затрати: фінансових, енергетичних, трудових ресурсів, які необхідні для планування і керування діяльністю підприємств [3]. Нормативи поділяють на два види: поточні та перспективні. На практиці для практичного визначення нормативу використовуються три методи.

### 1. Дослідно виробничий:

Норматив визначається дослідним шляхом;

### 2. Аналітично розрахунковий:

Точні техніко економічні;

Аналіз виробничих умов;

Виявлення резервів економії;

Доступна форма результатів розрахунків.

### 3. Звітно статистичний норматив це норматив, який встановлюється на звітний період.

Дослідження та аналіз методів для нормування втрат електроенергії показав, що найкращим є аналітико-розрахунковий метод.

За розрахунковий період нормативне значення технологічних витрат електроенергії можна розрахувати за формулою

$$\Delta W_{\text{НЗТВЕ}} = \Delta W_{\text{ТР}} + \Delta W_{\text{ВП}} + \Delta W_{\text{ПО}}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta W_{\text{ТР}}$  – сумарні технічні втрати електроенергії в елементах ЕЕС;

$\Delta W_{\text{ВП}}$  – сумарні нормативні витрати електроенергії на власні потреби підстанцій;

$\Delta W_{\text{ПО}}$  – розрахункові витрати електроенергії технологічних витрат електроенергії в електричних на плавлення ожеледі в ЕЕС.

В системах електропостачання, при нормуванні враховуються технічні розрахункові втрати електроенергії в мережах і трансформаторах, які при застосуванні методів оперативних розрахунків обчислюються для інтервалу часу, менше 1 години, а при застосуванні аналітичних методів – для розрахункового місяця.

Користуючись формулою (1.1) технічні розрахункові втрати електроенергії в системах електропостачання визначаються за формулою 1.2 додаток А

В залежності від початкової інформації для визначення нормативного значення навантажувальних втрат електроенергії застосовують наступні методи: характерних режимів, середніх навантажень і дисперсій, домінуючих гармонік, поелементного розрахунку.

Методи характерних режимів, середніх навантажень і дисперсій, використовуються для електричних мереж напругою до 150 кВ. В той же час метод домінуючих гармонік підходить для будь-яких електричних мереж, але для цього потрібно враховувати гармоніки, номери яких перевищують домінуючі. Але дослідження і аналіз показують, що найбільш точне значення нормативу втрат отримують методом поелементного розрахунку.

Аналіз досліджень показав, що із всіх втрат в системах електропостачання найбільш складними для розрахунку і представлення для використання, є технічні з їх навантажувальними складовими. Щоб спростити розрахунки навантажувальних втрат електроенергії пропонуємо користуватися нормативними характеристиками технічних, які відображені в офіційній звітності.

Нормативна характеристика технічних втрат потужності відображається як формула 1.3 додаток А. Формула нормативної характеристики технічних втрат електроенергії представлена у вигляді формули 1.4 додаток А.

Для розрахунків коефіцієнтів нормативної характеристики технічних втрат потужності використовується регресійний аналіз шляхом апроксимації

залежності навантажувальних втрат від впливу факторів квадратичним поліномом.

Щоб визначити нормативні значення втрат електроенергії застосовуються результати розрахунку параметрів НР ЕЕС [3]:

- втрат потужності в усіх елементах схеми заміщення мережі;
- показників напруг в усіх вузлах системи електропостачання;
- розподілу потужностей по всіх ділянках схеми електричної мережі;

Для оперативного контролю і аналізу втрат потужності використовуються комп'ютерні програми [3].

Були проведені дослідження та аналіз основних методів розрахунку усталених режимів ЕЕС [5, 6, 7], які дозволили виявити їх переваги і недоліки при використанні їх для оперативного виявлення втрат потужності.

Градiєнтні методи хоч легко програмуються, але мають обмежену область застосування. Метод Ньютона найчастіше використовується в програмах розрахунку параметрів НР ЕЕС і втрат потужності, характеризується високою чутливістю до першого наближення.

Таким чином для оперативного відслідковування втрат потужності в системах електропостачання краще використовувати програми, які використовують метод Ньютона.

### **Висновки до першого розділу**

Використання методів регресійного аналізу для визначення коефіцієнтів нормативної характеристики технічних втрат потужності дає похибку, яка сягає 5–7% і більше [8].

Для розрахунку планового значення втрат потужності можуть бути використані методи КП. Для задач оптимального керування, для яких характерна невизначеність, зумовлена неповнотою інформації, можливо і доцільно застосовувати методи нейрон нечіткого моделювання.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

При експлуатації систем електропостачання виникають відхилення параметрів і системи від запланованих, що потребує необхідної корекції.

Це зумовлюється неточністю прогнозування навантаження різного роду електроспоживачів, які в значній мірі впливають на діапазон регулювання РПН 34 [10].

Як показує практика, що не завжди всі експлуатаційні обмеження враховуються при плануванні режимів експлуатації.

Технічна забезпеченість систем електропостачання в основному дозволяє диспетчерській службі виконувати зміну режиму аналізуючи дані телеметричних відповідних вимірів ОІК АСДУ. Це можна зробити за рахунок урівнення завантажень окремих генеруючих електростанцій за активною і реактивною потужностями і помінявши коефіцієнти трансформації трансформаторів.

Розглянемо, як розробляються алгоритми розв'язання задач великої міри складності КП 13 [11] і алгоритми розрахунку параметрів базисного режиму ЕЕС критеріальним методом із застосуванням нейрон нечіткого моделювання.

Для трансформаторів, які задіяні в оптимальному керуванні, розробляється модель і алгоритм визначення коефіцієнта якості функціонування РПН трансформатора 14, 15 [12, 13]. Розробляємо алгоритм відновлення даних з застосуванням ННМ і критеріального методу з метою зменшення їх неадекватності 16 [8].

### **2.1 Алгоритми розрахунку параметрів НР ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних**

Дослідження показують, що критеріальний метод дозволяє ефективно розв'язувати нелінійні оптимізаційні задачі, до яких відносяться задача розрахунку ПЗТВП залежно від різних впливових факторів та задача

розрахунку втрат потужності в ЕЕС при оперативному керуванні параметрами НР ЕЕС. Однак цей метод має обмеження щодо задач великої міри складності.

### **2.1.1 Аналіз досліджень алгоритмів розв'язання задач за допомогою методів нейронечіткого моделювання**

Проаналізуємо алгоритм розрахунку параметрів НР ЕЕС. Він залежить від початкових даних, а саме від наявності:

-вибірки значень поточних та прогнозованих параметрів цільової функції, які будуть задовольняти умови оптимальності цієї функції (наприклад, мінімуму сумарних втрат електричної потужності) і одночасно умови надійності обладнання та якості електричної енергії; ретроспективних даних, таких як навантаження у вузлах за попередній період і т. ін.;

-діапазонів варіювання значень змінних цільової функції, таких як напруги на шинах підстанцій, діапазони регулювання РПН, навантажувальна спроможність силових трансформаторів, пропускна спроможність ЛЕП і т. ін.; системи логічних правил у вигляді рекомендацій ПТЕ, ПУЕ, заводських інструкцій, рекомендацій НКРЕ і т. ін., правил, які є узагальненням багаторічного досвіду експлуатації обладнання та управління параметрами НР ЕЕС;

-інформації, яка надана експертами (черговими підстанцій, працівниками служб ізоляції, діагностики, служб підстанцій та служб ліній підприємств магістральних електричних мереж і т. ін.) у вигляді лінгвістичних змінних про стан обладнання та можливості його подальшої участі в керуванні параметрами режиму, про особливості зміни навантажень на різних підстанціях і т. ін.

Розглянемо синтезований метод, в якому для розширення області застосування критеріального методу застосовуються переваги нейронечіткого моделювання. Він може розв'язувати задачі розрахунку параметрів НР в умовах неповноти вихідної інформації. Відповідно до цього розробляються: алгоритм розв'язання задач великої міри складності КП при допомозі критеріїв

подібності у вигляді функцій належності (рис. 2.1); алгоритм розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом шляхом використання нечітких критеріїв подібності (рис. 2.2); алгоритм розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом шляхом використання нечітких множин критеріїв подібності, який базується на застосуванні алгоритму Мамдані (рис. 2.1.) (додаток Б) 18 [14].

Перший алгоритм (рис. 2.1) застосовується, коли відома функція належності поточного значення базисного критерію подібності до множини його оптимальних значень, яка задовольняє обмеження (2.2), відомі значення коефіцієнтів при членах цільової функції і значення степенів аргументів цільової функції.

Переваги першого алгоритму - можливість швидкого визначення значень параметрів функцій належності і простоту визначення базисних критеріїв подібності. Завдяки цьому алгоритм може легко реалізуватись у вигляді програми.

Недолікі цього алгоритму - складність вибору типу функції належності критерію подібності.

Другий алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 2.3, передбачає розрахунок нечіткого базисного критерію подібності. Функції належності, від значень яких залежить нечіткий базисний критерій подібності, визначаються з використанням програмного комплексу MATLAB, а саме ANFIS-редактора і реалізованого в ньому алгоритму нечіткого висновку Сугено, який дозволяє побудувати функції належності по вибірці ретроспективних даних і в разі потреби скоригувати їх параметри.

До переваг другого методу відноситься можливість використання існуючих програмних засобів з метою автоматизації процесу визначення параметрів функції належності.

До недоліків відноситься зростання похибки розрахунків при зменшенні об'єму вибірки початкових даних.

Третій алгоритм використовується тоді, коли є нечітка множина значень базисних критеріїв подібності.

До переваг цього алгоритму відноситься можливість врахування досвіду експертів.

### **2.1.2. Алгоритми розрахунку параметрів базисного режиму критеріальним методом із застосуванням нейрон-нечіткого моделювання**

Застосуємо запропоновані алгоритми розв'язання задач великої складності КП за допомогою методів нейронечіткого моделювання для розрахунку параметрів оптимального режиму систем електропостачання.

За критерій оптимальності приймаємо мінімум втрат активної потужності. Визначаємо значення струмів в гілках, при яких втрати потужності будуть мінімальними і виконуються відповідні обмеження.

Для розрахунку параметрів оптимального режиму критеріальним методом шляхом подання критеріїв подібності у вигляді функцій належності будемо використовувати алгоритм, блок схема якого подана на рис. 2.4.

Цей алгоритм застосовується для розрахунку параметрів нормального режиму системи електропостачання в умовах невизначеності. Головною перевагою цього алгоритму є можливість зменшення допустимої області варіювання базисних критеріїв подібності за допомогою їх подання у вигляді функцій належності 19 [15]. Тобто за допомогою функцій належності звужується область оптимальних значень струмів в гілках, що спрощує їх визначення.

### **2.1.3. Алгоритм розрахунку ПЗТВП**

Складність розрахунку керуючих впливів, вигляд цільової функції для здійснення оптимізаційних розрахунків залежить від вибору критерію оптимальності

В оптимальному керуванні, як критерій оптимальності найчастіше використовується мінімум втрат потужності 22 [16].

Далі проаналізовано критерій оптимальності згідно формули (1.5), який запропоновано в [22, 26] [16, 17], в якому також крім сумарних втрат активної потужності враховуються також показники якості та надійності електропостачання. Пропоную удосконалити цей критерій оптимальності і ввести в нього значення планових втрат потужності:

$$F = \Delta P_{\text{план}} + P(\delta) + P(\omega) + \sum_{i=1}^q \text{Ш}_{Ti}, \quad (2.1)$$

де  $\Delta P_{\text{план}}$  – планові технічні втрати активної потужності в системах постачання.

Тоді оптимальне керування системами електропостачання здійснюватиметься за критерієм оптимальності – ПЗТВП, а не економічним значенням втрат потужності. Це дасть можливість привести до ефективнішого використання наявних РП і зменшити їх інтенсивність роботи.

В цьому варіанті в задачі з квадратичним критерієм оптимальності вектор спостереження  $y(t)$  формується в тому числі зі впливними факторами  $\dot{P}_i(t)$ .

Розробляємо алгоритм, блок-схему (рис. 2.5 додатки) для розрахунку оптимальних значень параметрів режиму за запропонованими критеріями оптимальності. Цей алгоритм призначений для розрахунку коефіцієнтів НХТВП і визначення ПЗТВП. Він застосовується, коли маємо ретроспективні дані (значення впливних факторів і відповідне їм значення втрат потужності) [17], обмеження, які характеризують особливості НР ЕЕС.

Перевагою цього алгоритму є можливість врахування експертної інформації на етапі побудови функцій належності, особливо це актуально у випадках, коли в ретроспективних даних за останній період спостерігається суттєве порушення загальної тенденції їх зміни.



## **2.2. Ранжування регулюючих пристроїв за коефіцієнтом якості функціонування**

Відповідність поточного й оптимального значень критерію оптимальності в системах електропостачання досягається за рахунок інтенсивності роботи РП. Це викликає негативні наслідки, аварії, вихід зладу електрообладнання, тому потрібно розробляти відповідні математичні моделі для надійного керування НР ЕЕС враховуючи терміни експлуатації РП.

Такий підхід дасть можливість доцільніше експлуатувати регульовані трансформатори, що в значній мірі зменшить втрати електроенергії. Оперативний персонал формуючи керуючі впливи буде враховувати технічний стан електрообладнання. Варто відмітити, що на цьому етапі спостерігається нечіткість прийнятих рішень, оскільки нечіткою є інформація щодо стану та залишкового ресурсу окремих регулюючих пристроїв, за допомогою яких здійснюється оптимальне керування.

Нечітким є також визначення впливу окремих РП на параметри оптимального режиму в даний момент часу. Крім того аварійні ситуації в системах електропостачання додатково зменшують енергетичний ресурс, але по-різному залежно від виду і обставин. Тому для більш обґрунтованого прийняття рішень щодо оптимізуючих впливів доцільно використати апарат нейронечіткого моделювання 25 [18].

Слід відмітити, що використовувати нейронечітке моделювання при розв'язанні задач керування ефективніше для складних процесів, коли не існує простої математичної моделі, та для нелінійних процесів великих порядків, коли повинна виконуватися обробка лінгвістично сформульованих експертних знань.

Зміна навантаження, яка визначає режим роботи, тільки частково передбачувана, тому ряд споживачів не дотримуються запланованого, визначеного графіка навантаження. Це показує можливість використання методів нечіткого висновку і нейронечіткого моделювання для вирішення задач оптимального керування НР ЕЕС.

**Основні етапи побудови систем інтелектуального керування на основі нечіткої логіки такі [15]:**

1. Визначення в створюваній системі входів і виходів;
2. Визначення змінних функції належності для кожної з вхідних і вихідних;
3. Розробка бази правил для нечіткої системи, що здійснюється;
4. Вибір алгоритму і реалізація нечіткого логічного висновку;
5. Дослідження та аналіз результатів роботи створеної системи (з'ясування того, наскільки розроблена модель адекватна реальності).

За допомогою системної автоматики і сучасних регістраторів параметрів режиму, таких як Регіна, Рекон та інші, надходить інформація про ретроспективні і поточні значення параметрів режиму системи електропостачання.

При постійному моніторингу параметри силового обладнання систем електропостачання від мікропроцесорних пристроїв інформація про стан цього обладнання і його залишковий ресурс надходить в диспетчерський пункт.

Ця інформація обробляється і приймається рішення про те, яким трансформатором необхідно зробити перемикання. При цьому на прийняття рішення впливає:

- ресурс трансформатора;
- ефективність впливу (місце розташування трансформатора, на якій підстанції в системі електропостачання) на підтримання оптимального режиму;
- кількість перемикань, які потрібно зробити для підтримання оптимального режиму.

Для зменшення кількості перемикань, які пов'язані з режимом роботи, вводиться зона нечутливості. Тому корегування параметрів режиму для зменшення втрат здійснюється дискретно, шляхом зміни коефіцієнта трансформації трансформатора за допомогою РПН трансформатора. Кількість перемикань РПН трансформатора може впливати на його ресурс.

Трансформатора для керування номінальним режимом систем електропостачання, повинно здійснюватися виходячи із слідуючих вимог:

- перемикання необхідно реалізувати найбільш надійним трансформатором, так як пошкодження трансформатора під час перемикань приведе до аварійної ситуації, значних збитків на його ремонт;

- використання надійного трансформатора при регулюванні параметрами НР не завжди забезпечує нормальний режим роботи, так як трансформатор може бути нечутливий в даний момент для підтримання необхідного режиму;

- розрахункова кількість перемикань для підтримання оптимального режиму повинна забезпечувати лише незначне зменшення їх ресурсу.

Для ефективного здійснювати перемикання, і вибору кількості перемикань пропоную використовувати коефіцієнт якості функціонування, який враховує поточне навантаження трансформатора та втрат потужності в системах електропостачання до перемикань РПН саме цього трансформатора, надійнісні характеристики трансформатора (зокрема залишковий ресурс). Перемикання потрібно здійснювати тим трансформатором, у якого коефіцієнт якості функціонування найвищий [12, 13, 19, 20].

При визначенні коефіцієнта ресурсу необхідно враховувати як залишкову кількість перемикань, так і накопичений струм комутації. Розраховані значення коефіцієнтів залишкового ресурсу мають періодично коригуватись незалежними експертами під час перевірки та різних видів ремонтів. Значення коефіцієнтів трансформації залежно від навантаження, а також кількість перемикань РПН дозволяє отримати програмний комплекс АЧП [17]. Результати розрахунку в АЧП дають можливість сформулювати правила, які використовуються для створення бази логічних правил.

### **2.2.1. Моделювання коефіцієнта якості функціонування РПН трансформатора**

Проаналізуємо, як знайти коефіцієнт якості роботи трансформатора залежно від його впливу на втрати в системі електропостачання та його залишкового ресурсу. Коефіцієнт якості роботи трансформатора є комплексним параметром, який враховує можливість трансформатора перетворювати

електроенергію, а також і можливість ефективність впливу на режим системі електропостачання, і розраховуватися за формулою додаток Б

### **2.3. Алгоритм визначення параметрів режиму ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних**

Щоб розрахувати значення напруг у вузлах використовуємо систему вузлових напруг, яку в матричній формі записуємо у вигляді [5]

$$\hat{U} \text{діаг} (\hat{Y}_y \hat{U} + \hat{Y}_b \hat{U}_b) = S^* \quad (2.9)$$

де  $\hat{U}$  діаг – діагональна матриця,  $k$ -й діагональний елемент якої дорівнює спряженому комплексу напруги  $k$ -го вузла;  $\hat{Y}_y$  – комплексна матриця власних і взаємних вузлових провідностей;  $\hat{U}$  – вектор-стовпець вузлових напруг;  $\hat{Y}_b \hat{U}_b$  – вектор-стовпець,  $k$ -й елемент якого дорівнює  $\hat{Y}_b \hat{U}_b$ ;  $S^*$  – вектор-стовпець комплексно-спряжених потужностей в вузлах,  $k$ -й елемент якого дорівнює заданій комплексно-спряженій потужності  $k$ -го вузла;  $U_b$  – задана напруга балансуєчого вузла.

Розв'язати цю систему можна з використанням відомих методів [5], але розв'язання цієї системи рівнянь не маючи всієї повноти вихідних даних ускладнюється. Якщо не враховувати неадекватні дані, то кількість рівнянь системи (2.9) менша, ніж кількість невідомих. Задача стане тривіальною, якщо будуть відновлені дані, яких не вистачає, і кількість рівнянь буде відповідати кількості невідомих.

Для визначення оптимальних параметрів режиму роботи системи електропостачання в умовах такої неповноти вихідних даних пропонується отримані поточні значення початкових даних порівняти з попередньо порахованими значеннями параметрів оптимального режиму. Для цього використовуємо коефіцієнти адекватності поточних значень даних

оптимальним значенням цих даних (наприклад, дані про потужності в вітках і напруги у вузлах):

$$K_{P_{i\_пот.}} = \frac{P_{i\_поточне}}{P_{i\_оптимальне}}; \quad K_{Q_{i\_пот.}} = \frac{Q_{i\_поточне}}{Q_{i\_оптимальне}}, \quad (2.10)$$

де  $P_{i\_поточне}$  і  $Q_{i\_поточне}$  – поточні значення активної і реактивної потужностей навантаження в  $i$ -му вузлі, які отримані по каналах телеметрії;  $P_{i\_оптимальне}$  і  $Q_{i\_оптимальне}$  – значення активної і реактивної потужності навантаження в  $i$ -му вузлі, які відповідають оптимальному режиму системи електропостачання.

Коефіцієнт адекватності результатів розрахунку значень модулів напруг у вузлах розраховуємо за формулою

$$K_{U_i} = \frac{U_{i\_поточне}}{U_{i\_оптимальне}}, \quad (2.11)$$

де  $U_{i\_поточне}$  – напруги в вузлах, пораховані за поточними значеннями активної і реактивної потужності навантаження в  $i$ -му вузлі;  $U_{i\_оптимальне}$  – напруги в вузлах, пораховані за значеннями активної і реактивної потужностей навантаження в  $i$ -му вузлі, які відповідають оптимальному режиму системи електропостачання.

Коефіцієнт адекватності результатів розрахунку значень сумарних втрат активної потужності розраховуємо за формулою

$$K_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{i\_поточне}}{\Delta P_{i\_оптимальне}}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta P_{i\_поточне}$  – сумарні втрати активної потужності, порашовані за поточними даними;  $\Delta P_{i\_оптимальне}$  – сумарні втрати активної потужності, порашовані за даними, які відповідають оптимальному режиму.

Для визначення оптимальних параметрів режиму системи електропостачання в умовах неповноти вихідних даних з використанням відновлених даних можна застосовувати такий алгоритм:

1. Визначити коефіцієнти адекватності за формулами (2.10)–(2.12).
2. Якщо значення  $K$  дорівнює 1 або відхиляється від 1 не більше, ніж на 5 %, то дані вважаємо адекватними, інакше – потрібно буде перевірити чутливість РПН та втрат активної потужності до можливих змін відсутніх або неадекватних параметрів в системі електропостачання.
3. Перевірити чутливість пристроїв регулювання, чутливість результатів розрахунку втрат потужності і кількості перемикачів до зміни параметрів режиму системи електропостачання. Якщо чутливість не перевищує зону нечутливості, яка залежить від похибок трансформаторів струму і напруги, засобів вимірювань, каналів передачі даних, від ступені регулювання коефіцієнтів трансформації, то відновлювати неадекватні або відсутні дані не потрібно; якщо чутливість перевищує зону нечутливості, то неадекватні або відсутні дані потрібно відновити;
4. У разі неадекватності початкових даних відновити їх за алгоритмом нечіткого моделювання Сугено.
5. Розрахувати параметри НР за відновленими даними.
6. Сформулювати керуючі впливи з врахуванням зони нечутливості регульовальних пристроїв та вимог показників якості електроенергії.

При відхиленнях поточних даних від реальних в окремих вузлах на 6–7%, значення сумарних втрат активної потужності будуть відрізнятися близько 2 %.

Для відновлення значень параметрів режиму системи електропостачання доцільно використати такі математичні методи, як авторегресія, узагальнене експоненціальне згладжування, факторний аналіз. Причому для прогнозування

значень потужностей навантаження можуть бути використані або моделі часових рядів, або регресійні моделі, що відображають взаємозв'язок чинників із зовнішніми збурюючими параметрами системи електропостачання [10].

Але існують інші підходи до відновлення значень електричного навантаження. Проте, не дивлячись на різноманіття існуючих методів, які можна використати для відновлення значень параметрів режиму систем електропостачання, точне моделювання є неможливим через нелінійні і складні зв'язки між параметрами режиму і чинниками, від яких він залежить. Ці моделі не враховують інформацію, пов'язану з погодою, і намагаються відновити значення навантаження в вузлі, використовуючи попередні значення [10].

Перспективним в цьому напрямку є використання нейронних мереж. Ці системи можуть використовувати заздалегідь відому інформацію, навчатися, набувати нових знань, прогнозувати часові ряди, виконувати класифікацію образів і окрім цього вони є цілком наочними для користувача.

1. На основі відомих параметрів режиму за характерні пори року, місяці і дні тижня формується база даних за останні роки.

2. На основі бази даних навчається мережа, яка дозволяє встановити зв'язок між збалансованими потужностями по шинах підстанцій, за часом доби, характерними днями тижня, місяцями пори року. Побудована за допомогою ANFIS редактора в середовищі MATLAB математична модель невідомих потужностей в вузлах, яка є системою логічних правил – предикатів дозволяє дослідити зміну потужності навантаження в вузлах, з пошкодженими пристроями телеметрії, від навантажень в інших вузлах залежно від пори року, дня тижня та інших параметрів.

3. Ця система рівнянь оптимізується генеруванням системи за методом субкластеризації, після чого маловпливові предикати виключаються із системи рівнянь в результаті використаного гібридного методу, який поєднує метод зворотного розповсюдження похибки з методом найменших квадратів.

4. Отримана математична модель розглядається і коригується представниками служб оперативно-диспетчерського управління, групою

розрахунків режимів з метою урахування особливостей зміни навантажень в контрольованих вузлах в останній час.

5. Після чого скорегована модель перевіряється на тестовій і контрольній виборці. Визначається середньоквадратична похибка навчання мережі за тестовими і контрольними даними.

### **Висновки до другого розділу**

1. Для розв'язання задач оптимального керування параметрами режимів систем електропостачання необхідно на етапі створення алгоритмів визначення оптимальних параметрів НР, використовувати системний підхід з урахуванням законів оптимального керування. В цьому випадку можна досягти зменшення загальних втрат електроенергії.

2. Розроблено алгоритм розв'язання задач великої міри складності методом критеріїв подібності, як функцій належності, що дозволяє визначити базисні критерії подібності в умовах неповноти вихідних даних

3. Розроблено алгоритми розв'язання задач великої міри складності з використанням нечітких критеріїв подібності, які на відміну від існуючих дозволяють враховувати ретроспективні дані параметрів систем електропостачання в умовах неповноти початкових даних для визначення критеріїв подібності оптимальних режимів систем електропостачання.

4. Розроблено алгоритм визначення параметрів систем електропостачання в умовах неповноти вихідних даних з використанням критеріїв подібності, шляхом відновлення значень потужностей навантаження в вузлах засобами нейронечіткого моделювання.

5. Вдосконалено метод розрахунку оптимальних керуючих впливів на трансформатори з РПН шляхом уточнення коефіцієнта якості функціонування РПН в залежності від планового значення втрат потужності, фактичного залишкового ресурсу РПН, від ступеня впливу на втрати потужності.



### **РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Система оперативного керування організується як автоматизована розподільна ієрархічна система, на кожному рівні якої розв'язується обов'язковий базовий склад задач.

Це гарантує виконання головних функцій управління даного рівня і виконує інформаційне забезпечення вищих рівнів.

Система оперативного контролю і керування режимом повинна виконувати такі функції :

- інформаційне відображення на щитах диспетчера і робочому місці чергового підстанції
- виконання архівування електричних параметрів режиму роботи системи;
- про параметри режиму в реальному часі формування бази даних;
- виконання інформаційних диспетчерських задач;
- оцінку стану системи під час процесу передачі електроенергії.

До основних критеріїв якості автоматизованої системи керування в електроенергетиці належать :

- інформативність, основними компонентами якої є: час реакції системи, ефективність технології подання диспетчеру підстанції даних про режим;
- надійність інформаційної системи електропостачання.

Таку систему можна застосовувати при розв'язанні задач керування в умовах неадекватності початкових даних та в умовах використання як регулювальних пристроїв силових трансформаторів з РПН, що особливо актуально для трансформаторів, термін експлуатації яких наближається до граничного (паспортного).

На ефективність оптимального керування систем електропостачання впливає правильність вибору трансформаторів з РПН і використання їх у відповідності до їх технічного стану і регулювальної здатності, тому в цьому розділі наведений розрахунок коефіцієнта якості функціонування РПН.

На основі розроблених математичних моделей визначення планових технічних втрат потужності розроблені алгоритми і програми. Ефективність застосування запропонованих методів, моделей і алгоритмів показана на прикладі розрахунку планового значення технічних втрат потужності і коефіцієнта якості функціонування для схеми на 14 вузлів і фрагменту систем електропостачання

### **3.1. Визначення керуючих впливів**

З метою перевірки ефективності розробленого методу визначення законів оптимального керування системами електропостачання з врахуванням коефіцієнта якості функціонування розраховуємо коефіцієнти трансформації трансформаторів та коефіцієнти якості функціонування для регульованих трансформаторів з РПН за методикою, викладеною в третьому розділі.

Як приклад для наглядності отримання результатів розрахунків будемо використовувати тестову схему системи електропостачання 220-110 кВ IEEE на 14 вузлів, 16 віток і 3 трансформатори зв'язку, яка наводиться в додатках (рис. 3.1). Щоб спростити розрахунки при допомозі ГРАФСКАНЕР схему еквівалентуємо і привелась до вигляду (рис. 3.2 (б)) (додаток В).

За базисний приймаємо перший вузол. Трансформатори 4–7 і 4–9 виносимо в хорди. Трансформатор 5–6 залишається в дереві графа. При допомозі методики визначення керуючих впливів з врахуванням взаємних перетоків, розраховуємо коефіцієнти трансформації, при яких втрати будуть найменші.

Згідно з розробленим методом послідовність визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації і коефіцієнтів якості функціонування буде складається з слідуючих етапів, які приводяться в (додатках В)

### **3.2. Визначення нормативного значення технічних втрат електроенергії**

Для перевірки розроблених методів розв'язання задач великої міри складності (в умовах неповноти початкових даних) і методів розрахунку ПЗТВП розрахуємо нормативну характеристику технічних втрат для мережі напругою

220-110 кВ схеми IEEE на 14 вузлів і фрагмента мережі ПЗЕС напругою 35-110 кВ. Розрахунки і схема наводяться в додатках [21].

При порівнянні розрахованого нормативного значення технічних втрат електроенергії і технічних втрат потужності було виявлено, що технічні втрати електроенергії перевищують нормативні. Тому для зменшення втрат електроенергії потрібно реалізувати керуючі впливи, розраховані і тоді технічні втрати потужності не будуть перевищувати нормативні.

### **Висновки до третього розділу**

1. Розроблено програмне забезпечення мікропроцесорного пристрою оперативного діагностування РПН, яке дозволяє створити спеціалізовану базу результатів вимірювань часових характеристик РПН, швидко обробляти кожне вимірювання і здійснювати ретроспективний аналіз результатів вимірювань по кожному РПН для визначення та уточнення його показників ресурсу та надійності.

2. Вдосконалена програма зчитування даних з пристрою оперативного діагностування РПН, формування бази даних та аналізу їх щодо визначення можливості участі трансформатора з РПН в оптимальному керуванні режимами систем електропостачання.

3. Роботоздатність розробленої програми розрахунку ПЗТВП і коефіцієнта якості функціонування РПН трансформаторів підтверджена практичним розрахунком значення втрат електроенергії для тестової схеми IEEE і фрагмента мережі напругою 35-110 кВ ПЗЕС. Використання розробленого методу і програмного забезпечення для розрахунку планового значення технічних втрат потужності дасть змогу зменшити відносну похибку визначення планового значення технічних втрат потужності в порівняно з традиційними методами.

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі було проведено дослідження та аналіз вдосконалення методик визначення втрат електроенергії в системах електропостачання.

Виявлено, що використання методів регресійного аналізу для визначення коефіцієнтів нормативної характеристики технічних втрат потужності дає похибку 5–7% і більше [8].

Для розрахунку планового значення втрат потужності можуть бути використані методи КП. Для задач оптимального керування, для яких характерна невизначеність, зумовлена неповнотою інформації, можливо і доцільно застосовувати методи нейрон нечіткого моделювання.

Розроблено алгоритми розв'язання задач великої міри складності з використанням нечітких критеріїв подібності.

Вдосконалено метод розрахунку оптимальних керуючих впливів на трансформатори з РПН шляхом уточнення коефіцієнта якості функціонування РПН.

Розроблено програмне забезпечення мікропроцесорного пристрою оперативного діагностування РПН, яке дозволяє створити спеціалізовану базу результатів вимірювань часових характеристик РПН.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воробьев В. А. Электрификация сельскохозяйственного производства. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с. . ГОСТ 1516.3 -96. Межгосударственный стандарт.
2. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М: Издательство стандартов, 1998.
3. Ермолаев С.О. Проектування систем електропостачання в АПК – М.. Люкс, 1990 – 482с.
4. Методичні настанови та завдання до курсового проекту з дисципліни «Енергозабезпечення та електропостачання сільського господарства» для студентів спеціальності 6.091.900 «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/ Укл. Ю. О. Варецький. – Львів: Видавництво Львівського державного аграрного університету, 2004. – 32 с.
5. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений в энергетику: ГКД - 340000002-97. – К. : Минэнерго Украины, 1997. – 103 с.
6. Прядко В. А. Конспект лекцій з дисципліни "Монтаж енергообладнання та засобів автоматизації". - Житомир: "ЖНАЕУ ", 2019. - 127 с.
7. Терешкевич Л. Б. АСУ режимами систем електропостачання. Навчальний посібник / Вінниця:ВДТУ, 1998. – 119 с.
8. Методичні настанови та завдання до курсового проекту з дисципліни «Енергозабезпечення та електропостачання сільського господарства» для студентів спеціальності 6.091.900 «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/ Укл. Ю. О. Варецький. – Львів: Видавництво Львівського державного аграрного університету, 2004. – 32 с.
9. Шкрабець. Ф. П. Основи електропостачання / Ф. П. Шкрабець. Навчальний посібник. – Д, 2012. 463.