

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко**

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ  
НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ  
КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ  
З ЗАСТОСУВАННЯМ  
НЕЙРОНЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2012

УДК 621. 316.11  
ББК 31.279  
Л 40

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 4 від 24.11.2011 р.)

Рецензенти:

**Ю. О. Варецький**, доктор технічних наук, професор;

**В. М. Кутін**, доктор технічних наук, професор

**Лежнюк, П. Д.**

Л 40      Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко. – Вінниця, ВНТУ, 2012. – 136 с.

ISBN 978–966–641–468-0

У монографії наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності оптимального керування параметрами нормального режиму ЕЕС критеріальним методом із застосуванням нейронечіткого моделювання в умовах неповноти вихідних даних, що полягає у вдосконаленні математичних моделей та методів визначення планового значення технічних втрат потужності і коефіцієнта якості функціонування РПН-трансформаторів. Монографія розрахована на інженерно-технічних працівників енергопостачальних компаній, а також може бути корисною студентам і аспірантам.

**УДК 621. 311**  
**ББК 31.279**

**ISBN 978-966-641-468-0**

© П. Лежнюк, О. Рубаненко, 2012

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЕС .....	11
1.1. Проблеми керування режимами ЕЕС в сучасних умовах .....	12
1.2. Аналіз методів нормування технологічних втрат електроенергії в ЕЕС.....	13
1.3. Застосування критеріального методу в оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС .....	19
1.4. Аналіз видів невизначеності інформації, характерних для процесу керування ЕЕС .....	22
1.5. Аналіз застосування методів нечіткого моделювання в електроенергетиці .....	26
1.6. Висновки та задачі подальших досліджень.....	30
РОЗДІЛ 2. КРИТЕРІАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН.....	31
2.1. Формування задачі оптимального керування НР ЕЕС в умовах невизначеності.....	31
2.1.1. Критеріальне програмування для розв'язання задач оптимального керування режимами ЕЕС .....	32
2.1.2. Розв'язання задач великої міри складності КП за допомогою методів нейронечіткого моделювання .....	40
2.1.2.1. Подання критеріїв подібності у вигляді функції належності.....	40
2.1.2.2. Розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом з допомогою нечітких критеріїв подібності .....	43
2.1.2.3. Розв'язання задач великої міри складності поданням критеріїв подібності у вигляді нечітких множин.....	44

2.2. Розрахунок оптимального базисного режиму і визначення критеріїв подібності з застосуванням нейронечіткого моделювання.	45
2.3. Розрахунок нормативної характеристики технічних втрат .....	48
2.3.1. Математичне моделювання нормативної характеристики технічних втрат.....	49
2.3.1.1. Спрощена модель нормативної характеристики технічних втрат.....	49
2.3.1.2. Модель нормативної характеристики технічних втрат з врахуванням взаємовпливу впливних факторів .....	56
2.3.2. Модель нормативної характеристики технічних втрат з врахуванням коефіцієнта конфігурації схеми .....	60
2.4. Висновки .....	61
<b>РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС В УМОВАХ НЕПОВНОТИ ВИХІДНИХ ДАНИХ З ВРАХУВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РПН ТРАНСФОРМАТОРІВ.....</b>	
3.1. Алгоритми розрахунку параметрів НР ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних .....	64
3.1.1. Алгоритми розв'язання задач великої міри складності КП за допомогою методів нейронечіткого моделювання.....	64
3.1.2. Алгоритми розрахунку параметрів базисного режиму критеріальним методом із застосуванням нейронечіткого моделювання.....	68
3.1.3. Алгоритм розрахунку ПЗТВП .....	69
3.2. Ранжування регулюючих пристроїв за коефіцієнтом якості функціонування .....	72
3.2.1. Трансформатори з РПН в оптимальному керуванні режимами ЕЕС.....	72
3.2.2. Моделювання коефіцієнта якості функціонування РПН трансформатора .....	75

3.2.3. Визначення коефіцієнта ресурсу РПН трансформатора з використанням засобів нейронечіткого моделювання .....	77
3.3. Алгоритм визначення параметрів режиму ЕЕС в умовах неповноти вихідних даних .....	78
3.4. Висновки .....	83
4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС .....	84
4.1. Програмно-апаратний комплекс АСК ЕЕС .....	85
4.2. Пристрій діагностування РПН .....	89
4.3. Визначення керуючих впливів критеріальним методом з урахуванням коефіцієнта якості функціонування РП .....	92
4.4. Визначення нормативного значення технічних втрат електроенергії .....	99
4.5. Висновки .....	107
ПІДСУМКИ .....	108
Додаток А. Адаптивний програмно-апаратний комплекс АСК ЕЕС .....	110
Додаток Б. Передня і задня панель приладу, схеми випробувань пристрою оперативного діагностування РПН трансформатора і результати експериментальних досліджень .....	118
Додаток В. Фрагмент вибірок початкових даних для навчання мережі .....	120
ЛІТЕРАТУРА .....	124

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСДК – автоматизована система диспетчерського керування;
- АРМ ЧП – автоматизоване робоче місце чергового підстанції;
- АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;
- АСК П – автоматизована система керування підприємством;
- ЕЕС – електроенергетична система;
- е.р.с. – електрорушійна сила;
- КП – критеріальне програмування;
- ЛЕП – лінія електропередач;
- ЛМЗ – лінія міжсистемного зв'язку;
- НР – нормальний режим;
- ПЗТВП – планове значення технічних втрат потужності;
- НХТВП – нормативна характеристика технічних втрат потужності;
- РП – регулюючий пристрій;
- РПН – регулятор під напругою;
- ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inteference System (Адаптивна Система нейронечіткого висновку).

## ВСТУП

Процес виробництва та передавання електроенергії є динамічним і постійно знаходиться під збурювальними впливами. Тому надійне і якісне його функціонування потребує автоматизованого, а краще автоматичного керування. Такі його особливості, як однаковість в кожний момент часу генерованої і випадково змінюваної потрібної потужності навантаження, висока швидкість електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів, зумовили розвиток технічних засобів автоматичного керування ще в початковий період становлення електроенергетики. На сучасному етапі здійснюється автоматичне керування окремими електроенергетичними об'єктами і взаємодіючими їх сукупностями. Керування процесом виробництва і передачі електроенергії в цілому в Україні поки що здійснюється за участі оперативного втручання людини – диспетчера електроенергетичної системи (ЕЕС). Воно реалізовується автоматизованою системою диспетчерського керування (АСДК) [1–3]. Автоматичне керування здійснюється на основі обробки інформації про їх властивості, стани і режими роботи, характеризується вимірюваними параметрами (вектором спостережень) та адаптованими до подальшої обробки параметрами стану контрольованого режиму ЕЕС (вектором станів).

В наш час відбувається заміна існуючої багато років структури енергетичної галузі та перехід на інший рівень функціонування, пов'язаний з інтелектуалізацією ЕЕС [4, 5]. Це викликало нові та загострило існуючі проблеми транспортування та розподілу електроенергії. Існуючі тенденції привели не лише до розвитку і ускладнення структури електричних мереж, а й обумовили їхнє перетворення в єдину технологічну систему із забезпечення транспортування та необхідних перетворень параметрів електроенергії. Електричні мережі набули характерних рис штучних систем кібернетичного типу. Їх особливостями стали постійна зміна в певних межах їх існування, складність внутрішніх і зовнішніх зв'язків, наявність адаптивних властивостей, нарощування SMART-технології та ін.

Властивістю сучасних ЕЕС, яка ускладнює процес керування і значно зменшує ефективність керувальних впливів, є зростання частки обладнання, яке відпрацювало нормативний термін. В разі необхідності продовження його експлуатації актуальною стає проблема

визначення поточного стану та залишкового ресурсу. В багатьох країнах світу, а серед них і в Україні, частка обладнання, яке відпрацювало свій паспортний ресурс, перевищила половину [6]. Тому ознакою сьогодні є підвищення вимог із забезпечення безпечної і безаварійної експлуатації такого обладнання. Це викликано спадом темпів створення нового обладнання, зростанням потужності енергооб'єктів і підсиленням конкуренції між енергокомпаніями, викликані переходом до ринку електроенергії.

До інших факторів, які ускладнюють керування нормальними режимами ЕЕС, відносяться: великі масштаби загального виробництва електроенергії джерелами (в тому числі альтернативними), розподіленими на значних територіях, але об'єднаними спільним режимом та оперативним керуванням; жорсткий взаємозв'язок у часі процесу виробництва, транспортування та споживання електроенергії; необхідність впровадження нових засобів керування та інші. Для цих умов були розроблені і отримали широке розповсюдження традиційні методи розрахунку і оптимізації нормальних режимів (НР) ЕЕС, але в сучасних умовах існує загальна потреба в розробці нових методів оптимізації режимів ЕЕС. Значний вклад у вирішення цієї задачі внесли вчені Інституту електродинаміки НАН України, Національного університету «Львівська політехніка», Національного технічного університету «Київська політехніка», ДП «ДонОРГРЕС», Московського енергетичного інституту (технічний університет) та інші.

В задачах оптимального керування важливу роль відіграє оцінювання стану ЕЕС. Актуальність цієї задачі підтверджується багатьма публікаціями. Це зумовлено тим, що через похибки вимірювань та дефіцит контрольованих параметрів режиму ЕЕС [6, 7] система рівнянь розрахунку параметрів режиму може бути недовизначена і тому може мати множину розв'язків. В такому випадку задача розрахунку параметрів режиму розглядається як оптимізаційна. Реалізувати режим, оптимальний з точки зору традиційної постановки задачі, в сучасній ЕЕС неможливо, оскільки спостерігаються значні варіації параметрів. Існують похибки в телевимірюваннях, фіксуються дані із значними похибками, виникають випадкові похибки, з'являються неспостережені райони. За таких умов виникає задача дорухування потрібних даних. Основним елементом організаційної задачі підвищення якості розрахунку оптимальних параметрів нормального режиму є за-



безпечення безперервного надходження необхідної для розрахунків інформації.

Перспективним напрямком зменшення втрат електроенергії є впровадження сучасних автоматичних і автоматизованих систем керування ЕЕС з метою забезпечення оптимальних режимів її роботи. Ефективність їх роботи визначається точністю, адекватністю математичних моделей і алгоритмів, закладених в основу їх роботи. Математичні моделі процесу автоматизації оптимального управління динамічними системами загалом характеризуються частковими підходами. Відтворення повної картини модельованого явища дозволяє досягти достатньої узагальненості результатів досліджень і поширити останні на низку подібних явищ.

Для підвищення ефективності оптимального керування доцільно використовувати одну методологічну базу і системний підхід на всіх етапах розв'язку задач оптимального керування ЕЕС, починаючи з формування математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією оптимальних рішень. Достатньо продуктивним в цьому плані є використання узагальнюючих методів теорії подібності і моделювання на всіх рівнях вирішення цієї проблеми. Добре пристосованим для розв'язку оптимізаційних задач і аналізу отриманих результатів є критеріальний метод, як комплекс прийомів і принципів для отримання наукових і практичних результатів. Але поки що залишається не повністю вирішеною проблема оптимального керування з використанням теорії подібності та її методів, зокрема критеріального методу в умовах неповноти вихідних даних [8, 9]. Це пов'язано з тим, що розв'язання задач великої міри складності, до яких відноситься задача оптимального керування НР ЕЕС, потребує значної кількості високо-точної інформації, яка не завжди є. Також виникає проблема забезпечення потрібної точності в умовах неповноти даних на етапі розв'язку критеріальним методом задач керування, з урахуванням реального технічного стану і можливостей регулюючих пристроїв (РП) [10–16]. Тому необхідно детально проаналізувати аспекти цієї проблеми, узагальнити алгоритми рішення і розробити засоби критеріального моделювання для оптимального керування параметрами нормального режиму.

Критеріальне програмування (КП) становить частину критеріального методу. Оскільки КП використовується при розв'язуванні широ-

кого кола складних задач оптимального керування НР ЕЕС, то в окремих випадках воно потребує подальшого удосконалення, зокрема шляхом поєднання КП з методами нейронечіткого моделювання.

Книга складається з чотирьох розділів. У *першому розділі* досліджуються можливі джерела невизначеності вихідних даних для розрахунку керуючих впливів і їх вплив на процес оптимального керування параметрами НР ЕЕС. Аналізуються як результати застосування методів нечіткого моделювання з метою покращення якості алгоритмів керування параметрів НР, так і можливості застосування критеріального методу для розрахунку параметрів НР. Розглядаються проблеми керування режимами ЕЕС та методи нормування втрат електроенергії.

У *другому розділі* запропоновано алгоритм визначення оптимальних керуючих впливів на режим ЕЕС в умовах неадекватної інформації, який дозволяє отримувати надійні розв'язки в широкому діапазоні зміни коефіцієнтів вихідної математичної моделі. У *третьому розділі* розроблено алгоритми розв'язання задач великої міри складності КП і алгоритми розрахунку параметрів базисного режиму ЕЕС критеріальним методом із застосуванням нейронечіткого моделювання. Для ранжування трансформаторів, які приймають участь в оптимальному керуванні з врахуванням їх технічного стану і впливу на втрати потужності, розроблено модель і алгоритм визначення коефіцієнта якості функціонування РПН трансформатора. Також в цьому розділі розроблено алгоритм відновлення даних з застосуванням ННМ і критеріального методу з метою зменшення їх неадекватності. У *четвертому розділі* на прикладі реальних ЕЕС показана працездатність, ефективність і адекватність алгоритмів, запропонованих у попередніх розділах. Відповідно до розроблених в попередніх розділах математичних моделей визначення планового значення технічних втрат потужності розроблені алгоритми і програми. Ефективність використання запропонованих методів, моделей і алгоритмів показана на прикладі розрахунку ПЗТВП і коефіцієнта якості функціонування для схеми ІЕЕЕ на 14 вузлів і фрагмента мережі ПЗЕС.

## **1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЕС**

В наш час керування параметрами НР ЕЕС здійснюється з метою безпечної і надійної експлуатації обладнання, забезпечення нормативних показників якості електроенергії та з метою досягнення оптимальних економічних показників роботи як окремого обладнання, так і електроенергетичного підприємства в цілому. Однак проблеми такого керування полягають в необхідності використання застарілого, але вартісного обладнання, паспортний ресурс якого давно вичерпаний, в недостатньому оснащенні електричних мереж сучасними приладами контролю параметрів НР та параметрів стану обладнання в темпі процесу, у відсутності методів і математичних моделей, які б більш точно враховували поточний стан електричного обладнання та параметри НР з метою більш ефективного керування ними, поєднуючи як організаційні, так і технічні заходи [4–7].

Організаційні заходи передбачають нормування втрат електроенергії [17] як одного з показників, який характеризує технічну й економічну сторону функціонування ЕЕС. Впровадження дієвих заходів з наближення до значення нормативу втрат спонукає підприємство до зменшення різниці між фактичними втратами і цим показником за рахунок оптимального керування параметрами НР, використання засобів автоматичного або автоматизованого керування цими параметрами, засобів контролю параметрів режиму та обліку електроенергії, оптимізації алгоритмів керування параметрами НР та математичних методів і моделей, покладених в їх основу, і т. ін. [17, 18]. Недостатньо обґрунтоване або неточне визначення нормованого значення втрат призводить до неефективного використання існуючих засобів керування, до невиправданих витрат, пов'язаних з неправильного використанням як нового, так і існуючого електричного обладнання під час керування параметрами НР. Тому актуальним є аналіз існуючих методів нормування втрат електроенергії [17, 18].

Оптимізація алгоритмів оптимального керування параметрами режимів передбачає вдосконалення покладених в їх основу методів і математичних моделей. З метою їх вдосконалення можна використати методи теорії подібності, зокрема критеріальний метод, який пристосований до пошуку оптимальних рішень та аналізу їх на чутливість до

зміни експлуатаційних умов [19–26]. Однак, щодо критеріального методу, то якість результатів, отриманих з його застосуванням, погіршується в умовах невизначеності вихідних даних.

Тому в цьому розділі досліджуються можливі джерела невизначеності вихідних даних для розрахунку керуючих впливів і їх вплив на процес оптимального керування параметрами НР ЕЕС. Аналізуються як результати застосування методів нечіткого моделювання з метою покращення якості алгоритмів керування параметрів НР, так і можливості застосування критеріального методу для розрахунку параметрів НР. Розглядаються проблеми керування режимами ЕЕС та методи нормування втрат електроенергії.

### **1.1. Проблеми керування режимами ЕЕС в сучасних умовах**

Головні причини складності керування режимами сучасних ЕЕС подані на рис. 1.1. [4–7].

В електроенергетиці України більше 60 % енергоблоків теплових електростанцій, 40 % повітряних ліній, 70 % трансформаторних підстанцій вичерпали свій граничний технічний ресурс, не менше 60 % засобів релейного захисту і автоматики також відпрацювали нормативні терміни, системи телемеханіки і зв'язку, що в переважній більшості є аналоговим, морально та фізично застаріли [4]. На багатьох ПС (підстанціях) комутаційні апарати, системи релейного захисту, протиаварійної автоматики і оперативно-диспетчерського керування потребують заміни або капітального ремонту. Обладнання підстанції 220–750 кВ на 68 % відпрацювало свій паспортний ресурс [7].

В сучасних ЕЕС, які характеризуються великою протяжністю і наявністю декількох ступенів трансформації, можна виділити такі основні засоби оптимізації режиму:

- регулювання напруг трансформаторів і автотрансформаторів;
- регулювання навантаження компенсуювальних пристроїв, які генерують або споживають реактивну потужність;
- встановлення установок поздовжньої компенсації;
- комбіноване використання пристроїв різних типів та інші.



Рисунок 1.1 – Причини, що ускладнюють керування режимами сучасних ЕЕС

Втрати, які обумовлені неоптимальними режимами роботи ЕЕС, похибками системи обліку електроенергії, відмовами обладнання, недоліками енергозбуту та іншими причинами, відносяться до прямих збитків енергопостачальних компаній і повинні знижуватись. Тому встановлення обґрунтованих значень нормативів втрат електроенергії дасть змогу вибрати оптимальні шляхи зниження понаднормативних втрат.

## 1.2. Аналіз методів нормування технологічних втрат електроенергії в ЕЕС

В загальному вигляді під нормативом розуміють розрахункові затрати матеріальних ресурсів, які застосовуються для планування і керування господарською діяльністю підприємств [17]. Нормативи поділяють на перспективні і поточні. Для практичного визначення нормативу використовуються три методи наведені на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Методи визначення нормативу і їх особливості

Для нормування втрат електроенергії найкраще себе зарекомендував аналітико-розрахунковий метод, як найбільш прогресивний і науково-обґрунтований.

Нормуванням втрат електроенергії займалися такі провідні вчені, як Ю. С. Железко, В. Е. Воротницький, О. В. Данилюк, О. А. Потребич та інші. Ю. С. Железко нормування втрат електроенергії визначає як встановлення задовільного за економічними критеріями рівня втрат електроенергії, який враховується в тарифах на електроенергію [17]. За В. Е. Воротницьким, норматив втрат електроенергії в електричних мережах – це економічно обґрунтовані і документально підтверджені технологічні витрати електроенергії під час її транспортування, що відносяться до ресурсів, які обкладаються податком і направлені на отримання доходу енергопостачальною організацією [18].

З метою підвищення точності визначення нормативу втрат електроенергії в електричних мережах він повинен бути розділений на чотири рівня напруги: ВН (110–750 кВ); СН1 (35 кВ); СН2 (20–1 кВ); НН (0,38 кВ і нижче). Точність визначення нормативу втрат впливає на точність оцінки понаднормативних втрат і відповідно на ефективність заходів щодо їх зниження [18].

Нормативне значення технологічних витрат електроенергії за розрахунковий період розраховується за виразом

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

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 на плавлення ожеледі в ЕЕС.

При нормуванні технологічних витрат електроенергії в магістральних та міждержавних електричних мережах враховуються технічні розрахункові втрати електроенергії в ЛЕП і трансформаторах, які при застосуванні методів оперативних розрахунків обчислюються для інтервалу часу, менше 1 години, а при застосуванні аналітичних методів – для розрахункового місяця.

У виразі (1.1) технічні розрахункові втрати електроенергії в елементах магістральних і міждержавних електричних мереж визначаються за виразом:

$$\Delta W_{\text{ТР}} = \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{ЛЕП}i} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{Тр}zi} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{Тр}пi} + \sum_{i=1}^k \Delta W_{\text{Ін}i} ,$$

де  $\Delta W_{\text{ЛЕП}i}$  – сумарні змінні розрахункові втрати електроенергії в ЛЕП  $i$ -го ступеня напруги;  $\Delta W_{\text{Тр}zi}$  – сумарні змінні розрахункові втрати електроенергії в трансформаторах  $i$ -го ступеня напруги;  $\Delta W_{\text{Тр}пi}$  – сумарні умовно-постійні втрати електроенергії в трансформаторах  $i$ -го ступеня напруги;  $\Delta W_{\text{Ін}i}$  – сумарні розрахункові втрати електроенергії в інших елементах (шунтових реакторах, синхронних компенсаторах, вентильних розрядниках, обмежувачах перенапруги, в трансформаторах струму і напруги, батареях статичних конденсаторів та ін.)  $i$ -го ступеня напруги.

Залежно від початкової інформації для визначення нормативного значення навантажувальних витрат електроенергії пропонується використовувати такі методи: середніх навантажень і дисперсій, характерних режимів, домінуючих гармонік, поелементного розрахунку. Перші два методи використовуються для електричних мереж напругою до 150 кВ. Метод домінуючих гармонік підходить для будь-яких електричних мереж, але для отримання потрібної точності потрібно врахувати гармоніки, номери яких перевищують домінуючі. Найбільш точне значення нормативу витрат можна отримати методом поелементного розрахунку.

Із всіх складових витрат найбільш складною для розрахунку і представлення в формі, зручній і зрозумілій для використання, є технічні

втрати, особливо їх навантажувальна складова. Для спрощення розрахунку навантажувальних втрат електроенергії в [17] пропонується використовувати нормативну характеристику технічних втрат – залежність задовільного рівня втрат електроенергії від факторів, які відображені в офіційній звітності. Для визначення коефіцієнтів нормативної характеристики технічних втрат електроенергії потрібно знати технічні втрати потужності.

Нормативна характеристика технічних втрат потужності записується у вигляді

$$\Delta P_{\text{план}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j \geq 1}^m A_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^m B_i P_j + C, \quad (1.2)$$

де  $A_{ij}$  і  $B_i$  – коефіцієнти нормативної характеристики технічних втрат потужності;  $P_i$  і  $P_j$  – значення впливних факторів;  $C$  – втрати холостого ходу.

Вираз для нормативної характеристики технічних втрат електроенергії має вигляд:

$$\Delta W_{\text{норм}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j \geq 1}^m A_{Eij} \frac{W_i W_j}{D} + \sum_{i=1}^m B_{Ei} W_j + CD + \Delta W_M$$

де  $A_{Eij} = \frac{A_{ij}}{24} k_{\phi}^2$  і  $B_{Ei} = B_i$  – коефіцієнти нормативної характеристики технічних втрат електроенергії;  $k_{\phi}$  – коефіцієнт форми графіка;  $W_{i(j)}$  – впливні фактори;  $C$  – постійна складова втрат потужності холостого ходу в обладнанні;  $D$  – тривалість розрахункового періоду;  $\Delta W_M$  – сума відносного недообліку електроенергії, кліматичних втрат, витрат електроенергії на власні потреби підстанцій.

Коефіцієнти нормативної характеристики технічних втрат потужності розраховуються за допомогою регресійного аналізу шляхом апроксимації залежності навантажувальних втрат від впливних факторів квадратичним поліномом.



Для визначення нормативного значення втрат електроенергії використовуються результати розрахунку параметрів НР ЕЕС [27–29]:

- рівнів напруг в усіх вузлах ЕЕС, крім опорного за напругою;
- потокорозподілу потужностей по всіх ділянках схеми мережі;
- втрат потужності в усіх елементах схеми заміщення мережі.

Таким чином, для оперативного відслідковування і аналізу втрат потужності можливо використовувати наступні програми: КОСМОС, ГРАФСКАНЕР, ВТРАТИ, АЧП, РАП-ОС/95 та інші [1, 2, 17, 18, 26]. Також існують програми, в яких передбачений розрахунок параметрів НР ЕЕС з різною неповнотою вихідної інформації, наприклад, ВТРАТИ [29].

Проведений аналіз основних методів розрахунку усталених режимів ЕЕС [27, 28, 30–34] дозволив виявити їх переваги і недоліки з точки зору використання їх для оперативного відслідковування втрат потужності.

Метод Гауса-Зейделя, який широко використовується для розв'язання систем рівнянь струморозподілу, має повільну збіжність розрахункового процесу, але характеризується простотою алгоритму і зменшенням кількості обчислень на кожній ітерації.

Метод Ньютона, який в різних модифікаціях найчастіше використовується в програмах розрахунку параметрів НР ЕЕС і втрат потужності, характеризується високою чутливістю до першого наближення.

Гradientні методи хоч легко програмуються і не потребують значних комп'ютерних ресурсів, мають обмежену область застосування, зумовлену пологістю оптимізаційної функції. Порівняльний аналіз методів розрахунку НР ЕЕС наведений в табл. 1.1.

Отже, можна зробити висновок, що для оперативного відслідковування втрат потужності в ЕЕС доцільно застосовувати програми, що використовують метод Ньютона.

На практиці для розрахунку планового значення технічних втрат потужності (ПЗТВП) використовуються методи регресійного аналізу. Використання методів регресійного аналізу для визначення коефіцієнтів нормативної характеристики технічних втрат потужності дає похибку, яка сягає 5–7% і більше [17]. Тому в роботі для визначення ПЗТВП доцільно розглянуто можливості інших методів, зокрема кри-

теріального методу, який має здатність до узагальнення і оцінки у відносних одиницях [24].

Таблиця 1.1 – Аналіз найчастіше використовуваних відомих методів розрахунку НР ЕЕС

Назва методу	Переваги	Недоліки
Метод з простою ітерацією та ітерацією Зейделя на основі оберненої матриці вузлових провідностей	Швидкість розрахунку така ж, як в методі простої ітерації	Суттєвим недоліком методу є те, що матриця $\mathbf{Y}^{-1} = \mathbf{Z}$ заповнена – всі її елементи ненульові
Метод з ітерацією Ньютона на основі алгоритму Гауса	Метод Ньютона висуває менш жорсткі вимоги до умов забезпечення збіжності, ніж метод простої ітерації або ітерації Зейделя	У випадку присутності в ЕЕС великих ємностей, а також при граничних навантаженнях систем метод Ньютона часто не забезпечує збіжності обчислень
Метод з ітерацією Ньютона другого порядку	Метод має переваги методу першого порядку, але за рахунок більш точної апроксимації вихідної системи рівнянь має більш швидку і надійну збіжність	Збільшення кількості обчислень на кожному кроці ітераційного процесу
Метод з ітерацією на основі методу найшвидшого спуску	Для опуклих функцій метод найшвидшого спуску абсолютно збіжний	1. Швидкість збіжності невисока та значно вповільнюється при наближенні до вектора кореня 2. Погана збіжність при малоопуклих функціях

### 1.3. Застосування критеріального методу в оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС

Критеріальний метод (рис. 1.3) як такий, що базується на теорії подібності, може використовуватись при розв'язуванні нелінійних оптимізаційних задач великої розмірності, які виникають в складних динамічних системах типу електроенергетичних. Застосування критеріального методу для розв'язування енергетичних задач наведено в [19–26].

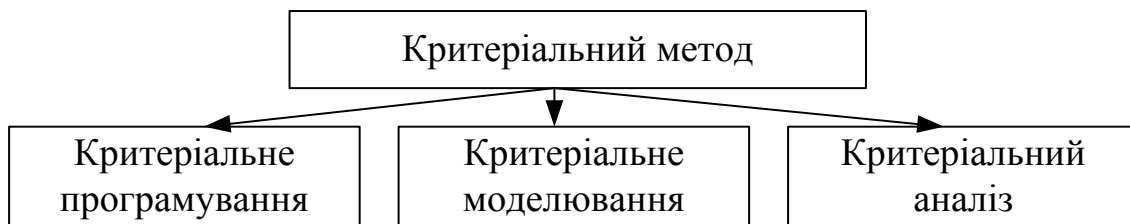


Рисунок 1.3 – Класифікація критеріального методу

Застосування методів теорії подібності і моделювання дозволяє вирішувати завдання АСДК з єдиних методологічних позицій, на єдиній концептуальній базі і забезпечують системний підхід [26]. Характерна особливість цього напрямку охоплює всі етапи вирішення завдань оптимального керування НР. Моделі процесу оптимізації формуються на основі теорем про подібність і додаткових положень до них, розрахунок параметрів оптимального режиму виконується КП, керуючі впливи визначаються за допомогою критеріальних моделей, аналіз оптимальних рішень ведеться на базі критеріального методу – критеріальним аналізом.

Однією із задач оптимального керування НР ЕЕС, яка може бути розв'язана за допомогою критеріального методу, є зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні в ЕЕС шляхом перерозподілу природних потоків потужності і примусового наближення їх до поточкорозподілу, який відповідає однорідній ЕЕС. Це завдання може бути віднесене до класу завдань теорії керування динамічними системами з квадратичним критерієм оптимальності (наприклад, втрати активної потужності, планове значення технічних втрат потужності) [26]:

Мінімізувати

$$F(u) = \int_{t_0}^{t_1} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{L} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{M} \mathbf{u}(t)] dt \quad (1.3)$$

у просторі станів

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}(t); \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \mathbf{u}(t), \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

де  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  – відповідно вектори стану, керування і спостереження;  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  – матриці постійних коефіцієнтів;  $t_0$ ,  $t_k$  – початок і кінець інтервалу часу;  $\mathbf{x}_0$  – початкове значення вектора стану.

У моделі (1.4)

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{J}}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}_{\Delta}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}_{\delta} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}(t) = (\dot{\mathbf{k}}(t)); \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{S}}_B(t) \\ \dot{\mathbf{I}}_B(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{bmatrix},$$

де  $\dot{\mathbf{J}}(t) = \dot{\mathbf{U}}_D^{-1}(t) \cdot \dot{\mathbf{S}}(t)$  – вектор струмів у вузлах ЕЕС;  $\dot{\mathbf{U}}_D^{-1}(t)$  – діагональна матриця вузлових напруг;  $\dot{\mathbf{S}}(t)$  – вектор потужностей у вузлах;  $\dot{\mathbf{k}}(t)$  – вектор комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторів;  $\dot{\mathbf{S}}_B(t)$ ,  $\dot{\mathbf{I}}_B(t)$  – вектори потужностей і струмів в вітках ЕЕС, де здійснюються телевимірювання;  $\dot{\mathbf{U}}(t)$  – вектор напруг у вузлах;  $\dot{\mathbf{U}}_{\Delta}(t)$  – вектор напруг у вузлах відносно базисного;  $\dot{\mathbf{U}}_{\delta}$  – напруга базисного вузла.

Перше рівняння в (1.4) є рівнянням стану системи, розв'язок якого задовольняє початкову умову  $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$  і дає вектор стану  $\mathbf{x}(t) = \psi[\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t)]$ . Друге рівняння в (1.4) визначає початкові параметри залежно від  $\mathbf{x}(t)$  і  $\mathbf{u}(t)$ .

Завдання оптимального керування потоками потужності в ЕЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення  $F$  у заданій зоні нечутли-

## ЛІТЕРАТУРА

1. Авраменко В. М. Програмні засоби для автоматизації оперативного диспетчерського керування енергосистем / В. М. Авраменко, В. Л. Прихно, П. О. Черненко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – Т. 4, № 3. – С. 21–26.
2. Кириленко А. В. Разработка иерархического оперативно-управляющего комплекса и внедрение его в энергообъединении Украины / А. В. Кириленко, В. Л. Прихно, П. А. Черненко // Наука та інновації. – 2008. – № 6. – Т. 4. – С. 12–25.
3. Дьяков А. Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем Учеб. пособие для студентов вузов / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко. – М. : Издательство вузов МЭИ, 2000. – 199 с.
4. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи / Б. С. Стогній // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 6–9.
5. Кириленко О. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / Олександр Кириленко, Артур Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 10–16.
6. Кириленко О. Інформатизація та інтелектуалізація систем керування в електроенергетиці: деякі підсумки за останні роки / Олександр Кириленко, Артур Праховник // Технічна електродинаміка: спеціальний випуск. – 2010. – С. 10–17.
7. Авраменко В. М. Проблеми моделювання та керування режимами електроенергетичних систем / В. М. Авраменко, В. О. Крилов, В. Л. Прихно // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 3. – С. 59–64.
8. Лежнюк П. Використання методів нечіткого моделювання в задачах критеріального програмування / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 1(5). – С. 17–22.

9. Лежнюк П. Застосування Парето-оптимальності  $\alpha$ -рівня для розв'язування задач енергетики з нечіткими параметрами / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2006. – № 4. – С. 144–146.

10. Лежнюк П. Оперативне діагностування трансформаторів в задачах оптимального керування / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко // Вісник Хмельницького національного технічного університету. – 2007. – № 2. – С. 185–189.

11. Лежнюк П. Оптимальне керування режимами електроенергетичних систем з застосуванням нечіткого моделювання / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2007. – № 4. – С. 129–133.

12. Лежнюк П. Усовершенствование управления с целью оптимизации режимов работы электроэнергетического оборудования / Петр Лежнюк, Елена Рубаненко // Металл и литьё Украины. – 2007. – № 8. – С. 40.

13. Лежнюк П. Оптимізація параметрів ЛЕП критеріальним методом із застосуванням нечіткого моделювання [Електронний ресурс] / Петр Лежнюк, Олена Рубаненко // Збірник наукових праць ВНТУ. – 2008. – № 4. – Режим доступу до журналу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-/20084.files/uk/08pdufm\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-/20084.files/uk/08pdufm_uk.pdf)

14. Пат. 29420 Україна, МПК<sup>8</sup> НО2J3/24. Спосіб регулювання режиму роботи електроенергетичної системи / Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О.; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет; заявл. 01.10.07; опубл. 10.01.08. Бюл. № 10, 2008 р.

15. Пат. 51198 Україна, МПК<sup>8</sup> НО2J3/24. Спосіб регулювання режиму роботи електроенергетичної системи / Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О.; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет; заявл. 21.12.09; опубл. 12.7.10. Бюл. №13, 2010 р.

16. Визначення поточних параметрів режиму ЕЕС в умовах неповноти початкових даних із застосуванням засобів нейронного моделювання [Електронний ресурс] / Петро Лежнюк, Олена Рубаненко //

Збірник наукових праць ВНТУ. – 2008. – № 2. – Режим доступу до журналу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-4/2008.files/uk/08pdfm\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-4/2008.files/uk/08pdfm_uk.pdf)

17. Железко Ю. С. Расчёт и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчётов / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. – М. : ЭНАС, 2008. – 280 с.

18. Воротницкий В. Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения / В. Э. Воротницкий // Энергоэксперт. – 2007. – № 3. – С. 10–18.

19. Лежнюк П. Д. Оцінювання чутливості оптимального керування режимами електроенергетичних систем критеріальним методом: монографія / Лежнюк П. Д., Остра Н. В., Зелінський В. Ц. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 131 с.

20. Лежнюк П. Д. Аналіз якості функціонування електричної системи за допомогою критеріальних моделей / Лежнюк П. Д., Комар В. О. // Вісник ВПІ. – 2003. – № 6. – С. 196–198.

21. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом / Петро Дем'янович Лежнюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 131 с.

22. Астахов Ю. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем / Юрий Астахов, Петро Лежнюк // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1990. – № 5. – С. 3–11.

23. Лежнюк П. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрической сети / Петро Лежнюк, Людмила Пауткина // Изв. вузов. Энергетика. – 1989. – № 2. – С. 51–53.

24. Астахов Ю. Н. Применение критеріального метода в электроэнергетике / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк. – К. : УМК ВО, 1989. – 140 с.

25. Лежнюк П. Д. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод: навч. посібник / П. Д. Лежнюк, С. В. Бевз. – Вінниця : ВДТУ, 1999. – 177 с.

26. Лежнюк П. Д. Оптиміальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах : монографія /

П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

27. Идельчик В. И. Электрические системы и сети / Виталий Исаакович Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

28. Сулейманов В. Н. Расчёт и регулирование установившихся режимов работы электрических сетей энергосистем / Сулейманов В. Н. – К. : НМК ВО. 1990. – 216 с.

29. Лежнюк П. Д. Інформаційне забезпечення розрахунку втрат електроенергії в розподільних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, А. Л. Поліщук // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Вип. 57. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Том 1. – Харків : ХНТУСХ, 2007. – С. 67–74.

30. Автоматизация управления энергообъединениями / [ Гончуков В. В., Горнштейн В. М., Крумм Л. А. и др.]. – М. : Энергия, 1979. – 432 с.

31. Веников В. А. Кибернетические модели электрических систем. / Веников В. А., Суханов О. А. – М. : Энергоиздат, 1982. – 328 с.

32. Веников В. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Веников В. А., Журавлёв В. Г., Филлипова Т. А. – М. : Энергоатомиздат. 1990. – 352 с.

33. Бартоломей П. И. Решение электроэнергетических задач методами второго порядка : учебное пособие / Бартоломей П. И. – Свердловск : УПИ. – 1988. – 88 с.

34. Баринов В. А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления / В. А. Баринов, С. А. Савалов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.

35. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечётких условиях / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.

36. Глонь О. В. Моделювання систем керування в умовах невизначеності / О. В. Глонь, В. М. Дубовой. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 169 с.



37. О методах решения многокритериальных задач энергетики с неопределенными величинами / [В. А. Веников, И. А. Будзко, М. С. Левин и др.] // Электричество. – 1987. – № 2. – С. 1–7.

38. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] / С. Д. Штовба. – Режим доступа: [http://www.nnspu.ru/Matlab\\_RU/fuzzylogic/book1/4\\_2.asp.htm](http://www.nnspu.ru/Matlab_RU/fuzzylogic/book1/4_2.asp.htm).

39. Данилюк О. В. Теоретичні засади та методи моделювання електроенергетичних систем на основі технологій штучних нейронних мереж: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» / О. В. Данилюк. – К., 2003. – 40 с.

40. Нечёткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования / [Н. В. Костерев, Е. И. Бардик, Р. В. Вожаков и др.] // Наукові праці ДонНТУ – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С. 65-70.

41. Вороновський Г. К. Проблемы и перспективы использования нейронных сетей в энергетике. Часть 1. Моделирование / Г. К. Вороновський, К. В. Махотило, С. А. Сергеев // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – № 14. – С. 50–61.

42. Галушкин А. И. Применение нейрокомпьютеров в энергетических системах [Электронный ресурс] / А. И. Галушкин. – Режим доступа: [http://www.ragniteman.narod.ru/study/expert\\_system/22.htm](http://www.ragniteman.narod.ru/study/expert_system/22.htm)

43. Применение нечёткой нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом для оценки состояния электрооборудования / О. Н. Агамалов, Н. В. Костерев, Н. П. Лукаш и др.] // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 2. – С. 49–58.

44. Лежнюк П. Д. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин / [П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. А. Жук] // Вісник політехнічного інституту. – 2005. – № 1. – С. 43–51.

45. Сабанин В. Р. Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов / В. Р. Сабанин, И. И. Смирнов, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 12. – С. 27– 31.

46. Лежнюк П. Д. Визначення стану РПН трансформаторів з використанням апарату нейронних мереж / П. Д. Лежнюк, М. І. Пиріжок, О. Є. Рубаненко // Вісник Хмельницького національного технічного університету. – 2007. – № 2. – С. 172–179.

47. Приймак Б. І. Нечітке керування електромеханічними об'єктами [Електронний ресурс] / Б. І. Приймак, О. М. Бондаренко, О. М. Халімовський. Режим доступу: <http://paep2007.abacus.ua/default.aspx>.

48. Петрова И. Ю. Прогнозирование электропотребления с помощью нейро-нечеткой системы ANFIS. Алгоритм отбора входных переменных [Електронний ресурс] / И. Ю. Петрова, А. А. Глебов. – Режим доступу: <http://techno.edu.ru:16001/db/msg/29605.html>.

49. Петрова И. Ю. Прогнозирование электропотребления с помощью нейро-нечеткой системы ANFIS. [Електронний ресурс] / И. Ю. Петрова, А. А. Глебов. – Режим доступу: <http://techno.edu.ru:16001/db/msg/29594.html>.

50. Митюшкин Ю. И. Soft computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.

51. Краткосрочное предсказание электропотребления для крупного жилого массива города / [Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. А. Сергеев и др.] // Unconventional Electromechanical and Electrical Systems «UEES'97»: Third International Scientific and Technical Conference, Alushta, The Crimea, Ukraine, September 19–21, 1997 year: proc. – Alushta, 1997. – P. 1073–1078.

52. Соболев О. С. О применении методов искусственного интеллекта в системах управления / О. С. Соболев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 12. – С.35–36.

53. Evaluation of neural networks and fuzzy logic techniques applied to the control of electrical machines / Fonseca, Afonso Jaime C., L. Martins João, S. Couto Júlio, Carlos // Mecha-tronics and machine vision in practice: international conference, 3, Guimarães, 1996.: Proceedings. Guimarães – Universidade do Minho. Escola de Engenharia, 1996. – v. 2. – P. 15–20.

54. Вороновський Г. К. Проблемы и перспективы использования нейронных сетей в энергетике. Часть 2. Управление. / Г. К. Вороновський, К. В. Махотило, С. А. Сергеев // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 16. – С. 54–67.

55. Neuro-Fuzzy Modeling of Superheating System of a Steam Power Plant [Електронний ресурс] / [Morteza Mohammadzaheri, Ali Mirsepahi, Orang Asef-afshar, Hamidreza Koohi] // Artificial intelligence and applications Innsbruck: International Association Of Science And Technology For Development. 24th IASTED international conference, Austria, 2006: Proceedings. – 2006. – P. 347–352. Режим доступу: <http://portal.acm.org/citation.cfm>

56. Кириленко О. В. Визначення пошкоджень на лініях електропередачі з використанням штучних нейронних мереж / О. В. Кириленко, І. В. Блінов // Наукові праці ДонНТУ. – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С. 9–12.

57. Литвинов В. В. Модель фаззи-контролера для обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки энергосистемы / В. В. Литвинов, Н. В. Костерев, П. Л. Денисюк // Наукові праці ДонНТУ. – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С. 51–54.

58. Козирев С. С. Методика синтезу засобами fuzzy-апроксимації інверсної моделі елекровибухового перетворення енергії в умовах невизначеності / С. С. Козирев // Наукові праці ДонНТУ. – Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8. – С. 78–81.

59. Варецький Ю. О. Моделирование несинусоидных режимов электрической сети как засіб для побудови нейронної мережі / Ю. О. Варецький, Т. І. Наконечный // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 597: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 114–123.

60. Варецкий Ю. Е. Архитектура интеллектуальной системы мониторинга несинусоидальных режимов электрической сети [Електронний ресурс] / [Ю. Е. Варецкий, Т. И. Наконечный, Н. Д. Федонюк, В. А. Комар] // Збірник наукових праць ВНТУ. – 2010. – № 1. – Режим доступу до журналу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2010-1/2010\\_4.files/uk/10pdufm\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2010-1/2010_4.files/uk/10pdufm_uk.pdf)

61. Данилюк О. В. Математична модель оперативної оптимізації режиму роботи підстанції електричної мережі / Данилюк О. В., Бахор З. М., Рильський С. М. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 596: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 69–72.

62. Данилюк О. В. Моделювання технологічних витрат в енергопостачальних компаніях на основі штучної нейронної мережі з синтезом додаткових входів / Данилюк О. В., Батюк Н. Б., Андрощук О. В. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2001. – № 418: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.

63. Ротштейн О. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетичні алгоритми, нейронні мережі / Ротштейн Олександр Петрович. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

64. Прихно В. Л. Устранение ошибок в задании топологии сети при оценивании режимов энергосистем / В. Л. Прихно // Тр. Института электродинамики НАНУ. – 2006. – № 2(14). – С. 26–27.

65. Дьяков А.Ф. Противаварийная микропроцессорная автоматика электроэнергетических систем / А. Ф. Дьяков. – М. : Издательство вузов МЭИ, 2009. – 386 с.

66. Железко Ю. С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 280 с.

67. Апрыткин В. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергообеспечивающих организаций / Валентин Апрыткин, Валерий Воротницкий, Маргарита Калинкина // Энергосбережение. – 2000. – № 3. – С. 53–55.

68. Воротницкий В. Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения / В. Э. Воротницкий // Энергоэксперт. – 2007. – № 3. – С. 10–18.

69. Крумм Л. А. Методи оптимізації при управленні електроенергетическими системами : монографія / Крумм Л. А. – Новосибірск : Наука, 1981. – 317 с.

70. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: методы расчета / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М. : Энергия, 1979. – 416 с.

71. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень / Субботін С. О. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.

72. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб : «БХВ-Петербург», 2004. – 736 с.

73. Павловський В. В. Інженерний расчёт потерь мощности и энергии в электрических сетях, основанный на моделировании установившихся режимов / В. В. Павловський, Г. Е. Куденко // Электрические сети и системы. – 2004. – № 3. – С. 17–22.

74. Захаров В. А. О выборе методов построения функций принадлежности для формализации задач принятия решений [Электронный ресурс] / В. А. Захаров. Режим доступа: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-12-html/borisov/zakharov/zakharov.htm>

75. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел т. 1. – М. : Мир, 1986. – 346 с.

76. Чукреев Ю. Я. Прототип экспертной системы советчика диспетчера региональной ЭЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energy.komisc.ru/seminar/chukr.pdf>.

77. Бирюков Е. В. Практическая реализация нечеткой нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электрической загрузки [Электронный ресурс] / Е. В. Бирюков, М. С. Корнев // Сборник трудов научной сессии МИФИ, – 2005. Режим доступа: [library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2005/nero/ch2/3-2-1.doc](http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2005/nero/ch2/3-2-1.doc)

78. Литвинов В. В. Модель фаззи-контролера для обеспечения статической устойчивости промышленного узла нагрузки энергосистемы / В. В. Литвинов, Н. В. Костерев, П. Л. Денисюк // Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика. – 2008. – № 8(140). – С. 51–54.

79. Шумилова Г. П. Прогнозирование нагрузки ЭЭС на базе новых информационных технологий [Электронный ресурс] / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцеві – Режим доступа: <http://energy.komisc.ru/seminar/Glava5.pdf>

80. Манусов В. З. Методы оценивания потерь электроэнергии в условиях неопределенности / В. З. Манусов, А. В. Могиленко // Электричество. – 2003. – № 3. – С. 2–8.

81. Манусов В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечёткой нейронной сети и её сравнение с другими методами / В. З. Манусов, Е. В. Бірюков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – № 6. – С. 153–158.

82. Жирабок А. Н. Нечёткие множества и их использование для принятия решений / А. Н. Жирабок // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 2. – С. 28–33.

83. Бодянский Е. В. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии на основе искусственной многослойной нейро-фаззи сети / [Е. В. Бодянский, С. В. Попов, Т. В. Рыбальченко, Н. Н. Титов] // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 9. – С. 37–43.

84. Автоматизированное конструирование графической модели электрической сети («ГрафСКАНЕР») для решения задач подсистем SCADA и EMS АСДУ энергосистем. Пояснительная записка. – К. : ГРИФРЭ, 2003. – 183 с.

85. Порудоминский В. В. Устройство переключения трансформаторов под нагрузкой./ В. В. Порудоминский. – М. : Энергия. 1974. – 288 с.

86. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под редакцией С. Д. Лизунова. А. К. Лоханина. М. : Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.

87. Яхьяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Яхьяева Г. Э. – М. : Интуит, 2006. – 316 с.

88. Лежнюк П. Д. Чутливість втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи до збурень у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехного. Інституту. – 2007. – № 6. – С. 63–66.

89. Артюх С. В. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в энергетике. / Артюх С. В., Дуэль М. А., Шелепов И. Г. – Харьков : Знание, 2001. – 414 с.

90. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами : монографія / Лежнюк П. Д.,

Кулик В. В., Бурикин О. Б. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 123 с.

91. Алексеев Б. А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии / Алексеев Борис Алексеевич. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 88 с. – (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып.1(133)).

92. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : учебник для вузов / Николай Иллич Овчаренко. – М.: НЦЭНАС, 2000. – 504 с.

93. Оболонский Д. И. Интегрированная SCADA/HMI система TRACE MODE на службе в юго-западном электроэнергетическом регионе Украины [Электронный ресурс] / Д. И. Оболонский, С. А. Полуян, О. Е. Когут. Режим доступа.: [http://www.adastra.ru/reports/expo10/obolonsky-scada-hmi\\_system\\_tm\\_sw\\_energy\\_.htm](http://www.adastra.ru/reports/expo10/obolonsky-scada-hmi_system_tm_sw_energy_.htm)

94. Ясиновский С. И. MES-система SDB: интеллектуальная гибридная система піддержки принятия решений в оперативном управлении процессами / С. И. Ясиновский // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – С. 17–21.

95. Баталов А. Г. Стан та перспективи розвитку магістральних та міждержавних електричних мереж. / [А. Г. Баталов, Г. І. Гримуд, О. В. Кириленко, М. М. Кулик] // Технічна електродинаміка. – 2006. – Тематичний випуск, Ч. 1. – С.16–21.

96. Юсифов Н. А. Автоматизированная система оперативно-технологического управления как распределенная иерархическая система [Электронный ресурс] / Н. А. Юсифов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 6. – Режим доступа до журн.: <http://www.elm.az/physics/PowerEng/2003/v4article/art02.pdf>

97. Lezhnuk P. D. Realization of control and monitoring in operation of transformers in electric power systems / Petro Lezhnuk, Konstantin Kravtsov, Oleksandr Honcharuk // Development and application systems (DAS – 2002): the 6<sup>th</sup> International Conference, 2002.: proceedings. – Suceava, Romania: «MUSATINII», 2002. – P. 1–6.

98. Lezhnuk P. Electroenergy Systems Interference Analysis / P. Lezhnuk, V. Kulyk, O. Burykin // ISTET'05: міжнарод. научн.-техн. конф., 2005 р.: матеріали конференції ISTET'05. – 2005. – С. 365–367.
99. Ch'i-Hsin Lin. Distributed optimal power flow with discrete control variables of large distributed power systems / Ch'i-Hsin Lin, Shin-Yeu Lin // IEEE Transactions on power systems. – 2008. – vol. 23, №. 3. – P. 1383–1392
100. Cartina G. Application of fuzzy logic for energy loss reduction in distribution networks / [G. Cartina, C. Bonciu, M. Musat, Z. Zisman] // Electrotechnical Conference, 1998. MELECON 98.: 9th Mediterranean, 18-20 May 1998. – 1998. – vol. 2. – P. 974 – 977.
101. Grigoras G. An improved fuzzy method for energy losses evaluation in distribution networks / G. Grigoras, G. Cartina, E. C. Bobric // MELECON 2010: 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 26–28 April 2010. – 2010. – P. 131–135.
102. Nazarko J. The fuzzy approach to energy losses calculations in low voltage distribution networks / J. Nazarko, Z. Styczynski, M. Poplawski // Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, IEEE, 23–27 January 2000. – 2000. – vol.4, – P. 2763–2768.
103. Dong Zhang. Joint Optimization for Power Loss Reduction in Distribution Systems / Dong Zhang, Zhengcai Fu, Liuchun Zhang // IEEE Transactions on power systems. – 2008. – vol. 23, №. 1 – P. 161–169.
104. Методика расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях: утв. министерством промышленности и энергетики Российской Федерации (Минпромэнерго России) 03.02.2005 № 21. – М. : 2005. – 159 с. – (Нормативный документ Минпромэнерго России).



**Лежнюк Петро Дем'янович**  
**Рубаненко Олена Олександрівна**

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ  
РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ  
КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ З ЗАСТОСУВАННЯМ  
НЕЙРОНЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Рубаненко

Підписано до друку 24.05.2012 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 7,74  
Наклад 100 прим. Зам № 2012-074

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.