

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ПОШКОДЖЕНЬ НА ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ *

Викладено результати досліджень з підготовки та використання штучних нейронних мереж для розв'язання задач визначення виду та місця короткого замикання на лініях електропередачі.

Изложены результаты исследований по подготовке и использованию искусственных нейронных сетей для решения задач определения вида и места короткого замыкания на линиях электропередачи.

Пошкодження ліній електропередачі (ЛЕП), як правило, призводить до зниження надійності електропостачання та недовідпуск електроенергії споживачам. Тому однією з найважливіших є задача швидкого і точного визначення місця пошкодження (ВМП) ЛЕП, яка має особливе значення для об'єднаної електроенергетичної системи України, зважаючи на фізичну та моральну застарілість електроенергетичного обладнання, зокрема і ЛЕП різних класів напруги.

Аналіз методів і засобів ВМП ЛЕП високої напруги показав, що серед дистанційних методів ВМП ЛЕП найбільш застосованою на практиці є група методів з використанням вимірювань параметрів аварійного режиму (ПАР). При цьому під ВМП найчастіше розуміється визначення виду та місця короткого замикання (КЗ) на ЛЕП. На точність ВМП ЛЕП впливає як точність вимірювання ПАР, так і те, з одного чи двох боків ЛЕП проводиться вимірювання (значення перехідного опору короткого замикання в місці КЗ (R_{II}) суттєво впливає на точність ВМП ЛЕП, але не визначається при однобічному вимірюванні ПАР). Все це, а також прагнення використовувати всю доступну інформацію – як апріорну, так і поточну, робить актуальним розробку більш точних методів розв'язання задачі ВМП ЛЕП, які здатні до адаптації та навчання, наприклад, методів на базі штучних нейронних мереж (ШНМ), що використовуються для розв'язання цілої низки задач в електроенергетиці.

На основі результатів попередніх досліджень [2, 5], а також з огляду на такі особливості ШНМ, як їх здатність до навчання та високі апроксимаційні властивості, визначено доцільність використання ШНМ, перш за все, для розв'язання задачі ВМП ЛЕП за умов вимірювання (визначення) ПАР з одного боку ЛЕП, оскільки задача ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з двох боків ЛЕП розв'язується досить ефективно багатьма методами, зокрема з використанням ШНМ. Визначено типи ШНМ, що можуть бути ефективно використані для розв'язання задачі ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП [5]. До таких типів належать: ШНМ з прямим поширенням сигналу та зворотним поширенням похибки, ШНМ радіально-базисного типу та ШНМ Кохонена.

Проведений аналіз використання ШНМ для розв'язання задачі ВМП ЛЕП показав, що підвищенню ефективності розв'язання поставленої задачі сприяє використання “ансамблів” (сукупностей) різних типів ШНМ, в яких одні ШНМ використовуються для визначення виду, а інші – місця КЗ на ЛЕП. При такому “розподілі функцій” ШНМ можна гарантовано забезпечити (незалежно від значення R_{II}) як визначення виду КЗ, так і бажану точність визначення місця КЗ на ЛЕП. Зазначений “розподіл функцій” ШНМ дає змогу підвищити ефективність підготовки самих ШНМ.

Особливість задачі ВМП ЛЕП не дає змоги підготувати належну навчальну вибірку, використовуючи тільки ретроспективну інформацію про режими КЗ на ЛЕП. Тому підготов-

ка даних для навчання ШНМ вимагає попереднього використання адекватної моделі відповідної ЛЕП. Застосування засобів математичного моделювання необхідно для формування вибірок даних значень ПАР для підготовки ШНМ. Слід відзначити, що задача ВМП ЛЕП з використанням ШНМ розділяється на дві відносно самостійні задачі. До першої належить одержання за допомогою розрахунку аварійних режимів роботи ЛЕП значень ПАР, а до другої – використання отриманих ПАР при підготовці ШНМ для ВМП ЛЕП. Підготовку даних для навчання ШНМ було виконано за допомогою спеціалізованих програмних комплексів розрахунку аварійних режимів і струмів КЗ в електроенергетичних системах (ЕЕС). Разом з тим важливу роль при розв'язанні задачі ВМП ЛЕП з використанням ШНМ відіграє попередня підготовка ШНМ, що потребує застосування програмного інструментарію для вибору, навчання, тестування та використання ШНМ [2]. На підставі експериментальних досліджень відповідних програмних засобів встановлено, що достатньо обмежитись застосуванням програмного продукту Neural Network Toolbox, який забезпечує ефективну підготовку ШНМ.

З огляду на особливості підготовки та використання ШНМ різного типу, а також на підставі експериментальних досліджень, встановлено, що для розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП доцільно використовувати радіально-базисні ШНМ, зокрема імовірнісну нейронну мережу (ІНМ). З іншого боку, визначення місця КЗ на ЛЕП з використанням ШНМ потребує розв'язання задачі апроксимації, яка може бути ефективно розв'язана багатошаровим перцептроном (БШП) [3-4].

Хоча ІНМ належить до радіально-базисних ШНМ загального виду, однак така ШНМ має деякі відмінності в архітектурі. Перевагою ІНМ є те, що вона досить швидко навчається (у порівнянні з іншими типами ШНМ) навіть при великих розмірах навчальної вибірки. Крім того, архітектура ІНМ уточнюється в процесі навчання і тому зникає потреба вибору кількості шарів і нейронів у прихованому шарі ІНМ, що спрощує процес її підготовки для визначення виду КЗ на ЛЕП. При виборі оптимальної архітектури ІНМ враховувати тільки величину помилки навчання недостатньо, тому що в цьому випадку не можна виявити виникнення “ефекту перенавчання” ІНМ, отже, необхідним є порівняння поведінки декількох показників якості навчання та роботи ІНМ. Одним із таких показників якості навчання і функціонування ІНМ при розпізнаванні виду КЗ на ЛЕП є помилка функціонування ІНМ, яка визначається при поданні на вхід навченої ІНМ даних з тестової вибірки. Якість функціонування для ІНМ розраховується як відношення правильно розпізнаних прикладів від загальної кількості поданих на вхід ІНМ до прикладів ПАР із тестової вибірки. Оптимальна архітектура ІНМ визначається на основі оцінювання помилок навчання й функціонування ІНМ. У випадку підготовки ІНМ для розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП як складової задачі ВМП ЛЕП, необхідно забезпечити безпомилкове функціонування ІНМ.

З метою спрощення процесу підготовки ІНМ розроблено алгоритм автоматизації визначення оптимальної архітектури ІНМ для розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП [1].

При вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП застосування однієї ІНМ дає змогу визначити вид КЗ на ЛЕП при одержанні в якості ПАР тільки діючих значень струмів КЗ, при цьому правильність визначення виду КЗ забезпечується для ЛЕП в діапазоні зміни значення R_{II} від 0 до 30 Ом та значенні діючого струму КЗ (I_{K3}) відносно значення доаварійного струму ЛЕП ($I_{0,ав.}$) в діапазоні $I_{K3} = (1,5 \dots 15) \cdot I_{0,ав.}$. Для розширення можливого діапазону зміни R_{II} від 0 до 150 Ом та врахування наявності похибок при визначенні ПАР запропоновано метод розв'язання задачі визначення виду КЗ на ЛЕП з використанням ансамблю ІНМ (АІНМ), до якого входять чотири ІНМ. Блок-схему процесу підготовки АІНМ для визначення виду КЗ наведено на рис. 1.

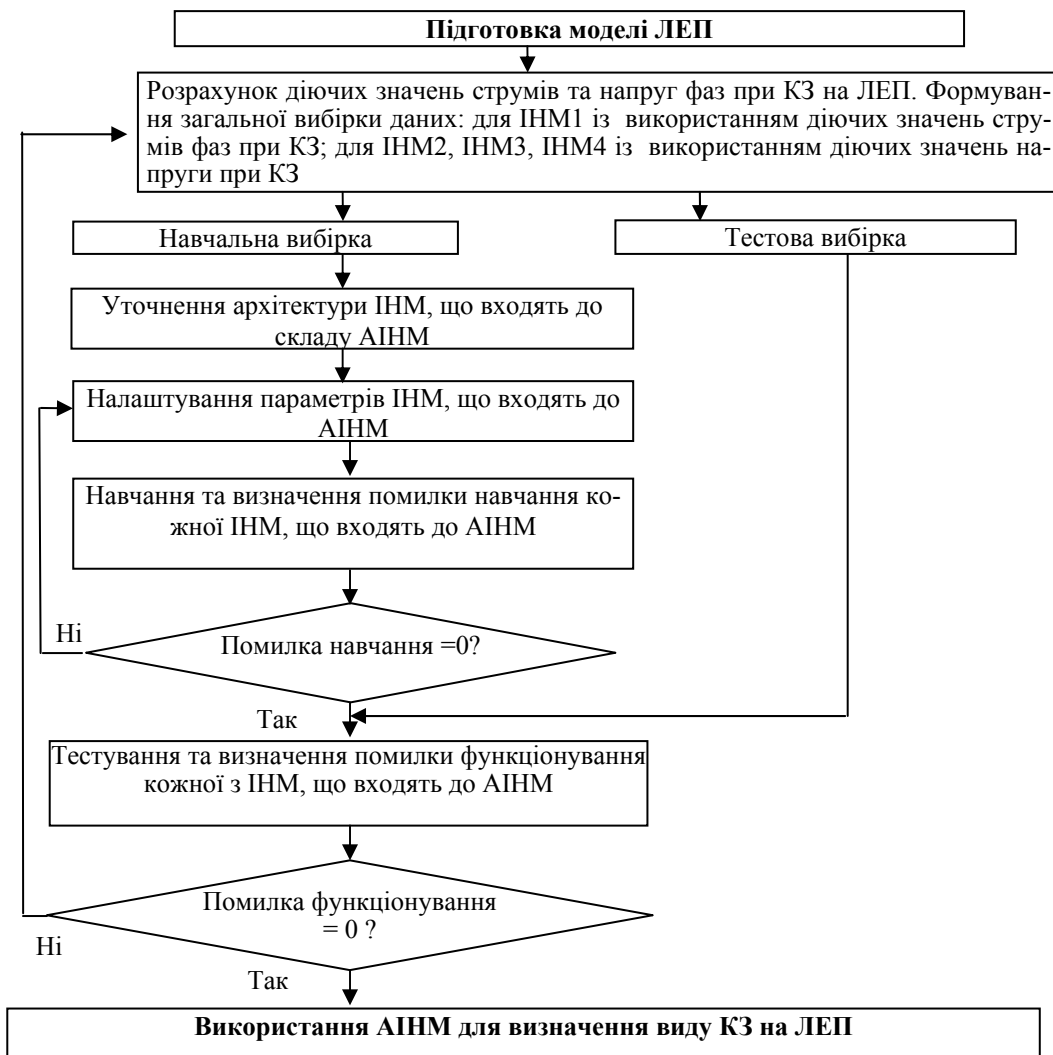


Рис. 1

У запропонованому АІНМ перша ІНМ визначає характер КЗ, що мало місце – одно-, дво- чи трифазне КЗ, при цьому така ІНМ не розрізняє – відбулося двофазне ($K^{1,1}$) чи двофазне КЗ на землю (K^2), однак визначає пошкоджені фази (рис. 2).

Перша ІНМ в якості ПАР використовує діючі значення струмів КЗ. Інші три ІНМ підготовлено для розпізнавання $K^{1,1}$ і K^2 для усіх випадків пошкоджених фаз, причому в якості ПАР використано діючі значення напруг фаз при КЗ на ЛЕП.

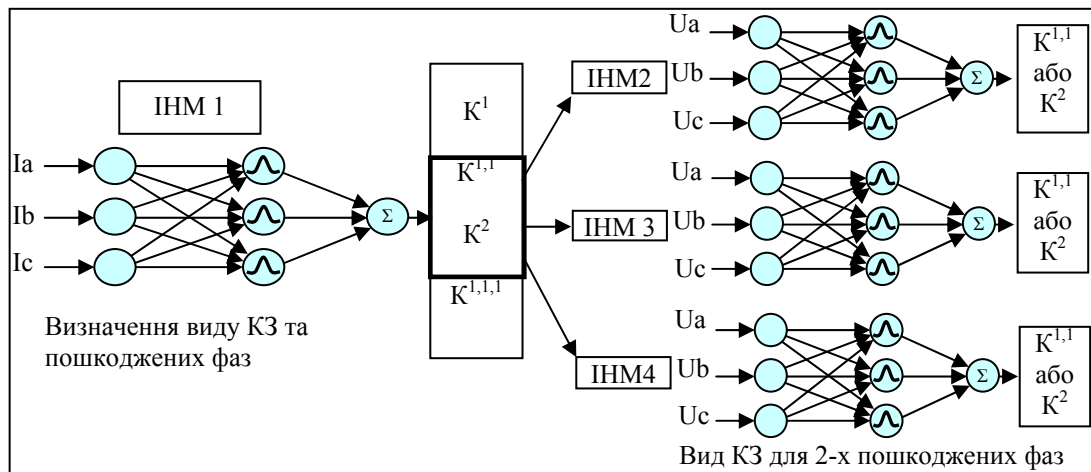


Рис. 2

При дослідженні питань правильності визначення виду КЗ із використанням АІНМ встановлено, що застосування запропонованого методу при підготовці навчальної вибірки дає змогу збільшити крок дискретизації як по R_{II} , так і по відстані до місця КЗ при загальній, порівняно невеликій, кількості елементів навчальної вибірки. Це позитивно впливає на ефективність навчання ІНМ, не потребуючи збільшення часу на її навчання. В результаті, завдяки використанню АІНМ, було забезпечено безпомилкове визначення виду КЗ на ЛЕП за умови зміни R_{II} у зазначеному вище діапазоні значень.

Аналіз впливу похибки визначення ПАР на функціонування ІНМ показав, що правильність визначення виду КЗ кожною з ІНМ, які входять до складу АІНМ, практично залишається незмінною, навіть при досить великій похибці визначення ПАР. Так, наприклад, якщо похибка визначення ПАР знаходиться на рівні 10 %, помилка у функціонуванні АІНМ виникає при розпізнаванні менш ніж у 0,5 % випадків, а при похибці до 5 % АІНМ практично безпомилково визначає вид будь-якого КЗ на ЛЕП. Такі результати роботи АІНМ свідчать про переваги запропонованого методу визначення виду КЗ на ЛЕП в умовах наявності похибки визначення ПАР в усталеному режимі КЗ.

Для розв'язання задачі визначення місця КЗ на ЛЕП запропоновано та розроблено метод із використанням БШП [3]. На рис. 3 наведено блок-схему процесу підготовки БШП для визначення місця КЗ на ЛЕП.

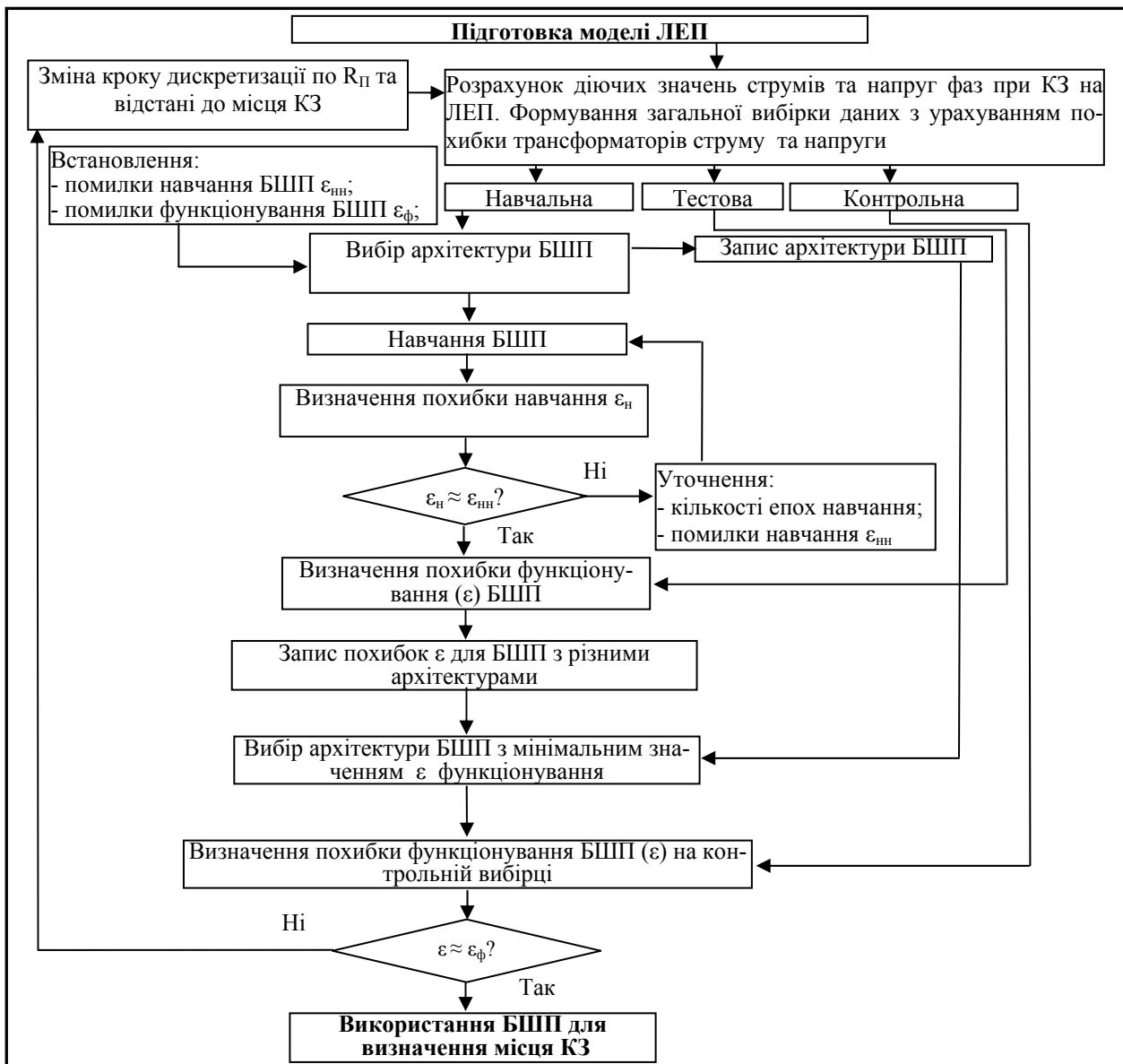


Рис. 3

Відмінність запропонованого методу від існуючих полягає в удосконаленні підготовки БШП з урахуванням похибки трансформаторів струму та напруги, а також з урахуванням появи R_{II} , що може змінюватися в широкому діапазоні значень. Підготовку БШП для визначення місця КЗ слід виконувати окремо для кожного виду КЗ, який визначається з використанням ІНМ. Це дає змогу значно підвищити ефективність навчання БШП за рахунок того, що зменшується розмір вибірок даних для підготовки БШП, спрощується процес визначення оптимальної архітектури та алгоритму навчання БШП.

Визначено оптимальні параметри навчання БШП та вимоги щодо підготовки відповідних навчальних і тестових вибірок даних. Експериментальні дослідження показали доцільність використання алгоритму зворотного поширення похибки Левенберга-Маквардта. Властиві алгоритму обмеження, пов'язані з його орієнтацією на навчання БШП невеликого розміру з одним виходом, не впливають на розв'язання поставленої задачі. Проаналізовано та визначено функції активації нейронів БШП.

Результати досліджень показали, що при підготовці вибірок даних для навчання та тестування БШП необхідно обирати крок дискретизації по R_{II} від 1,5 до 5 Ом, а крок дискретизації по відстані до місця КЗ у діапазоні від 3 до 10 км. Змінюючи ці показники, можна підготувати оптимальну вибірку даних для ЛЕП різної довжини та класу напруги. Для того щоб уникнути ефекту “перенавчання” БШП, необхідно задаватись помилкою навчання в діапазоні від 0,1 до 1 %. Оптимальна архітектура БШП визначається при порівнянні помилок функціонування БШП, що мають різну архітектуру. Для урахування похибки трансформаторів струму та напруги необхідно одночасно навчати БШП як на “точних” даних про ПАР, так і на викривлених. Оптимальна вибірка даних для навчання БШП також визначається шляхом порівняння помилок функціонування БШП для різних навчальних вибірок. Тестова вибірка побічним чином бере участь у навчанні БШП, оскільки помилка роботи БШП може бути скоригована після тестування БШП. Тому необхідними є підготовка та використання контрольної вибірки.

Результати тестування БШП показали, що для зміни кратності (K_I) діючого струму КЗ ($I_{KЗ}$) по відношенню до $I_{0.ав.}$ у діапазоні $K_I = 1,4...40$ та діапазоні зміни $R_{II} = 0...150$ Ом для всіх видів КЗ на ЛЕП напругою 330 кВ середня відносна похибка функціонування БШП у відсотках з урахуванням похибки трансформаторів струму та напруги знаходиться на рівні 5 % (в окремих випадках при умовах КЗ на ЛЕП, що сильно відрізняються від середньостатистичних, похибка може сягати 10 %). Для діапазону зміни R_{II} від 0...30 Ом (найбільш імовірний діапазон зміни R_{II}) похибка визначення місця КЗ на ЛЕП з використанням БШП знаходиться на рівні 0,8 %, при цьому максимальна похибка не перевищує 3 % для всіх видів КЗ при діапазоні зміни кратності струму $K_I = 1,4...10$. Випадки невірно визначених видів КЗ, а також максимальні відхилення при визначенні місця КЗ на ЛЕП, стосуються, переважно, значень ПАР, значення яких виходять за межі навчання ШНМ. Тому навчання ШНМ потрібно проводити із застосуванням максимально можливого діапазону ПАР для конкретної ЛЕП.

Таким чином, для ефективного розв'язання задачі ВМП ЛЕП запропоновано функціонально поєднати ІНМ та БШП в єдиному цілому. При такому підході чотири ІНМ використовуються для визначення виду КЗ на ЛЕП та вибору відповідного БШП, який, у свою чергу, визначає місце КЗ на ЛЕП для відомого виду КЗ. Практична реалізація запропонованих методів визначення виду та місця КЗ на ЛЕП високої напруги при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП дала змогу (за рахунок властивостей ШНМ) гарантувати достовірність визначення виду КЗ на ЛЕП та підвищити точність визначення місця КЗ, враховуючи як зміну R_{II} у діапазоні реально можливих значень, так і вплив похибок при одержанні ПАР на ефективність роботи засобів ВМП з використанням ШНМ.

У результаті виконання науково-дослідних робіт одержано наступні результати:

- встановлено доцільність використання ШНМ, перш за все, для розв'язання задачі ВМП ЛЕП при вимірюванні ПАР з одного боку ЛЕП;
- визначено типи ШНМ, які доцільно використовувати для розв'язання задачі ВМП ЛЕП, встановлено вимоги до підготовки таких ШНМ та доцільність використання програм-

ного інструментарію розрахунку аварійних режимів і струмів КЗ в ЕЕС для формування вибірок даних при навчанні ШНМ, визначено програмний інструментарій підготовки ШНМ;

– розроблено метод визначення місця КЗ на ЛЕП із застосуванням БШП, що забезпечило необхідну точність ВМП ЛЕП, враховуючи як зміну R_{II} у діапазоні реально можливих значень для всіх видів КЗ на ЛЕП високої напруги (220...330 кВ), так і вплив похибки визначення ПАР на точність визначення місця КЗ на ЛЕП;

– запропоновано та розроблено метод визначення виду КЗ на ЛЕП з використанням як однієї ІНМ, так і АІНМ при визначенні ПАР з одного боку ЛЕП, що дозволило:

- у разі використання АІНМ гарантувати правильність визначення виду КЗ на ЛЕП незалежно від значення R_{II} та наявності похибок при визначенні ПАР, в якості яких використовуються діючі значення струмів та напруг фаз у режимі КЗ;

- у разі використання однієї ІНМ визначати вид КЗ на ЛЕП при одержанні в якості ПАР, на відміну від АІНМ, тільки діючих значень струмів КЗ, при цьому достовірність визначення виду КЗ на ЛЕП забезпечується при діапазоні зміни значення перехідного R_{II} від 0 до 30 Ом.

Подальше використання отриманих результатів передбачено при створенні функціональних компонентів засобів моніторингу, діагностики і керування ЕЕС.

1. *Блинов И.В., Зозуля А.М.* Определение оптимальной архитектуры искусственной нейронной сети для решения задачи определения вида КЗ на ЛЭП // Техн. электродинамика. Темат. вып. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2008. – Ч. 5. – С. 41–42.
2. *Буткевич О.Ф., Блинов І.В.* Підготовка штучних нейронних мереж для визначення характеру та місця пошкодження ліній електропередачі // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С. 29.
3. *Кириленко О.В., Блинов І.В.* Визначення місць пошкоджень на лініях електропередачі з використанням штучних нейронних мереж // Наук. пр. ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2008. – Вип. 8(140). – С. 9–12. .
4. *Кириленко А.В., Буткевич А.Ф., Блинов И.В.* Вопросы применения искусственных нейронных сетей для определения мест повреждений на линиях электропередачи // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 21. – С. 7–12.
5. *Кириленко А.В., Буткевич А.Ф., Блинов И.В.* Определение мест повреждений на линиях электропередачи с использованием искусственных нейронных сетей. Определение вида короткого замыкания // Техн. электродинамика. Темат. вып. “Силовая электроника та енергоефективність”. – 2008. – Ч. 2. – С. 76–79.

УДК 621.311.001.18

В.М. Авраменко, В.О. Крилов, В.Л. Прихно, П.О. Черненко

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ І НОВІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ РЕЖИМІВ ТА ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМАМИ

Викладені основні теоретичні та практичні результати відділу моделювання електроенергетичних об'єктів та систем (№ 3) ІЕД НАНУ, одержані у 2008 р., стосовно використання в енергосистемах синхронізованих вимірів фазових кутів напруги, оцінювання стану, розробки режимного тренажера диспетчерів, прогнозування електричного навантаження та електроспоживання, розрахунків аварійних режимів та уставок пристроїв захистів.

Изложены основные теоретические и практические результаты отдела моделирования электроэнергетических объектов и систем (№ 3) ИЭД НАНУ, полученные в 2008 г., относительно использования в энергосистемах синхронизированных измерений фазовых углов напряжения, оценки состояния, разработки режимного тренажера диспетчеров, прогнозирования электрической нагрузки и электропотребления, расчетов аварийных режимов и уставок устройств защит.

Один з основних напрямків досліджень відділу № 3 – це моделювання електроенергетичних систем (ЕЕС) і створення на цій основі програмного забезпечення автоматизованих систем диспетчерського керування енергетичних систем та об'єднань. У рамках НДР «Система-4» і «Монітор», а також наукових проектів комплексної програми НАН України «Інтеграція» і інноваційних проектів НАН України ця задача розв'язується з урахуванням нових можливостей інформаційної та телекомунікаційної техніки, перш за все, мікропроцесорних засобів захисту, автоматики і реєстрації та обробки параметрів стану ЕЕС. Використання результатів досліджень у промисловості сприятиме підвищенню надійності функціонування Об'єднаної енергосистеми України, що має особливо велике значення з огляду на перспективи об'єднання ОЕС України із західноєвропейським енергетичним об'єднанням UCTE.

Новітнім засобом керування ЕЕС, забезпечення їхньої стійкості є використання **синхронізованих вимірів** фазових кутів напруги у віддалених вузлах електричної мережі, здійснюваних за допомогою супутникової системи телекомунікацій GPS пристроями системи моніторингу перехідних режимів (СМПР). Продовжуючи дослідження у цьому напрямку минулих років [1, 3], у 2008 р. створено першу версію програми для використання фазових кутів напруги у протиаварійному керуванні енергосистем для забезпечення статичної стійкості ЕЕС, з використанням критерію існування режиму за умов обваження визначених перетинів.

Програма забезпечує автоматизацію розрахунків послідовного обваження перетину відповідно до заданих траєкторій, вибору множини взаємних кутів векторів напруги та функцій апроксимації потужності у перетині від кутів. Використовується апроксимація степеневим поліномом другого порядку, коефіцієнти якого визначаються методом найменших квадратів. Як приклад, кращий варіант апроксимації для перетину Захід-Вінниця у режимі зимового максимуму 2004 р. має середньоквадратичне відхилення 0,15 % граничної потужності. З використанням цієї програми були досліджені шість найбільш напружених перетинів ОЕС України, що дало змогу визначити доцільні місця встановлення розробленого в Інституті електродинаміки пристрою «Регіна-Ч», який здійснює синхронізований вимір фазових кутів напруги. Ця робота виконувалась у рамках інноваційного проекту по впровадженню пристроїв «Регіна-Ч» в Об'єднаній енергосистемі України.

Тривали дослідження в напрямку розвитку методів **оцінювання стану** ЕЕС [5]. Ця задача є базовою в комплексі оперативного диспетчерського керування. У результаті її рішення формується інформаційна модель поточного або характерного ретроспективного усталеного режиму. Згодом на основі цієї моделі вирішуються інші задачі, зокрема – імітаційного моделювання, перевірки стійкості, надійності та оптимізації. Від якості результатів оцінювання істотно залежить й ефективність рішення всіх перерахованих задач.

Одержання високоточних синхронізованих вимірів миттєвих значень напруг пристроями СМПР відкриває нові перспективи для підвищення якості оцінювання режимів енергосистем. Це пов'язано з можливістю використання серед вимірюваних параметрів і фаз напруг (раніше використовувалися лише виміри активної та реактивної потужностей та модулі напруг). При цьому варто звернути увагу на те, що розширення складу вимірюваних параметрів за рахунок фаз досить корисно з таких причин: наявність додаткових вимірів збільшує надійність системи при відмовах окремих вимірювальних каналів; зростає обґрунтованість рішень у процесі відбраковування вимірів, що містять грубі помилки; підвищується ймовірність вироблення правильних рекомендацій при перевірці стану топології мережі; наявність прямих вимірів незалежних змінних, до яких належать модулі й фази напруг вузлів, підвищує стійкість обчислювального процесу (за рахунок поліпшення властивостей матриць Якобі); більш висока точність додаткових вимірів сприяє підвищенню точності оцінки режиму в цілому.

У зв'язку зі сказаним, впродовж 2008 року були виконані роботи з удосконалення методики й програми оцінювання стану з метою забезпечення можливості використання додаткових вимірів. При цьому, крім вимірів фаз напруг, реалізована можливість врахування вимірів струмів у гілках та вузлах схеми, а також співвідношень активних і реактивних складових навантажень у вузлах.

Задача оцінювання стану є комплексною й включає декілька взаємозалежних підза-

дач: перевірки стану топології мережі; перевірки можливості спостереження режиму й подолання дефіциту телеметричної інформації; пошуку та відбраковування грубих помилок у вимірах; розрахунку режиму відповідно до прийнятого критерію оцінювання.

Основою алгоритму оцінювання стану, реалізованого в ПК КОСМОС, є метод зважених найменших квадратів. У цільовій функції використовуються вагові коефіцієнти, що характеризують точності вимірів. Однак участь у одній і тій же функції абсолютно різнорідних за фізичною природою, але надзвичайно залежних одна від одної величин (активних потужностей і фаз напруг) викликає складності з обґрунтованою установкою вагових коефіцієнтів. Для визначення вагових коефіцієнтів при вимірах кутів запропоновано підхід, заснований на виконанні допоміжних тестових розрахунків, що дають змогу співвіднести зміни вузлових потужностей і фаз напруг при почерговому введенні додаткових вимірів вузлових потужностей, що містять одиничні похибки.

При розробці методики оцінювання стану з використанням додаткових вимірів були суттєво вдосконалені підходи до рішення всіх підзадач, що були перераховані вище.

На основі запропонованої методики розроблено нову версію програми оцінювання стану, яку включено до складу ПК КОСМОС. Крім цього, незалежний програмний модуль оцінювання став складовою програмного забезпечення пілотного проекту, що має назву «Система моніторингу запасів стійкості північних регіонів Тюменської області (СМЗС ПРТО)». Робота виконувалась з ініціативи Системного Оператора Єдиної енергосистеми Росії. Мета проекту полягала в перевірці можливості використання додаткової інформації, що надходить від пристроїв СМІР, для рішення задач оперативного диспетчерського керування. Для реалізації проекту всі основні електростанції й підстанції регіону або вже обладнані, або найближчим часом мають бути обладнаними пристроями СМІР. У рамках проекту планувалася розробка програмного забезпечення, орієнтованого на використання інформації, що надходить від СМІР. З жовтня 2008 р. СМЗС ПРТО перебуває в дослідно-промисловій експлуатації в Тюменському регіональному диспетчерському управлінні. Орієнтовний термін здачі системи у промислово експлуатацію – квітень 2009 року.

У 2008 р. завершено виконання розділу наукового проекту в рамках комплексної програми «Інтеграція», в якому досліджувалися проблеми застосування **надпровідних індуктивних накопичувачів енергії** (НПН) в електроенергетиці [2]. Результатом цієї роботи стали розробка і реалізація у промисловій програмі розрахунку динамічної стійкості складних ЕЕС моделі НПН і виконання з її допомогою досліджень можливого застосування НПН як засобу забезпечення динамічної стійкості ЕЕС та для підвищення рівня живучості сучасних енергетичних об'єднань шляхом забезпечення надійного аварійного виділення електростанції на локальний район навантаження. На реальних прикладах визначені діапазони енергоємності накопичувачів, необхідних для вирішення цих задач.

Продовжувалися роботи по удосконаленню методу розрахунку самоусталеного **післяаварійного режиму** ЕЕС як технологічної задачі у складі режимного тренажера диспетчера енергосистеми [1]. Досліджувалися два варіанти організації ітераційного процесу на основі трьох змінних для кожного джерела (генератора): 1) кут напруги системи, реактивний опір до точки її прикладання та реактивний опір до точки місцевого навантаження; 2) замість опорів – місцева та максимальна обмінна активна потужність. Дослідження показали перевагу першого варіанту, доповненого об'єднанням в еквівалентний генератор близьких генераторів, які визначаються за ознакою від'ємної величини опору до точки прикладання напруги системи. За таких умов розрахунки, виконані для фрагменту реальної енергосистеми, а саме так званого Бурштинського острова та його зв'язків з УСТЕ, показали, що коли бажаний режим не може існувати, розрахунок дає граничний режим на межі існування з розбіжністю граничної потужності (у разі різних варіантів завдання) порядку 0,15 %.

Планується продовження розробки динамічного режимного тренажера диспетчера енергосистеми з впровадженням його в НЕК «Укренерго», а також (спільно з НВП «Хартрон») адаптивної мікропроцесорної автоматики запобігання порушенню статичної стійкості для Кримської електроенергетичної системи НЕК «Укренерго».

Відповідно до раніше розробленого методу багаторівневого багатофакторного **прогнозування електричного навантаження** (ЕН) та електроспоживання (ЕС) розроблений метод дворівневого середньострокового прогнозування помісячного електроспоживання та екстремальних (мінімальних та максимальних) значень сумарного електричного навантаження енергооб'єднання (ОЕС) на тижневому та місячному часовому інтервалі. На основі згаданого методу розроблений алгоритм, в якому випадковий часовий ряд нестационарних коливань ЕС представляється моделлю авторегресії та ковзного середнього, і в якості оператора прогнозування використовується модифікований метод Бокса–Дженкінса [12].

На відміну від базового методу в розробленому алгоритмі переходу від нестационарного часового ряду до стационарного попередньо виділяються базова, сезонна, трендова метеорологічна та випадкова компоненти. Сезонна компонента враховує сезонні зміни ЕС, викликані опалювальним сезоном, навчальним процесом, переробкою сільськогосподарської продукції і т. ін. У моделі, що описує залежність ЕС від температури, виділяються три підмоделі, що охоплюють три інтервали температур: зона нечутливості (у даному інтервалі ЕН та ЕС нечутливе до зміни температури повітря), умовно зимовий, у якому відображена від'ємна кореляційна залежність між ЕС та температурою повітря та умовно літній, в якому відображена пряма кореляційна залежність між зазначеними параметрами. Виділена випадкова компонента за критерієм погодження перевіряється на відповідність нормальному закону розподілення.

Важливо виявити та відобразити в математичній моделі різкі зміни в ЕС енергоємними підприємствами на інтервалі передісторії. Ці зміни, як правило, викликані впливом технологічних (ремонт чи аварійним відключенням потужних енергоємних агрегатів) і економічних (кон'юнктура попиту на продукцію підприємств) [15]. За розробленим методом, згідно з критерієм Чебишева, проводиться виявлення відхилень обох типів та коригування вихідних архівів електроспоживання відповідної енергосистеми. Оскільки, як правило, промисловість складає значний відсоток у структурі електроспоживання кожної енергосистеми, то такий підхід дає змогу суттєво уточнити величину місячного тренду та метеорологічну компоненту ЕС.

Реалізація методу прогнозування за структурою електроспоживання об'єднаної енергосистеми дає змогу коригувати прогнозні коефіцієнти приросту (спаду) електроспоживання по кожній групі галузей. Таким чином, існує можливість задавати середньострокові сценарії розвитку окремо кожної галузі, що є особливо важливим у сучасний період світової економічної кризи та пов'язаних з нею структурних змін в електроспоживанні.

Розроблені програми середньострокового прогнозування: однорівневого прогнозування електроспоживання ОЕС; дворівневого електроспоживання ОЕС; однорівневого ЕС ОЕС із урахуванням структури ЕС по окремих групах галузей; середньотижневих та місячних максимальних та мінімальних значень електричного навантаження; попередньої статистичної обробки і відображення інформації, об'єднані в єдиний програмний комплекс, що працює на основі розробленої бази даних (організованої засобами СУБД ORACLE), яка автоматично поповнюється технологічною та метеорологічною інформацією.

Розроблені програми середньострокового прогнозування впроваджено у вигляді програмного комплексу в промислову експлуатацію в НЕК «Укренерго». Точність прогнозування місячного електроспоживання та екстремальних значень місячного та середньотижневого навантаження відповідає експлуатаційним вимогам.

Розроблені методика, алгоритм та проведені розрахунки по уточненню граничної **пускової спроможності** ЛЕП, що контролюються, і перетинів [11, 13, 14]. Методика передбачає: моніторинг активного опору ЛЕП у темпі технологічного процесу, визначення та поточний контроль температури проводу; визначення статистичних характеристик, максимальної амплітуди та періоду низькочастотних коливань потужності по ЛЕП, що контролюється; визначення та моніторинг поточного значення запасу граничної потужності, яка передається по ЛЕП, що контролюється, з урахуванням поточних значень температури проводу та максимальної амплітуди низькочастотних коливань.

Виконана розробка нових методик та програмних засобів розрахунку **аварійних режимів** і уставок пристроїв захистів.

Розроблені версії програм автоматизованих розрахунків уставок струмових захистів у мікропроцесорних пристроях REL521 фірми ABB у складних електричних мережах ОЕС України [9, 10]. Перелік розроблених програм:

1. Програми розрахунків уставок максимальних струмових захистів від усіх видів КЗ – двоступінчастих, ненаправлених з уставками фазного струму для всіх видів КЗ і уставками струму нульової послідовності для КЗ на землю (обчислюваними за самостійною розробленою програмою для кожного із ступенів даних захистів і кожного із згаданих вище струмів, що враховуються).

2. Програма розрахунків уставок струмових захистів від КЗ (у тому числі високоомних) на землю – чотириступінчастих, з визначуваною спрямованістю ступенів і уставками струму (а для направлених ступенів – також і напруги) нульової послідовності.

Розроблена методика використання зареєстрованих параметрів аварійних режимів для визначення місць пошкодження (ВМП) повітряних ліній електропередачі (ПЛ) ЕЕС України за допомогою розрахунків аварійних режимів на основі інформаційно-математичних моделей складних електричних мереж ЕЕС [8].

Методика використовує технологію автоматизованих розрахунків КЗ у проміжних («плаваючих») точках (КЗПТ) ПЛ у складних електричних мережах і, поряд з проблемно-орієнтованими таблицями розрахункових аварійних величин – ТРАВ і – безпосередньо місць пошкодження ПЛ, формованими при виконанні згаданих вище розрахунків КЗ за відповідним спеціалізованим програмним забезпеченням [6], передбачає використання для даних розрахунків і рішення задачі ВМП ПЛ також і універсального програмного забезпечення розрахунків аварійних режимів [4, 7]. У його складі: 1. Програма розрахунків струмів КЗ (і неповнофазних відключень); 2. Програма розрахунків складнонесиметричних режимів.

Залучення даного програмного забезпечення (і відповідних розроблених обчислювальних схем) для цілей ВМП ПЛ має ряд достоїнств: можливість ефективного врахування (поряд з ємнісною провідністю, шунтуючими реакторами, складною взаємною індукцією ПЛ і перехідними активними опорами в місці КЗ) також підвищеної топологічної складності і параметрів навантажувального режиму ПЛ; зняття в конкретних розрахунках обмежень на кількість вимірів (селективних і неселективних) і перелік вимірюваних аварійних параметрів (симетричних складових, фазних і міжфазних струмів і напруг, а також міжфазних і фазних дистанційних опорів); допустимість локалізації ВМП на будь-якій ділянці будь-якого «коридору» ПЛ; можливість ефективного врахування одночасних КЗ і обривів (неповнофазних відключень) ПЛ.

Вказане універсальне програмне забезпечення у пропонованій постановці може використовуватися для цілей ВМП як самостійно, так і спільно із спеціалізованими проблемно-орієнтованими програмними засобами (розрахунків ТРАВ і таблиць місць пошкодження ПЛ) [8].

У рамках наукового проекту комплексної програми НАН України «Інтеграція» завершено розробку версії комплексного програмного забезпечення для автоматизованих розрахунків на ПЕОМ уставок захистів у мікропроцесорних пристроях 7SA522 фірми Siemens [15]. Дане програмне забезпечення інтегроване в Програмний комплекс V-VI-50ПЗ автоматизованих розрахунків на ПЕОМ аварійних режимів і уставок РЗ в складних електричних мережах і в його складі упроваджено в промислову експлуатацію в службах релейного захисту і автоматики (СРЗА) Національної електроенергетичної компанії (НЕК) «Укренерго», Центральної, Західної, Південно-Західної, Південної, Дніпровської, Донбаської і Кримської електроенергетичних систем України.

У 2008 р. виконувався (у тому числі за 11 договорами – 7 з вітчизняними і 4 із закордонними енергетичними організаціями) значний обсяг робіт із створення, аналізу і обробки інформаційно-програмної продукції, установки і налагодження розроблених у відділі № 3 ІЕД НАНУ комплексних програмних засобів автоматизованих розрахунків на ПЕОМ аварійних режимів і уставок захистів у складних електричних мережах, надання необхідної науко-

во-технічної допомоги при проведенні цих розрахунків у СРЗА для забезпечення надійної роботи ЕЕС в аварійних умовах і супроводу розробленого програмного забезпечення – на-самперед, в НЕК «Укренерго», у більшості електроенергетичних систем і ряду обленерго України, у електроенергетичних організаціях Росії (насамперед – Північного Кавказу, а також Центру, Уралу і Сходу), Казахстану (ЦДУ і більшості МЕС), Азербайджану, Грузії і Таджикистану.

Загальна кількість публікацій у 2008 р. – 15.

1. *Авраменко В.М.* Удосконалення методу розрахунку самоусталеного режиму електроенергетичної системи та способу використання синхронізованих вимірів напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 24.
2. *Авраменко В.М., Арістов Ю.В., Васецький Ю.М., Мазуренко І.Л., Черненко П.О.* Деякі області ефективного використання надпровідних індуктивних накопичувачів (НПН) в енергетичних системах України // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.3. – С. 43–48.
3. *Авраменко В.М., Юнесва Н.Т., Сангінова О.В.* Про використання синхронізованих віддалених вимірів напруги для оцінки рівня стійкості енергосистем // Пр. Ін-ту електродинаміки: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – Вип. 18. – С. 47–52.
4. *Авраменко В.Н., Крылов В.А., Прихно В.Л., Черненко П.А.* Развитие методов и программных средств моделирования сложных ЭЭС для задач АСДУ энергосистем // Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 7. – С. 54–69.
5. *Кириленко А.В., Прихно В.Л., Черненко П.А.* Разработка иерархического оперативно-управляющего комплекса и внедрение его в энергообъединении Украины // Наука та інновації. – 2008. – Т.4, № 6. – С. 12–25.
6. *Крылов В.А. и др.* Программное обеспечение ПЭВМ с использованием технологии ТРАВ КЗПТ для ОМП ВЛ в сложных электрических сетях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 19–20.
7. *Крылов В.А. и др.* Комплексное программное обеспечение (V-VI-50ПЗ) автоматизированных расчетов на ПЭВМ аварийных режимов и уставок РЗ в сложных электрических сетях // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 8. – С. 9–10.
8. *Крылов В.А. и др.* Программное обеспечение ПЭВМ с использованием технологии автоматизированных расчетов КЗПТ для ОМП ВЛ в сложных электрических сетях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 22. – С. 7–10.
9. *Крылов В.А. и др.* Программные средства для автоматизированных расчетов на ПЭВМ уставок защит в микропроцессорных устройствах REL521 фирмы АВВ в сложных электрических сетях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 18–19.
10. *Крылов В.А.* Исходные условия и методические основы автоматизированных расчетов на ПЭВМ уставок защит в микропроцессорных устройствах REL521 фирмы АВВ в сложных электрических сетях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 17–18.
11. *Черненко П.А.* Оперативное определение и мониторинг пропускной способности высоковольтных линий // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 12–13.
12. *Черненко П.А., Мартынюк А.В., Заславский А.И.* Среднесрочное иерархическое прогнозирование электропотребления энергообъединения // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки», 2008. – Ч.4. – С. 25–30.
13. *Черненко П.О.* Оперативне уточнення граничної потужності, що передається високовольтними лініями енергосистеми // Мат. наук.-практ. конф. за міжнар. участю «Європейські орієнтири муніципального управління», Київ. – 2008. – Ч.2. – С. 216–219.
14. *Черненко П.О.* Статистична обробка та аналіз нерегулярних коливань перетоків потужності по лініях електропередачі високої напруги // Наук. вісн. Академії муніципального управління. – 2008. – Вип. 1. – С. 70–82.
15. *Черненко П.О., Мартинюк О.В.* Середньострокове дворівневе прогнозування електричного споживання енергооб'єднання // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. – 2008. – №6. – С. 50–55.