

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА 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 УСТЕ.

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 (СМІР). 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 – іміта-

ційного 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 СМПП 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 підзадач: 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 СМПП, 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 СМПП. У рамках проекту планувалася розробка програмного забезпечення, орієнтованого на використання інформації, що надходить від СМПП. З жовтня 2008 р. СМЗС ПРТО перебуває в дослідно-промисловій експлуатації в Тюменському регіональному диспетчерському управлінні. Орієнтовний термін здачі системи у промислову 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 засо-

бу 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 **після-аварійного 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 стаціонарного 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 **пропускної 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 АВВ 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 «кори-

дору» 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 науково-технічної допомоги при проведенні цих розрахунків у СРЗА для забезпечення надійної роботи ЕЕС в аварійних умовах і супроводу розробленого програмного забезпечення – насамперед, 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.

Публікації

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.