

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ ОЕС УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ НОВИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

В.М.Авраменко¹, докт.техн.наук, **В.О.Крилов**², канд.техн.наук, **П.О.Черненко**³, канд.техн.наук, **В.Л.Прихно**⁴, канд.техн.наук, **О.В.Мартинюк**⁵, канд.техн.наук, **Н.Т.Юнєєва**⁶
^{1,2,3,4,5,6} – Інститут електродинаміки НАН України,
пр-т Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

*Мета публікації – дати огляд основних результатів науково-дослідної роботи, яка виконувалася за планом НАН України у 2006–2010 р.р.**

Представлено коротку характеристику методик і програмного забезпечення: використання фазових кутів напруги для оцінювання стану та поточного рівня статичної стійкості у перетинах енергосистеми; автоматизованих розрахунків на персональних комп'ютерах струмів короткого замикання у вузлах складної електричної мережі ЕЕС та уставок захистів у мікропроцесорних пристроях REL521 фірми ABB, якими оснащено повітряні лінії 750..110 кВ; середньострокового прогнозування електроспоживання та електронавантаження ОЕС України; оперативного усунення порушень режимних обмежень в елементах енергосистеми. Бібл. 10, рис. 1.
Ключові слова: електроенергетична система, диспетчерське керування, релейний захист, мікропроцесорний пристрій, аварійний режим, стійкість, оцінювання стану, прогнозування навантаження, синхронізовані вимірювання напруги, математичне моделювання, програмне забезпечення.

Постійний розвиток технічних засобів, які використовуються для керування сучасними енергетичними системами та об'єднаннями, створює можливості для підвищення надійності їхнього функціонування і, водночас, вимагає створення методик, алгоритмів і програмних засобів, які забезпечують реалізацію цих можливостей. Саме на це була спрямована НДР «Система-4» [2].

Одним з нових перспективних засобів телекомунікаційних технологій в енергетиці є синхронізоване з високою точністю вимірювання та реєстрація фазових кутів напруги у віддалених вузлах електричної мережі енергосистеми. Відповідно однією з задач даної НДР було дослідження можливості використання таких вимірів для контролю рівня статичної стійкості Об'єднаної енергосистеми України, а також для оцінювання стану (розрахунку поточного режиму за телевимірами).

Удосконалення мікропроцесорних систем релейного захисту, які використовуються в енергосистемах, вимагає розробки програмного забезпечення, за допомогою якого інженер-технолог може ефективно здійснювати їхню експлуатацію (визначення уставок, аналіз аварійних ситуацій). Важливим завданням у забезпеченні надійної та економічної роботи енергосистеми є прогнозування потужності навантаження та об'ємів електроспоживання. Оперативне усунення порушень режимних обмежень є дієвим засобом запобігання розвитку аварій в енергосистемах. Усе це вимагає створення відповідних методик і програмного забезпечення у складі АСДУ.

1. WAM-системи – новий засіб контролю режимів великих енергетичних систем.

WAM-системи (від англ. Wide Area Measurement systems) забезпечують синхронізований вимір і реєстрацію фазових кутів напруги у віддалених вузлах електричної мережі електроенергетичних систем (ЕЕС) і цій проблемі приділяється велика увага. Синхронізація у часі миттєвих значень напруги у пристроях WAM (українська аббревіатура – СМПП – система моніторингу перехідних режимів) здійснюється з великою точністю (до 1 мкс) за допомогою супутникової системи глобального позиціонування GPS (Global Positioning System). Це дозволяє, перерахувавши проміжок часу у градуси синусоїди еталонної частоти, визначити фазовий кут відносно єдиної позначки – умовного нуля.

Завдяки тісному зв'язку кутів векторів напруги у комплексній площині і кутів відхилення ротора від певної вісі, яка синхронно обертається, фазові кути напруги є джерелом інформації про режим ЕЕС в аспекті її стійкості. Як наслідок, використання фазових кутів напруги створює мож-

© Авраменко В.М., Крилов В.О., Черненко П.О., Прихно В.Л., Мартинюк О.В., Юнєєва Н.Т., 2011

* За результатами НДР "Розробити методи математичного моделювання та програмні засоби для забезпечення надійності та живучості Об'єднаної енергосистеми України з використанням нових можливостей інформаційної та телекомунікаційної техніки" («Система-4»).

ливості для розв'язання низки важливих для забезпечення стійкості енергосистем проблем, зокрема, верифікації моделей динаміки ЕЕС, оцінювання поточного стану та рівня стійкості енергосистеми [1].

Найбільш ефективним у задачі оцінювання стану є метод зважених найменших квадратів. При його вживанні збалансований електричний режим визначається в результаті мінімізації цільової функції, яка у матричній формі має такий вигляд:

$$F(U) = [\bar{V} - V(U)]^T R [\bar{V} - V(U)], \quad (1)$$

де \bar{V} – n -мірний вектор вимірюваних параметрів режиму; $V(U)$ – вектор-функція розрахункових параметрів режиму; R – діагональна матриця вагових коефіцієнтів розмірності $n \times n$.

У цільовій функції задачі оцінювання стану використовуються вагові коефіцієнти, що характеризують точність вимірів. Проте, участь в одній і тій самій функції абсолютно різних за фізичною природою, але сильно залежних один від одного величин (наприклад, активних потужностей і кутів), викликає складнощі з обґрунтованою установкою вагових коефіцієнтів. Для визначення вагових коефіцієнтів при вимірах кутів запропоновано підхід, заснований на виконанні допоміжних тестових розрахунків, які дозволяють співвіднести зміни вузлових потужностей та фаз напруг.

Для мінімізації функції (1) застосовується метод Ньютона. Лінеаризація нелінійних залежностей $V(U)$ приводить до необхідності знаходження мінімуму квадратичної функції (2) на кожній ітерації обчислювального процесу

$$F = [\Delta V^{(i)} - J^{(i)} \Delta U]^T R [\Delta V^{(i)} - J^{(i)} \Delta U], \quad (2)$$

де i – номер ітерації; $J^{(i)} = \partial v / \partial u$ матриця Якобі, розрахована на i -ій ітерації.

Розроблена методика врахування вимірів струмів і вимірів фаз напруги реалізована у програмному комплексі КОСМОС. Випробування в промислових умовах показало, що використання додаткових вимірів позитивно позначається на якості розрахунків [4].

Галузевий керівний документ “ГКД 34.20.575-2002. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки” передбачає перевірку нормативних вимог щодо статичної та динамічної стійкості. У тих випадках, коли область статичної аперіодичної стійкості близька до області існування усталеного режиму, допускається обмежуватися перевіркою існування режиму. У практиці планування режимів енергетичних систем і об'єднань саме останній спосіб визначення граничних за стійкістю режимів є основним, причому, ознакою існування режиму приймається збіжність ітераційного процесу розрахунку усталеного режиму на траєкторії обваження режиму. У даній роботі передбачається орієнтація на контроль статичної стійкості ОЕС за критерієм існування режиму за умов обваження визначених перетинів. Іншими словами, за границю статичної стійкості системи приймається граничний електричний режим, який може існувати у мережі змінного струму згідно із законами електротехніки.

Обваження режиму шляхом перерозподілу покриття навантаження (іншими словами, генерації) між станціями по різні боки перетину спричиняє збільшення потужності, яка передається по перетину, і одночасно – збільшення взаємних кутів напруги у вузлах електричної мережі по різні боки перетину. Однак для реальної енергосистеми проблема полягає у тому, що, по-перше, перетин утворюють кілька ліній і, по-друге, у проміжних точках, як правило, є навантаження, і для цього реального випадку треба знайти такі пари вузлів, використання взаємних кутів яких дозволить найкращим чином відобразити потужність у перетині.

Таким чином, постає задача [3] знайти залежність потужності у перетині $P_{\Pi} = f(x_i)$, де x_i – вимірювані режимні параметри, склад яких треба бути визначити. Якщо сформована функція буде з високою точністю апроксимувати знайдену розрахунком сукупність $P_{\Pi}^j = f(x_i^j)$, де j – номер кроку обваження, це дозволить з підвищеною точністю визначити P_{Π} , яка в умовах оперативного керування відповідає виміряним з високою точністю кутам.

Функцію апроксимації будемо шукати у вигляді степеневого поліному $P_{\Pi} = \sum a_i^{(k)} \cdot x_i^k + a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$, де i, j – номер режимного параметра, $k=0,1,2$ – показник степені. Виходячи з фізичних міркувань (і цей висновок підтвердили розрахунки), можна обмежитися найбільшим $k=2$, але обов'язково серед членів суми повинен бути нелінійний член x_i^2 , або $x_i \cdot x_j$. Висновки досліджень:

1. Використання тільки одного взаємного кута дає похибку апроксимації, яка у 3–5 разів більша, ніж з використанням двох кутів.

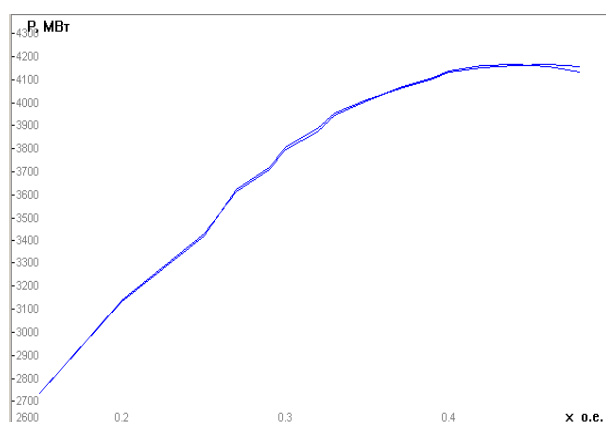
2. Кращі результати маємо з використанням одного нелінійного (x_i^2 або $x_i \cdot x_j$) та двох лінійних членів.

3. Кращий результат у серії розрахунків, яка передбачає два вузли з одного боку перетину, – це шини станцій, з яких видається потужність у перетин, і протилежний вузол знаходиться на границі перетину, – у 1,8 разів кращий, ніж кращий варіант серії, яка відповідає встановленим на даний момент реєстраторам. Цей результат – середньоквадратичне відхилення 6.11 МВт, або 0.15 % від $P_{гр}$ можна вважати цілком задовільним.

Застосування викладеної методики визначення рівня статичної стійкості ОЕС України у перетині з використанням синхронізованих вимірів фазових кутів напруги дозволило визначити доцільні місця розташування мікропроцесорних реєстраторів для моніторингу рівня стійкості ОЕС [8].

Для досліджуваного режиму перетину Захід–Вінниця о 10 год. 29 хв. 15 квітня 2008 р. за розрахунком ПК «КОСМОС» потужність перетину $P_{пер}=920+638+254+533+382=2727$ МВт. Величина граничної потужності за критерієм існування режиму визначена (обваженням за кутом на кінцевій частині траєкторії) $P_{грн.}=4164$ МВт. Функція апроксимації потужності перетину в залежності від взаємних кутів $\theta_{РА-Вн}$ і $\theta_{ХА-Вн}$ має такий вигляд: $P_{пер.} = 604.45 - 2.3\theta_1^2 + 133.16\theta_1 + 78.55\theta_2$.

На рисунку показано траєкторію обваження як функцію узагальненого кута перетину у відносних одиницях: $x(\text{в.о.}) = \theta_{пер.} / \theta_{\text{макс. ідеал.}}$ ($\theta_{985-827} = \theta_{РА-Вн} = \theta_1$; $\theta_{808-827} = \theta_{ХА-Вн} = \theta_2$), де $\theta_{пер.}$ – узагальнений кут перетину, град., $\theta_{\text{макс. ідеал.}}$ – відстань до границі області існування режиму в ідеальній схемі,



$$\theta_{пер.} = \sqrt{(\theta_1^2 + \theta_2^2)}.$$

Середньоквадратична похибка апроксимації: $\sigma = 8.64$ МВт $= 0.002 P_{\text{макс.}}$. Вона цілком задовільна і забезпечується синхронізованою реєстрацією фазових кутів напруги на шинах 750 кВ Рівненської і Хмельницької АЕС та ПС «Вінниця-750».

З використанням третього взаємного кута $\theta_3 = \theta_{ХАЕС} - \theta_{Одеса}$ ($\theta_{Одеса}$ – кут на шинах ПС-330 кВ Ново-Одеська) похибку можна зменшити до 0.15%. У цьому випадку функція апроксимації має вигляд $P = 335.5 + 113.93\theta_1 - 2.71\theta_1\theta_3 + 179.39\theta_2$, де $\theta_1 = \theta_{РАЕС-Вн}$, $\theta_2 = \theta_{ХАЕС-Вн}$, $\theta_3 = \theta_{ХАЕС} - \theta_{Одеса}$.

2. Методики та програмне забезпечення автоматизованих розрахунків аварійних режимів ЕЕС і вибору уставок захистів у мікропроцесорних пристроях REL521 фірми АВВ.

Розроблений в ІЕД НАН України програмний комплекс V-VI-50ПЗ реалізує всі технологічні розрахунки (струмів КЗ, складнонесиметричних режимів, еквівалентів, уставок типових і мікропроцесорних захистів, місць пошкодження повітряних ліній (ПЛ) та ін.) на основі тих, що зберігаються на магнітному диску (МД) базових інформаційно-математичних моделей (БММ) складних і об'ємних електричних мереж електроенергетичних систем та їхніх об'єднань [5].

БММ враховує необхідні в сучасній розрахунковій практиці чинники: складну взаємну індукцію, ємнісну провідність і шунтуючі реактори ПЛ, відмінність ЕРС генераторів, дійсні коефіцієнти трансформаторів і автотрансформаторів, комплексні (активно-реактивні) і нульові опори елементів електричної мережі; містить для кожної з послідовностей – прямої і нульової – позначення віток (номери вузлів, що сполучаються ними, а в разі завдання – також номери паралельності віток) і параметри (поздовжні та поперечні провідності, ЕРС, коефіцієнти трансформації), присутні у вітках; перетворену по Гаусу (трикутну) матрицю вузлових провідностей (її ненульові елементи), а для прямої послідовності – також вузлові напруги вихідного (доаварійного) режиму і спільну для обох послідовностей БМН – базову модель характеристик («найменувань») вузлів (їхні номери, типи, назви).

З метою оптимізації витрат машинного часу при операціях з вищезгаданими компонентами БММ (у ході виконання на її основі необхідних технологічних розрахунків) для кожного з цих компонентів при побудові БММ формується відповідна спеціалізована інформаційно-пошукова система, що входить до складу БММ і містить необхідні адресні відображення і характеристики інформаційних масивів, що забезпечують бажану оптимізацію.

У програмному забезпеченні обслуговування БММ раніше було реалізовано також можливість автоматизованого попарного зіставлення (у спеціальних підрежимах, що зберігаються на МД) БММ з видачею топологічних і параметричних відмінностей між собою кожної з послідовностей і

БМН цих БММ, що дозволяло автоматизованим чином досить повно ідентифікувати дані БММ у частині виявлення їхніх порівняльних особливостей.

У подальшому відповідні програмні модулі були адаптовані і безпосередньо до «радикальних» підрежимів, що забезпечило автоматичне порівняння між собою вихідної і скоригованої БММ з істотним підвищенням в єдиному технологічному циклі візуалізації змін БММ, обумовлених комутаціями цих «радикальних» підрежимів.

Продовженням робіт у даному напрямку стала реалізація автоматизованого порівняння між собою компонентів конкретної БММ – її прямої та нульової послідовностей і БМН. Проведення такого порівняння бажано при ревізії стану даної БММ і виявленні наявних відмінностей в її компонентах, природно очікуваних, які можуть і повинні зберігатися в БММ, і тих, які доцільно і навіть необхідно з БММ усунути, щоб уникнути помилок при проведенні на її основі поточних технологічних розрахунків.

Захисти в мікропроцесорних пристроях REL521 фірми АВВ використовують комплексні коефіцієнти компенсації, дистанційні опори прямої послідовності, дистанційні опори нульової послідовності, фазні дистанційні опори, компенсовані струмами нульової послідовності за допомогою комплексних коефіцієнтів компенсації.

У рамках теми «Система-4» розвинуто методику і у складі відповідних названих програм розроблено програмні модулі, що дозволяють розраховувати також і ці додаткові параметри.

Для обчислення комплексних коефіцієнтів компенсації реалізовано два наступні співвідношення:

$$\dot{K}_k = K_\partial + jK_M = \frac{\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1}{3Z_1} = \frac{(R_0 + jX_0) - (R_1 + jX_1)}{3(R_1 + jX_1)}, \quad (3)$$

де $\dot{K}_k, K_\partial, K_M$ – комплексний коефіцієнт компенсації і його дійсна та уявна складові; $\dot{Z}_1, R_1, X_1, (\dot{Z}_0, R_0, X_0)$ – дистанційний опір прямої (нульової) послідовності і його дійсна та уявна компоненти

$$\dot{K}_k = \left(\frac{\dot{U}_A^{(1)} i_A^{(3)} - i_A^{(1)}}{\dot{U}_A^{(3)}} \right) (3I_0^{(1)})^{-1}, \quad (4)$$

де величини у даному співвідношенні – відповідно фазні напруги і струми та потроєні струми нульової послідовності в місці установки захисту при відповідно трифазному КЗ і однофазному КЗ в заданому вузлі (в заданій або винайденій точці).

При розрахунках \dot{K}_k за (3) у вихідній інформації задаються: параметри R_1, X_1, R_0, X_0 ; а при обчисленні \dot{K}_k за (4) – вітка із захистом, точка, де задано КЗ і підрежими з трифазними комутаціями в електричній мережі, в яких обчислюється \dot{K}_k . Відповідні програмні модулі, що реалізують співвідношення (3) і (4), інтегровано в програму розрахунків коефіцієнтів компенсації, котра дозволяє тепер обчислювати як коефіцієнти компенсації Siemens, так і \dot{K}_k .

В рамках теми «Система-4» реалізовано додаткові співвідношення для обчислення параметрів, що використовуються захистами в мікропроцесорних пристроях REL521,

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1 = U_1^{(3)} / I_1^{(3)}, \quad (5)$$

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1 = R_{A\text{комп}}^{(1)} + jX_{A\text{комп}}^{(1)} = \dot{Z}_{A\text{комп}}^{(1)} = \dot{U}_A^{(1)} (I_A^{(1)} + \dot{K}_k 3I_0^{(1)})^{-1}, \quad (6)$$

$$\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0 = \dot{Z}_1 (1 + 3\dot{K}_k), \quad (7)$$

де $Z_{A\text{комп}}^{(1)}, R_{A\text{комп}}^{(1)}, X_{A\text{комп}}^{(1)}$ – компенсований струмами нульової послідовності за допомогою комплексного коефіцієнта компенсації фазний (фази А) дистанційний опір і його дійсна та уявна компоненти при однофазному КЗ (в фазі А), які за даних умов дорівнюють відповідним дистанційним опорам прямої послідовності; \dot{Z}_0, R_0, X_0 – дистанційний опір і його дійсна та уявна компоненти нульової послідовності.

Склад комплексного програмного забезпечення автоматизованих розрахунків на ПЕОМ уставок захистів у мікропроцесорних пристроях REL521 фірми АВВ [2,6]:

– програми розрахунків уставок максимальних струмових захистів (двохступінчатих, ненаправлених, із вимірами фазних струмів при всіх видах КЗ і струмів нульової послідовності при КЗ на землю);

– програма розрахунків уставок струмових захистів нульової послідовності від КЗ на землю (чотириступінчастих з направленістю ступеней, яка визначається і вимірами струмів, і напруг нульової послідовності);

– програма розрахунків уставок дистанційного вимірювального органу при міжфазних КЗ – ДОМ (із п'ятьма незалежними ступенями);

– програма розрахунків уставок дистанційного вимірювального органу при КЗ на землю – ДОЗ (із п'ятьма незалежними ступенями).

У мікропроцесорних пристроях REL521 програми ДОМ, ДОЗ, хоч і мають дещо подібне, проте функціонують повністю незалежно, із самостійними, ніяк не пов'язаними між собою по горизонталі зонами спрацьовування. З цієї причини їхні уставки розраховуються незалежно і потребують для їхнього обчислення наявності самостійних програм: однієї – для розрахунків уставок ступенів ДОМ; другої – для розрахунків уставок ступенів ДОЗ, що і було виконано.

Зупинимось на дистанційному захисті в мікропроцесорних пристроях REL521. Як вказувалося вище, ДОМ, ДОЗ мають кожний по п'ять ступенів спрацьовування. Усі вони, крім четвертого ступеня, направлені уперед, а четвертий ступінь – назад.

Зона спрацьовування кожної з упереднаправлених ступіней подається полігональною багатокутною (в загальному випадку – п'ятикутною) характеристикою, що обмежується: двома похилими прямими напрямку, які виходять із початку координат відповідно в другий і четвертий квадранти, далі – прямою в першому і другому квадрантах, паралельною вісі абсцис, і двома похилими прямими: одна – у другому, інша – у першому і четвертому квадрантах, паралельними лінії імпедансного кута FL ПЛІ (із розрахунковим дистанційним захистом) і рівновіддаленими від цієї лінії за умови її проходження через початок координат. Зона спрацьовування четвертого ступеня ДОМ і ДОЗ, яка направлена назад, аналогічна вищеописаній, але повернена до останньої на 180° по відношенню до початку координат.

Вихідна інформація для автоматизованих розрахунків і перевірки уставок кожного захисту в пристроях REL521 розміщується у файлах із ключовими фразами-ідентифікаторами даного захисту. Кожне Завдання на розрахунок будується за ієрархічним принципом і у загальному випадку містить: перелік підрежимів із трифазними комутаціями; ідентифікатор і вітку розрахункового захисту (а у разі потреби – додаткову інформацію з даного захисту); ідентифікатор і номер його розрахункового ступеня, команди обчислення аварійних величин, розрахунків і перевірки уставок даного ступеня; ідентифікатор і номер наступного розрахункового ступеня даного захисту, її команди і т.п.; аналогічну інформацію для інших захистів цього виду (в інших пристроях REL521), якщо їхні уставки розраховуються в даному Завданні.

Розрахункові команди, передбачені в розроблених програмах для кожного захисту в пристроях REL521: «Відстройка», «Узгодження», «Забезпечення необхідної чутливості», «Перевірка чутливості», «Зона охоплення».

Ці команди в загальному випадку містять їхні ідентифікатори, елементи з несиметріями (у першу чергу – з КЗ) і їхніми видами та номери розрахункових підрежимів, а також іншу допоміжну інформацію, а команда «Узгодження» – також і інформацію по суміжних елементах, їхнім захистам і уставкам, за узгодженням з якими даною командою визначаються уставки розрахункового ступеня.

Програмний комплекс V-VI-50ПЗ із програмним забезпеченням автоматизованих розрахунків уставок захистів на ПЕОМ в мікропроцесорних пристроях REL521 фірми АВВ передано і впроваджено в промислову експлуатацію в СРЗА НЕК «Укренерго», Центральної, Західної, Південної, Донбаської, Кримської і Дніпровської ЕС для розрахунків уставок захистів у складних електричних мережах 110–750 кВ ОЕС України.

3. Середньострокове прогнозування споживаної електроенергії та екстремальних значень активної потужності енергооб'єднання.

Середньострокові прогнози режимів роботи енергооб'єднання (ЕО) використовуються для вирішення задач планування виробництва електроенергії, балансу потужності і енергії регіональних енергосистем (РЕС) та ЕО, створення графіків ремонту основного обладнання, розрахунку оптимальних режимів ГЕС із водосховищами довготривалого регулювання, планування забезпечення ТЕС паливом і т.п.

Проведені в Інституті електродинаміки дослідження виявили, що для вирішення задачі середньострокового прогнозування необхідно використовувати комплексний багаторівневий підхід, що включає вирішення наступних задач: однорівневе прогнозування місячного споживання електроенергії (СЕ) енергооб'єднання, дворівневе прогнозування СЕ ЕО за даними про електроспоживання регіональних енергосистем, галузеве прогнозування СЕ за даними електроспоживання по окремих

групах галузей, прогнозування середньотижневих та місячних максимумів і мінімумів електричного навантаження [9,10].

У результаті проведених досліджень розроблено метод середньострокового прогнозування місячного електроспоживання із урахуванням структури енергосистеми, метеорологічних та технологічних факторів впливу. Розроблена модель місячного електроспоживання передбачає адитивний розклад СЕ на окремі компоненти:

$$\bar{W}_i = W_i^B + W_i^{Tp} + W_i^C + W_i^M + W_i^3, \quad (8)$$

де \bar{W}_i – СЕ, розраховане для середньомісячного робочого, суботнього та недільного днів i -го місяця передісторії із урахуванням різких змін у роботі енергоємних підприємств; W_i^B – базова компонента СЕ, що визначає середньобогаторічне СЕ на інтервалі передісторії; W_i^{Tp} – складова помісячного росту/спаду СЕ; W_i^C – сезонна компонента СЕ, що описує його річні циклічні коливання; W_i^M – метеорологічно чутлива компонента СЕ, що характеризує вплив метеорологічних чинників (температури та хмарності); W_i^3 – залишкова компонента СЕ, що визначає похибку обраної моделі розкладу.

Новим у цьому підході є те, що компоненти виокремлюються не з фактичного СЕ, а з відповідним чином перетвореного, в якому враховані тижнева нерівномірність добового СЕ енергосистеми (тобто календарні чинники) та різкі зміни в СЕ енергоємними підприємствами.

Сезонну компоненту СЕ отримуємо вилученням із сумарного СЕ базової, трендової та метеорологічної компонент

$$W_i^C = \bar{W}_i - \bar{W}_i^B - \bar{W}_i^T - \sum_{k=0}^{k=n} a_k (T_i - T_i^{CBP})^k, \quad (9)$$

де n – гранична степінь поліноміального регресійного рівняння.

Дослідження виявили, що сезонна компонента СЕ середньомісячних робочого/суботнього та недільного днів задовільно описується моделлю авторегресії та ковзного середнього (АРКС) з періодом 12 виду (1.0.0)(2.0.0), наведеною в [9]. Зокрема, значення функцій автокореляції та часткової автокореляції залишкових компонент електроспоживання, отриманих в результаті застосування моделі АРКС виду (1.0.0)(2.0.0), знаходяться в довірчому інтервалі, що з ймовірністю 95% підтверджує гіпотезу про адекватність обраної моделі.

Залишкова компонента СЕ W_i^3 характеризує точність запропонованої адитивної моделі розкладу (8), визначає величину похибки прогнозу та її довірчий інтервал. Виборка W_i^3 перевіряється на відповідність нормальному закону розподілу за критерієм Колмогорова–Смирнова.

Відомо, що температура повітря є одним з найважливіших факторів впливу на СЕ. Основним методом, що застосовується при побудові моделей впливу метеорологічних факторів, є метод регресійного аналізу. Метеорологічна компонента W_i^M рівняння (8) моделює вплив температури на СЕ енергосистеми. Оскільки, як правило, при середньостроковому прогнозі отримати точне значення майбутньої температури неможливо, то як прогнозна температура обирається середньобогаторічна на інтервалі передісторії.

Відповідно, будуються поліноміальні регресійні залежності між відхиленнями електроспоживання і відхиленнями температури для кожного сезону. Розрахунок коефіцієнтів полінома здійснюється методом найменших квадратів

$$\Delta W_i = W_i - W_i^{CBP} = \sum_{k=0}^{k=n} a_k (T_i - T_i^{CBP})^k. \quad (10)$$

Таким чином, на відміну від існуючих моделей, що описують залежність ЕН та СЕ від температури, у запропонованій враховується сезонність її впливу. Для цього в моделі впливу температури виділяється три підмоделі, що охоплюють три інтервали температур: зона нечутливості (де ЕН та ЕС нечутливе до зміни температури повітря), умовно зимовий, в якому відображена від'ємна кореляційна залежність між ЕС та температурою повітря, та умовно літній, в якому відображена пряма кореляційна залежність між зазначеними параметрами.

Для підвищення кореляційного зв'язку температури й екстремального електричного навантаження та електроспоживання для кожного сезону вводиться так звана «ефективна» температура, що враховує інерційність впливу температури навколишнього середовища на споживані потужність та енергію. Ефективна температура розраховується за допомогою формули

$$T_{ef}^j = aT^j + (1-a)T^{j-1}, \quad (11)$$

де a – ваговий множник, j – номер доби в році.

У загальному випадку шукана регресійна залежність, що моделює вплив зміни температури повітря на СЕ та навантаження енергосистеми, описується нелінійною багатofакторною регресійною залежністю. Для вибору оптимальної регресійної моделі для кожного сезону на основі методу групового урахування аргументів (МГУА) були проведені дослідження, відповідно до яких дані, що досліджуються, розбивалися на навчальну та екзаменаційну виборки. На навчальній за допомогою МНК підбиралися коефіцієнти регресійних залежностей різних видів, які потім перевірялися на екзаменаційній вибірці. За допомогою МГУА встановлено, що для зимового інтервалу доцільно проводити апроксимацію поліномом 4-ї степені ($n=4$), в той час, як на літньому необхідно обмежитися лише квадратичним ($n=2$).

Для забезпечення надійності та ефективності роботи ЕО особливо важливою є інформація про значення сумарного електричного навантаження (СЕН) в екстремальних точках добового графіка в характерні періоди часу: нічного та денного провалів, ранкового та вечірнього максимумів. Розроблена математична модель розрахунку екстремальних значень СЕН містить наступні компоненти:

$$P_{\Sigma}^j(i) = P_{sez}^j(i) + P_{mem}^j(i) + P_{obl}^j(i) + \delta P^j(i), \quad (12)$$

де j – номер доби в році ($j=1-365$); i – фіксована година доби ($i=1-24$); $P_{sez}^j(i)$ – сезонна компонента, що описує сезонні значення СЕН i -ї години j -го дня; $P_{mem}^j(i)$, $P_{obl}^j(i)$ – метеорологічні складові навантаження, що враховують вплив таких змінних параметрів як температура навколишнього середовища та ступінь хмарності відповідно; $\delta P^j(i)$ – випадкова компонента СЕН.

Компонента $P_{sez}^j(i)$ описує зміни погодинних значень СЕН, викликані чергуванням сезонів. Моделювання зазначеної компоненти здійснюється за допомогою методу кусково-поліноміальної апроксимації. Зазначений метод дозволяє проводити поліноміальну апроксимацію значень СЕН на окремо виділених інтервалах згідно з МНК і забезпечує сполучення отриманих функціональних залежностей на границях цих інтервалів.

Слід зазначити, що алгоритм ефективно працює також за умови апроксимації різних інтервалів поліномами різних степенів, що дозволяє краще виявляти особливості зміни значень експериментальних даних на тому або іншому інтервалі.

Дворівнева реалізація методу середньострокового прогнозування енергооб'єднання України передбачає виконання прогнозів СЕ восьми регіональних енергосистем та подальшого сумування отриманих результатів. Щодо інформаційного забезпечення, вказана реалізація методу прогнозування спирається на ієрархічну базу даних. Вирішення задачі дворівневого прогнозування передбачає виконання великого об'єму розрахунків. Для автоматизації цього процесу був розроблений розрахунковий модуль програмного комплексу «КОРАСП». Встановлено, що дворівневий метод забезпечує вищу точність прогнозування місячного СЕ ОЕС України за умови використання середньобаторічної температури у порівнянні із однорівневим. Це пов'язано з більш точним моделюванням впливу метеорологічних та технологічних факторів при такому підході.

За умови суттєвих змін у структурі електроспоживання, наприклад, у зв'язку із застосуванням нових технологій в енергоємних галузях або при зміні темпів і характеру економічного й соціального розвитку окремих регіонів і країни в цілому, структурні методи прогнозування залишаються чи не єдиним адекватним інструментом розрахунку середньострокових прогнозів ЕС.

На добовому контролі в Держенергонагляді України знаходяться 50 енергоємних підприємств, що працюють у режимі безперервного виробничого циклу. Зазначені підприємства вносять значний вклад в електроспоживання ОЕС в цілому, що становить 20–25 % загального СЕ в Україні. Графіки електроспоживання таких підприємств мають різкі відхилення, які викликані впливом технологічних факторів – ремонтом чи аварійним відключенням потужних енергоємних агрегатів підприємства, або економічними факторами, до яких належить, насамперед, кон'юнктура попиту на продукцію підприємства.

Для зазначених факторів триває, відповідно, від одного дня до кількох місяців. Запропоновано алгоритм пошуку і видалення аномальних відхилень добового електроспоживання цих підприємств.

В умовах різких змін у структурі СЕ энергооб'єднання метод прогнозування місячного СЕ на основі прогнозу СЕ по окремих групах галузей може забезпечити вищу точність, ніж одно- та дворівневі методи, наведені вище, в тому разі, коли є додаткова інформація про тенденції СЕ. На основі описаної моделі СЕН і СЕ розроблено програмний комплекс ретроспективного аналізу й середньострокового прогнозування «КОРАСП», який впроваджено у промислову експлуатацію в НЕК «Укренерго».

4. Задача оперативного усунення порушених обмежень параметрів режиму.

Тут досліджено проблему усунення неприпустимих величин параметрів режиму [7]. Порушені обмеження можуть або реально існувати в поточному режимі, або їхні виникнення прогножуються для розвитку режимної ситуації. Незалежно від того, чи є ситуація реальною або прогнозованою, завдання полягає в пошуку оптимальної стратегії ліквідації порушених обмежень. Часто цю задачу називають введенням в допустиму область. У процесі роботи диспетчер енергосистеми контролює порушення допустимих меж наступних параметрів режиму: рівнів напруги на шинах станцій і підстанцій; струмів у лініях електропередачі, трансформаторах і автотрансформаторах; активних потужностей заздалегідь визначених перетинів (груп ліній). За наявності порушених обмежень перелічених вище контрольованих параметрів цільова функція, яку слід мінімізувати, може бути представлена у вигляді суми модулів штрафних доданків

$$F(X) = \sum_{i=1}^n |U_{i_{\min/\max}} - U_i| + \sum_{j=1}^m |P_{j_{\min/\max}} - P_j(X)| + \sum_{k=1}^l |I_{k_{\max}} - I_k(X)|, \quad (13)$$

де X – вектор незалежних змінних; n, m, l – число порушених обмежень.

Порушені обмеження можуть усуватися шляхом залучення до управління устаткування, яке знаходиться в компетенції диспетчера енергосистеми. Команди можуть бути спрямовані на: зміну завантаження джерел активної потужності; зміну завантаження джерел реактивної потужності; перемикання положення анцапф трансформаторів поздовжнього або поздовжньо-поперечного регулювання; включення або відключення реакторів; обмеження споживачів електроенергії.

Систему обмежень задачі складають рівняння балансів активних і реактивних потужностей у вузлах, а також потоків активних потужностей у перетинах та струмів у гілках заступної схеми

$$\text{мережі} \quad \begin{cases} U_{\text{узл}_{\text{випт}}} \leq U_{\text{узл}} \leq U_{\text{узл}_{\text{мак}}} ; \\ P_{\text{узл}}(X) = P_{\text{узл}_{\text{зад}}} ; \\ Q_{\text{узл}}(X) = Q_{\text{узл}_{\text{зад}}} ; \\ P_{\text{сеч}_{\text{мін}}} \leq P_{\text{сеч}}(X) \leq P_{\text{сеч}_{\text{мак}}} ; \\ I_{\text{вет}} \leq I_{\text{вет}_{\text{мак}}} . \end{cases} \quad (14)$$

При розрахунках режимів енергосистем незалежними змінними виступають модулі і фази напруг вузлів. Для розв'язання цієї задачі пропонується розширити склад незалежних змінних за рахунок параметрів регулювання. Таким чином, незалежні параметри оптимізації складуть наступні величини: модулі напруги у вузлах схеми заміщення; фази напруги у вузлах схеми заміщення; генерації активної потужності; генерації реактивної потужності; реактивні потужності реакторів; поздовжні та поперечні складові комплексних коефіцієнтів трансформації; навантаження активних і реактивних потужностей споживачів відповідно до заздалегідь визначених черг. У загальному випадку діапазон зміни незалежних змінних визначається двосторонніми нерівностями: $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$.

Внаслідок нелінійних залежностей вузлових потужностей, потоків у перетинах і струмів у гілках від незалежних змінних нелінійними є як цільова функція (13), так і система обмежень (14). У зв'язку з цим для мінімізації цільової функції доцільно використовувати ітераційний алгоритм, що припускає послідовну заміну нелінійних залежностей лінеаризованими. У результаті таких заміन на кожній ітерації обчислювального процесу повинна вирішуватися задача мінімізації лінійної цільової функції з лінійними обмеженнями. Для цього може бути застосований симплекс-метод, традиційний для задач лінійного програмування. Проте базовий варіант істотно модифіковано з метою урахування специфіки розв'язуваної задачі.

Програму введення режиму в допустиму область, що реалізує описаний алгоритм, включено до складу програмного комплексу КОСМОС, призначеного для виконання оперативних розрахунків

режимів енергосистем на основі телеметричної інформації. Досвід численних розрахунків показав ефективність запропонованого математичного апарату.

Висновки. 1. Розроблено, досліджено і реалізовано як модифікацію програмного комплексу оцінювання стану ЕЕС методику використання фазових кутів напруги, а також вимірів струмів в елементах електричної мережі.

2. Запропоновано і програмно реалізовано методику визначення поточного запасу статичної стійкості у перетині енергосистеми за критерієм існування режиму, яка базується на синхронно вимірних кутах векторів напруги у віддалених вузлах енергосистеми і забезпечує моніторинг поточного рівня стійкості.

3. Розроблено методику і виконано відповідну модифікацію програмного комплексу розрахунку аварійних режимів у складних електричних мережах автоматизованого визначення уставок мікропроцесорного терміналу релейного захисту REL521 фірми ABB, який широко використовується в енергосистемах України на повітряних лініях від 750 до 110 кВ.

4. Запропоновано метод комплексного розв'язання задачі середньострокового (з упередженням від одного місяця до одного-двох років) прогнозування споживання помісячної енергії та екстремальних значень тижневої та місячної потужностей сумарного навантаження енергетичного об'єднання. Ефективність розв'язку досягається завдяки організації як однорівневого, так і дворівневого прогнозування (енергосистема – енергооб'єднання), використанню інтерактивного структурного прогнозування по основних групах галузей господарства, врахуванню у явному вигляді СЕ великих енергоємних споживачів.

5. З використанням методів лінійного програмування розв'язано проблему визначення дій оперативного диспетчерського персоналу енергосистеми щодо усунення порушень режимних обмежень (по струму, нарузі), які (порушення) можуть виникати після великого аварійного збурення в енергосистемі і призводити до широкого розвитку аварійної ситуації.

6. Розроблені при виконанні НДР програмний комплекс розрахунку аварійних режимів складних ЕЕС та визначення уставок МП терміналів REL521 і комплексна програма середньострокового прогнозування електроспоживання та електронавантаження ОЕС України впроваджені в НЕК «Укренерго».

1. *Авраменко В.Н.* Модели, методы и программные средства для расчета и анализа переходных режимов и устойчивости ЭЭС // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2007. – Вип.18. – С. 12–19.

Avramenko V.N. Models, methods and soft ware for a calculation and analysis of transient states and stability of the electric power systems // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – Vol. 18. – P. 12–19. (Rus.)

2. *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.

Avramenko V.N., Krylov V.A., Prikhno V.L., Chernenko P.A. Development of methods and soft ware for simulation complex electric power systems, in the tasks of dispatching control systems of power systems // Enerhetyka ta elektryfikatsiia. – 2008. – № 27. – P. 54–69. (Rus.)

3. *Авраменко В.М., Юнєєва Н.Т., Сангінова О.В.* Про використання синхронізованих віддалених вимірів напруги для оцінки рівня стійкості енергосистем // Праці Інституту електродинаміки. – 2007. – Вип. 18. – С. 47–52.

Avramenko V.M., Yunieieva N.T., Sanginova O.V. About the use of the synchronized remote measurements of voltage for the estimation of stability level of power systems // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – Vol. 18. – P. 47–52. (Ukr.)

4. *Данилин А.В., Демчук А.Т., Жуков А.В., Прихно В.Л.* Система мониторинга запасов устойчивости энергосистемы на основе данных системы мониторинга переходных режимов (СМПР) / Докл. науч.-техн. конф. «Monitoring Of Power System Dynamics Performance», 28–30 апреля 2008, Санкт-Петербург.

Danilin A.V., Demchuk A.T., Zhukov A.V., Prikhno V.L. System of monitoring of supplies of stability reserves of a power system on the basis of information of the system of transient states monitoring (SMPR) // Reports of scientific and technical conference «Monitoring Of Power System Dynamics Performance», on April, 28–30 2008, Sankt-Peterburg. (Rus.)

5. *Крылов В.А.* Модели, методы и программные средства для расчетов и анализа нормальных и аварийных режимов ЭЭС // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2007. – Вип. 18. – С. 19–26.

Krylov V.A. Models, methods and soft ware for calculations and analysis of the normal and emergency states of EPS // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – Vol. 18 – P. 19–26. (Rus.)

6. *Крылов В.А.* Исходные условия и методические основы автоматизированных расчетов на ПЭВМ уставок защит в микропроцессорных устройствах REL521 фирмы ABB в сложных электрических сетях // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – Вип. 20. – С. 17–18.

Krylov V.A. The initial terms and methodical bases of the automated calculations by personal computers of protections settings in the microprocessor devices of Rel521 of the company ABB in the complex electric networks //

Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2008. – Vol. 20. – P. 17–18. (Rus.)

7. Прихно В.Л., Трубицин В.В., Черненко П.О. Задача усунення порушених обмежень на діапазон зміни параметрів режиму як складова частина «порадника диспетчера» // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 41–45.

Prykhno V.L., Trubitsyn V.V., Chernenko P.O. Task of removal of the broken limits of the state parameters as component part of «adviser of dispatcher» // *Visnyk Vynnytskoho Politekhnychnogo Instytutu.* – 2011. – №.1. – P. 41–45. (Ukr.)

8. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф., Авраменко В.М., Прихно В.Л., Черненко П.О. Організація моніторингу режимів енергооб'єднання України та нові можливості розв'язання задач диспетчерського керування // Наука та інновації. – 2009. – Т.5. – № 6. – С. 25–35.

Stohnii B.S., Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Sopol M.F., Avramenko V.M., Prykhno V.L., Chernenko P.O. Organization of monitoring of the states of power pool of Ukraine and new possibilities of decision of tasks of dispatching control // *Nauka ta inovatsii.* – 2009. – Vol.5. – № 26. – P. 25–35. (Ukr.)

9. Черненко П.О., Мартинюк О.В., Заславський А.І. Моделювання і прогнозування електроспоживання та екстремальних значень електричного навантаження енергооб'єднання // Енергетика та електрифікація. – 2009. – №11. – С. 24 – 34.

Chernenko P.O., Martyniuk O.V., Zaslavskiy A.I. Simulation and forcasting of electroconsumption and extreme values of the electric loading of a power pool // *Enerhetyka ta elektryfikatsiia.* – 2009. – № 11. – P. 24 – 34. (Ukr.)

10. Черненко П.А, Мартинюк А.В., Заславский А.И., Денисевич К.Б. Повышение эффективности планирования режимов энергообъединения с использованием комплекса среднесрочного прогнозирования // Электрические сети и системы. – 2009. – № 5. – С. 21–35.

Chernenko P.A, Martyniuk A.V., Zaslavskii A.I., Denisevich K.B. Increase of efficiency of planning of the states of a power pool with the use of program complex of medium-term forcasting // *Elektricheskie seti i sistemy.* – 2009. – №25. – P. 21–35. (Rus.)

УДК 621.311.001.18

В.Н.Авраменко¹, докт.техн.наук, В.А.Крылов², канд.техн.наук, П.А.Черненко³, канд.техн.наук, В.Л.Прихно⁴, канд.техн.наук, А.В.Мартинюк⁵, канд.техн.наук, Н.Т.Юнеєва⁶

^{1,2,3,4,5,6} – Інститут електродинаміки НАН України,

пр-т Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Методи моделювання і програмні засоби для забезпечення надійності і живучості ОЕС України з використанням нових мікропроцесорних пристроїв управління режимами електроенергетических систем

Цель публикации – дать обзор основных результатов НИИР, которая выполнялась по плану НАН Украины в 2006 – 2010 гг. Дана краткая характеристика методик и программного обеспечения: использования фазовых углов напряжения для оценивания состояния и текущего уровня статической устойчивости в сечениях энергосистемы; автоматизированных расчетов на персональных компьютерах токов короткого замыкания в узлах сложной электрической сети ЭЭС и уставок защит в микропроцессорных устройствах REL521 фирмы ABB, которыми оснащены воздушные линии 750...110 кВ; среднесрочного прогнозирования потребляемой энергии и мощности энергообъединения; оперативного устранения нарушений режимных ограничений в элементах энергосистемы. Библиография, рис. 1.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, диспетчерское управление, релейная защита, микропроцессорное устройство, аварийный режим, устойчивость, оценивание состояния, прогнозирование нагрузки, синхронизированные измерения напряжения, математическое моделирование, программное обеспечение.

V.M.Avramenko¹, V.O.Krylov², P.O. Chernenko³, V.L.Prykhno⁴, A.V.Martyniuk⁵, N.T.Yunieieva⁶

^{1,2,3,4,5,6} – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Simulation methods and soft ware for maintenance of reliability and survivability of the electric power pool of Ukraine with use of new microprocessor devices electric states control for the electric power systems

The object of an article is to present basic results of a scientific work according to plans of NAS of Ukraine. They are: methodics of the use of voltage phasors (WAM-systems) for the electric power systems (EPS) state estimation and for estimation of steady state stability level in the EPS sections; methodics and software for the automated calculations by the personal computers of short circuit currents in the nodes of complex electric network of EPS and for determination of settings of EPS protection units in the microprocessor devices of REL521 the company ABB, which are used for 750...110 kV overhead lines; for medium-term forecasting of electro-consumption and electro-loading of UPS of Ukraine; for operative removal of the broken limits of electric parameters in power system elements. Reference 10, figures 1.

Key words: electric power system, dispatching control, relay protection, microprocessor devise, emergency state, stability, state estimation, load forecasting, synchronized voltage measuring, mathematical simulation, soft ware.

Надійшла 14.01.2011

Received 14.01.2011