

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 621.311.001.24

Рогозін Олександр Георгійович

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ОПЕРАТИВНИХ  
МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

05.14.02 - Електричні станції (електрична частина),  
мережі, електроенергетичні системи та  
управління ними

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1993

№ 27.06

Робота виконана в галузевій науково-дослідній лабораторії автоматизація управління електричними мережами вищих класів на факультеті електроенерготехніки та автоматики Київського політехнічного інституту.

ЛНБ України ім. В. Стефаника  
00814237 (P)



- Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Шербина Ю. В.
- Науковий консультант - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Качанова Н. А.
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук Баранов Г. Л. кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Прихно В. Л.
- Ведуче підприємство - ОЦ Київенерго, м. Київ

Захист дисертації відбудеться "31" має 1993 р. в 15 год. 00 кв. на засіданні спеціалізованої Ради КОБВ. 14. 05 по присудженню вченого ступеня кандидата технічних наук у Київському політехнічному інституті (корпус 20, ауд. ).

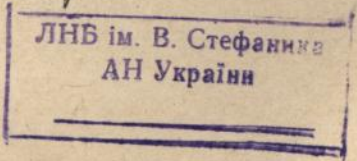
Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчених печаткою, просимо надсилати за адресою : 252056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, КПІ, Вченому секретарю.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розіслано "15" августа 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради  
К. Т. Н. : професор

Б. М. Кондра



## АНОТАЦІЯ

Метою дисертаційної роботи є удосконалення формування моделей електроенергетичних систем (ЕЕС) у реальному часі на основі використання статистичних методів.

Головні завдання роботи полягали в:

1. Проведенні аналізу сучасних методів оперативного еквівалентування і засобів компенсації дефіциту телевимірювань (ТВ).
2. Розробці та дослідженні методів урахування топології локально спостережних районів мережі при формуванні їх еквівалентних моделей у реальному часі.
3. Розробці методу дослідження структури міжсистемних перетоків активної потужності в енергосистемі.
4. Розробці та дослідженні методів аналізу чутливості результатів оперативних розрахунків щодо похибок ТВ.
5. Розробці методу синтезу оптимальної мережі ТВ ЕЕС.

Автор захищає:

1. Спосіб урахування топології еквівалентованих районів при використанні еквівалентних моделей для оперативних розрахунків, що опирається на процедуру багатомірної класифікації параметрів еквівалентних моделей.
2. Методику дослідження та спосіб графічного відображення структури міжсистемних перетоків активної потужності в енергосистемі на основі компонентного аналізу.
3. Спосіб обчислення матриць чутливості результатів оперативних розрахунків щодо похибок ТВ з використанням методу сингулярного розкладу.
4. Метод синтезу оптимальної мережі телеметрії ЕЕС.
5. Результати дослідження розроблених моделей та алгоритмів, що підтверджують практичну можливість їх використання для оперативного управління режимами ЕЕС.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**А к т у а л ь н і с т ь р о б о т и.** Специфіка енергетичного виробництва та складність сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) зумовлюють необхідність подальшого розвитку автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ). Розв'язання оперативних задач АСДУ базується на телеметрії і вимагає використання моделей, алгоритмів та програм, які враховують технологічні особливості цієї

інформації - первісну чи тимчасову неповноту, наявність похибок. Дисертаційна робота присвячена розробці методів компенсації дефіциту ТВ та формування оптимальної мережі телеметрії.

Методи дослідження. Використано матричний апарат, сингулярний аналіз, методи математичної статистики та теорію розпізнавання образів.

#### Наукова новизна.

1. Розроблено метод урахування топології еквівалентованого району електричної системи за допомогою теорії розпізнавання образів. Проведено аналіз можливих критеріїв якості класифікації комутаційних ситуацій і запропоновано застосування двомірного відображення для їх класифікації.

2. Показано можливість застосування методу статистичного еквівалентування для автоматичної компенсації недостатніх ТВ, визначена можлива галузь використання методу.

3. Досліджено використання сингулярного розкладу для отримання стійких регресійних моделей, які необхідні у статистичному еквівалентуванні режимів ЕЕС.

4. Запропоновано метод статистичного дослідження структури транзитів активної потужності в енергосистемах, спосіб підрахунку їх впливу на втрати потужності та електроенергії, спосіб графічного відображення структури міжсистемних перетоків.

5. Запропоновано методи отримання матриць чутливості результатів опіювання стану (ОС) режиму ЕЕС щодо похибок ТВ з використанням сингулярного розкладу, використання матриць чутливості для вибору місць установки ТВ або псевдовимірювань (ПВ), яких бракує, синтезу оптимальних систем телеметрії.

Практична цінність. Реалізація запропонованих у роботі статистичних методів формування оперативних моделей ЕЕС дозволяє підвищити ефективність функціонування АСДУ за рахунок підвищення точності еквівалентних моделей та оптимізації мережі ТВ.

Реалізація результатів роботи. Алгоритми оперативного корегування еквівалентів використано при розробці програмного комплексу "Еквіор" (ІЕД АН України). Методи аналізу чутливості ОС щодо похибок ТВ та синтезу оптимальної мережі телеметрії застосовано у програмному комплексі "Телеметрія", який впроваджено в ВЕО "Донбасенерго" (м. Горлівка). Там же у складі інформаційно-обчислювальної системи реального часу оперативної оптимізації режиму по реактивним потужностям та напругам впроваджено модулі, що реалізують алгоритми розрахунку та використання статистич-

них моделей для телевініміювань, яких бракує.

**А п р о б а ц і я р о б о т и.** Основні положення та результати роботи доповідались на II Всесоюзній конференції "Перспективи та досвід впровадження статистичних методів в АСУ ТП" (м. Смоленськ, 1984), IV Республіканській науково-технічній конференції "Сучасні проблеми енергетики" (м. Київ, 1985), I Республіканській школі-семінарі молодих вчених та спеціалістів (м. Алушта, 1985), Всесоюзній науково-технічній нараді "Еквівалентування електроенергетичних систем для управління їх режимами" (м. Баку, 1987), IX Всесоюзній науковій конференції "Моделювання електроенергетичних систем" (м. Рига, 1987), Всесоюзному семінарі "Інформаційне забезпечення АСУ ЕЕС" (м. Паланга, 1988), III та IV науково-технічних конференціях "Проблеми нелінійної електротехніки" (м. Київ, 1988, 1992).

**П у б л і к а ц і і.** За темою роботи опубліковано - 15, головні з них - 9.

**С т р у к т у р а т а о б с я г р о б о т и.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів і висновку, які викладені на 112 сторінках машинописного тексту, 25 малюнках, 17 таблицях та 1 додатку. Бібліографія включає 115 праць вітчизняних та зарубіжних авторів. Загальний обсяг роботи 165 сторінок.

У першому розділі розглянута постановка завдання компенсації дефіциту телеметрії в закладах оперативного управління ЕЕС, проведено аналіз існуючих методів оперативного еквівалентування та алгоритмів компенсації дефіциту ТВ для ОС.

Другий розділ присвячено розробці методу статистичного еквівалентування. Розглянуті й вирішені питання урахування топології еквівалентованого району, наведено опис розробленого програмного забезпечення та результати експериментальних досліджень.

У третьому розділі розглянуто застосування статистичних методів для аналізу структури перетоків активних потужностей в енергосистемах. Розроблені способи якісної і кількісної оцінки транзитів потужності, оцінки їх впливу на втрати потужності та електроенергії.

Четвертий розділ присвячено питанням аналізу чутливості результатів оперативних розрахунків щодо помилок ТВ. Розроблено спосіб обрахунку матриць чутливості з використанням методу сингулярного розкладу, способи застосування їх для оперативних розрахунків та синтезу оптимальної мережі телеметрії.

У додатку наведені документи, які підтверджують впровадження результатів роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В основі розв'язання оперативних задач диспетчерського управління ЕЕС є формування та оперативна корекція моделі поточного режиму за даними ТВ і ПВ. Існуючий рівень розвитку телеметрії та систем зв'язку в енергосистемах дозволяє розв'язати цю задачу тільки з використанням методів компенсації неповноти інформації.

Ефективним способом вирішення проблеми є, як показали дослідження, метод статистичного еквівалентування, розроблений в ГНДЛЖПІ спільно з співробітниками АМЕС ІЕД України. Сутність методу полягає у компенсації дефіциту інформації за рахунок використання регресійних залежностей недоступних для вимірювання характеристик режиму від доступних телевимірюваних. Стосовно задачі оперативного еквівалентування, використання методу зводиться до корекції еквівалентних параметрів неспостереженого району за допомогою моделей виду

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= \sum_t \alpha_{ft} \Delta P_t + \sum_t \beta_{ft} \Delta U_t, \\ \Delta Q_f &= \sum_t \gamma_{ft} \Delta Q_t + \sum_t \delta_{ft} \Delta U_t, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $f$  - індекс вузлів еквівалентованого району;  $t$  - індекс точок ТВ, щодо яких виконується корекція;  $\Delta P_f, \Delta Q_f$  - поправки до еквівалентних ін'єкцій базисного режиму;  $\Delta P_t, \Delta Q_t, \Delta U_t$  - відхилення характеристик режиму у точках ТВ від своїх значень у базисному режимі.

Коефіцієнти регресії  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  визначаються методом обчислювального експерименту у циклі попередніх розрахунків на моделі еквівалентованого району за допомогою програм розрахунку установлених режимів та еквівалентування. У контурі оперативного управління використовуються лише моделі (1) для корекції еквівалентних параметрів, що забезпечує високу ефективність методу.

Кожній комутаційній ситуації в еквівалентованому районі відповідає своя модель корекції еквівалентних параметрів (1). Проте, близькість режимів певних комутаційних ситуацій дозволяє очікувати, що і в моделі (1) у просторі коефіцієнтів регресії будуть також, близькими. В цьому випадку, використовуючи класифікацію та узагальнення ситуацій у межах кожного класу, можна поставити у відповідність можливим варіантам топології схеми ряд узагальнених моделей так, щоб кількість моделей була достатньо малою, а похибка їх використання - у прийнятних межах.

У роботі запропоновані рішення для вибору способу упорядкування

ня та формального відображення об'єктів класифікації, метрики (критерія близькості) об'єктів, способу класифікації та критерія її оптимальності.

Об'єктами класифікації є комутаційні ситуації еквівалентованого району - сукупність телесигналів (ТС) про стан комутаційних апаратів, формально інтерпретована як натуральне число. Це зводить обробку комутаційних ситуацій до добре відомого завдання упорядкування й пошуку числових даних.

Кожному варіанту топології розрахункової схеми району еквівалентування відповідає регресійна модель виду (1), 1. отже,  $m$ -мірний вектор коефіцієнтів регресії  $x = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta\}$ . Як можливі критерії близькості комутаційних ситуацій розглядалися такі:

1. Евклідова відстань між векторами коефіцієнтів регресійних залежностей

$$d_{ij}^I = \sqrt{\sum_k^m (x_{ki} - x_{kj})^2}, \quad (2)$$

де  $x_{ki}, x_{kj}$  -  $k$ -ті коефіцієнти  $i$ -тої та  $j$ -тої моделі.

2. Вагова евклідова відстань між векторами коефіцієнтів

$$d_{ij}^{\bar{I}} = \sqrt{\sum_k^m \varepsilon_k (x_{ki} - x_{kj})^2}. \quad (3)$$

3. Одномірна евклідова відстань

$$d_{ij}^{\bar{m}} = \left| \sum_k^m \varepsilon_k (x_{ki} - x_{kj}) \right|. \quad (4)$$

За відсутності апріорної інформації про просторовий розподіл комутаційних ситуацій, для їх класифікації використано метод автоматичної класифікації. Оптимальність класифікації перевірялась за критеріями:

1. Критерій "стандартизації"

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{\ell}^N (\bar{\sigma}_{\ell} - \sigma_{\ell})^2 \frac{n_{\ell}}{n}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\sigma_{\ell} = \sqrt{\frac{1}{n_{\ell}-1} \sum_i^{n_{\ell}} d_{i\ell}^2},$$

де  $N$  - кількість класів;  $\sigma_{\ell}, n_{\ell}$  - внутрішній радіус і кількість об'єктів  $\ell$ -того класу;  $\bar{\sigma}$  - середній внутрішній радіус за всіма класами;  $n$  - загальна кількість об'єктів, що класифікуються.

2. Критерій роздільності

$$J_2 = \frac{1}{\sigma_{\text{вн}}^2} \sum_{\ell}^N \frac{n_{\ell}}{n} \sigma_{\ell}^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $\sigma_{\text{вн}}$  - внутрішній радіус середних векторів всіх класів.

### 3. Дисперсійний критерій

$$J_3 = \sum_{\ell}^N \sum_{i}^{n_{\ell}} \sum_{k}^m (x_{ki} - x_{k\ell})^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Дослідження впливу метрики та критерія оптимальності класифікації на покибки використання статистичних еквівалентів дозволило обрати метрику  $d^{\ell}$  та критерій  $J_2$ .

Задача візуального контролю й аналізу результатів багатомірної класифікації розв'язана з використанням процедури двомірного відображення, сутність якого полягає в оптимальному відображенні простору багатомірних об'єктів на площину

$$\varepsilon = \frac{1}{\sum_{i < j}^n d_{ij}} \sum_{i < j}^n \frac{(d_{ij} - d_{ij}^*)^2}{d_{ij}} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де  $d_{ij}$  та  $d_{ij}^*$  - відстань між  $i$ -тим та  $j$ -тим об'єктами в  $m$ -мірному та двомірному просторах.

Відповідно:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_k^m (x_{ki} - x_{kj})^2}, \quad (9)$$

$$d_{ij}^* = \sqrt{\sum_k^2 (y_{ki} - y_{kj})^2}, \quad (10)$$

де  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi})$  та  $(y_{1i}, y_{2i})$  - вектори коефіцієнтів моделей до та після відображення.

Градієнтний метод дає таку ітераційну формулу

$$y_{ki}^{\ell+1} = y_{ki}^{\ell} + \frac{2\alpha}{\sum_{i < j}^n d_{ij}} \sum_{j \neq i}^n \frac{d_{ij} - d_{ij}^*}{d_{ij} d_{ij}^*} (y_{ki}^{\ell} - y_{kj}^{\ell}), \quad (11)$$

де  $\alpha$  - параметр, що визначається методом дихотомії.

У роботі наведені результати досліджень методу двомірного відображення та рекомендації щодо його застосування.

Програмна реалізація базується на розробленому в ІЕД АН України програмному комплексі "Еквівалентування". Максимальний обсяг задачі: вхідна схема до 1000 вузлів, 1500 віток, кількість ТВ - до 100.

Повний цикл розрахунків на М4030 для контрольного прикладу (тестова схема 11 вузлів, 15 віток) з операціями вводу-виводу складає 20 хвилин. У режимі імітації оперативного розрахунку процесор зайнятий частки секунди.

Для тестової схеми 11 вузлів, 15 віток, узагальнення 28 вхідних комутаційних ситуацій до 3-х класів приводить до незначного збільшення похибки. Це підтверджує аналіз розподілу моделей після двомірного відображення (мал. 1); комутаційні ситуації чітко згруповані у три класи. Аналогічні результати одержано на реальних схемах.

У методі статистичного еквівалентування важливе значення має власне метод обробки даних обчислювального експерименту для отримання регресійних моделей. У вхідній матриці результатів плану експеримента характеристики режиму корельовані між собою майже до лінійної залежності. В цьому випадку підрахунок коефіцієнтів регресії класичним методом найменших квадратів (МНК) є неприйнятним, тому що відповідна система нормальних рівнянь погано зумовлена. У роботі доведена ефективність застосування для регресійного аналізу методу сингулярного розкладу

$$A = USV^T, \quad (12)$$

де  $A$  -  $n \times m$  матриця результатів експерименту;  $U$  та  $V$  - ортогональні  $n \times n$  та  $m \times m$  матриці з лівих і правих сингулярних векторів;  $S$  - діагональна  $n \times m$  матриця сингулярних чисел матриці  $A$ ;  $n$  - кількість дослідів;  $m$  - кількість факторів у моделі.

З урахуванням розкладу (12) вхідна лінійна система нормальних рівнянь приймає вид

$$USV^T X = Y, \quad (13)$$

де  $X$  - вектор коефіцієнтів регресійної моделі;  $Y$  - вектор значень характеристики режиму, отриманий за планом експерименту.

В цьому випадку рішення може бути знайдено як

$$SZ = D, \quad (14)$$

де

$$Z = V^T X,$$

$$D = U^T Y.$$

В умовах лінійної незалежності стовпців матриці  $A$  (тобто слабкій кореляції факторів) рішення (14) єдино можливе і співпадає з рішенням за МНК. При сильній кореляції, відповідні стовпці матриці будуть майже лінійно залежні, а відповідні сингулярні числа будуть

близькі до нуля.

У цьому випадку рішення (14) шукаємо як

$$z_i = \begin{cases} \frac{d_i}{\sigma_i} & , \sigma_i \geq \tau \\ 0 & , \sigma_i < \tau \end{cases} \quad (15)$$

де  $\tau$  - межа, що відображає точність вхідних даних.

При обробці даних обчислювального експерименту, що одержані за програмою розрахунку усталеного режиму використовується вираз

$$\tau = \xi \cdot \max_i \sigma_i, \quad (16)$$

де  $\xi$  - точність визначення характеристик режиму.

Метод статистичного еквівалентування забезпечує достатню точність моделювання за умови урахування топології еквівалентованого району. Це дозволяє рекомендувати його для компенсації дефіциту інформації внутрішніх неспостережених районів. Для корегування еквівалентів зовнішніх систем, топологія яких не може бути врахованою, точність методу знижується. В цьому випадку слушним буде застосування більш простого способу корегування еквівалентів - методу межового погодження.

Запропоновано реалізацію методу, яка дозволяє виконувати операцію межового погодження за програмою розрахунку усталеного режиму, модифікованою для можливості урахування довільної кількості балансуєчих вузлів. Дослідження показали, що точність межового погодження еквівалента також залежить від топології зовнішньої системи та способу репрезентації зовнішньої мережі (нередуковане зображення або повний багатокутник).

Методи ОС та статистичного еквівалентування дозволяють сформувати модель ЕЕС, придатну для оперативних розрахунків режимів, оптимізації тощо. Проте, існують задачі, де класична модель електричної мережі не може бути використана. Однією з них є вельми актуальний для енергосистем аналіз транзитів активної потужності. У ряді випадків, складова втрати, обумовлена транзитом, може досягати до 10 %, від загальної величини втрат в основній мережі. Кількісна оцінка цієї складової дозволила б підвищити результативність оцінки роботи персоналу в напрямку зниження втрат.

Для окремої енергосистеми суміжні системи являють собою "чорний ящик". І для аналізу може бути використана тільки власна телеметрія міжсистемних перетоків, що зберігається і оброблюється в опе-

ративно-інформаційному комплексі (ОІК) енергосистеми.

Так, на фоні основних завдань ОІК може підраховуватись змінна оцінка коваріаційної  $C$  та кореляційної  $R$  матриць міжсистемних перетоків.

Кореляційна матриця використана для візуалізації структури міжсистемних перетоків за алгоритмом Крускала. Для цього кожному рядку (стовпцю) кореляційної матриці  $R$  відповідно ставиться вершина графу, а величини  $|z_{ij}|$  (модулі елементів матриці  $R$ ) с вагами ребер, що з'єднують  $i$  та  $j$  вершини графа.

Послідовність побудови графу така:

1. На першому кроці обирається ребро з максимальною вагою.
2. На кожному наступному кроці обирається ребро з максимальною вагою серед залишків, що не утворює замкненого контуру з раніш обраними ребрами.
3. Побудова закінчується, коли будь-яке нове ребро дає контур або має вагу, що відповідає статистично незначущому коефіцієнту кореляції. В останньому випадку в графі залишаються висячі вузли або він розпадається на незв'язні фрагменти, що свідчить про незалежність режиму відповідних міжсистемних ліній.

На мал. 2 наведено приклад побудови граф-схеми міжсистемних перетоків. Якщо вимірювання 1 - 4 є величини сальдового перетоку з енергосистемами 1 - 4 відповідно, то інтерпретувати отриману граф-схему можна таким чином: існує транзит потужності між енергосистемами 1, 3 та 2, 4.

Актуальною є задача кількісної оцінки транзиту, тобто виділення складових загальної картини міжсистемних перетоків, обумовлених тільки зовнішніми причинами (змінною активною балансом зовнішніх систем). Інакше, у будь-який момент часу  $t$  в умовах відомого вектора міжсистемних перетоків  $X^t$  порядку  $m$ , необхідно знайти вектор  $X_{тр}^t$  такий, що

$$\sum_i^m \dot{x}_{тp i}^t = 0, \tag{17}$$

$$X_{тp}^t = A X^t, \tag{18}$$

де  $X_{тp}^t$  - вектор складових міжсистемних перетоків, зумовлених транзитом потужності;  $A$  - матриця відображення простору векторів міжсистемних перетоків у простір складових цих перетоків, зумовлених транзитом.

Вираз (17) є необхідною умовою наявності транзиту, тому що сальдо транзиту повинно за визначенням рівнятися нулю. Вираз (18) є

розрахунковим для визначення транзитної складової міжсистемних перетоків.

У роботі запропоновано отримання відображення  $A$  за допомогою компонентного розкладу коваріаційної матриці міжсистемних перетоків

$$U^T C U = \Lambda, \quad (19)$$

де  $U$  - ортогональна матриця власних векторів матриці  $C$ ;  $\Lambda$  - діагональна матриця власних чисел матриці  $C$ .

Тоді

$$X = \sum_i^m u_i u_i^T X = \sum_i^m X^{(i)}, \quad (20)$$

де  $u_i$  -  $i$ -тий власний вектор.

Таким чином, вектор  $X$  складається з  $m$  незалежних складових, що визначаються власними векторами матриці  $C$ . Фізичне пояснення має невелике число характеристичних складових, які мають найбільші власні числа. Якщо у векторі  $u_i$  присутні як негативні, так і позитивні елементи, відповідна  $i$ -та складова може пояснювати транзит потужності. Формалізована перевірка виконується за умовою (17), або з урахуванням (20) для  $i$ -того транзиту перевіряється магізна сальдо  $i$ -тої складової

$$S^{(i)} = \sum_j^m \sum_k^m u_{ji} u_{ki} x_k < \varepsilon, \quad (21)$$

де  $u_{ji}$ ,  $u_{ki}$  - відповідно,  $j$ -тий та  $k$ -тий елементи власного вектора  $u_i$ ;  $x_k$  -  $k$ -тий елемент вектору  $X$ .

У роботі розглянуто способи обліку додаткових втрат потужності та енергії від транзитної складової міжсистемних перетоків.

Важливим питанням, що виникає при впровадженні завдань реально го часу є урахування реально існуючої системи телеметрії, первинно створеної без вимог ОС.

На практиці, суттєві розбіжності похибок ТВ різноманітних фізичних величин (наприклад, напруг і перетоків потужності) враховуються, звичайно, ваговими коефіцієнтами, що дозволяє "масштабувати" їх вплив на результат ОС. Проте, ТВ однакових характеристик режиму також мають різну цінність для ОС, і доцільно пред'являти до різних ТВ різні вимоги щодо точності. Сказане зумовлює актуальність визначення чутливості результатів ОС щодо похибок ТВ.

У роботі запропоновано прямий обрахунок матриць чутливості.

Розглянемо відому постановку задачі статичного ОС режиму БЕС.

$$\bar{V} = V(Y) + \xi_V. \quad (22)$$

Режим однозначно визначається вектором незалежних характеристик режиму - змінних стану  $Y$  (звичайно модулі і фази вузлових напруг), а інформація про поточний режим міститься у векторі  $\bar{V}$  поточних значень ТВ. Телевимірювані характеристики режиму є функціями змінних стану, проте з-за похибок вимірювань у векторі  $\bar{V}$  присутній вектор адитивних похибок  $\xi_V$ .

Рішення (22) може бути знайдено як

$$R_V^{-1} (\bar{V} - V(Y)) = 0, \quad (23)$$

де  $R_V^{-1}$  - діагональна матриця коефіцієнтів довіри щодо ТВ (у загальному випадку обернена коваріаційна матриця помилок ТВ  $R_V$ ).

Лінеаризуючи  $V(Y)$  поблизу рішення, маємо ітераційні формули

$$R_V^{-1} \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right)_k \Delta Y_k = R_V^{-1} (\bar{V} - V(Y_k)), \quad (24)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + \Delta Y_k, \quad (25)$$

де  $\frac{\partial V}{\partial Y}$  - матриця Якобі часткових похідних телевимірюваних характеристик режиму за змінними стану;  $\Delta Y$  - вектор поправок.

Перевизначена лінійна система (24) з-за наявності похибок вимірювань у векторі  $\bar{V}$  несумісна та не має точного розв'язку. Приблизне рішення може бути знайдено, наприклад, за допомогою МНК. Вплив похибок на результат при цьому залежить від матриці  $\frac{\partial V}{\partial Y}$ , тобто визначається схемою, режимом мережі та складом ТВ.

Запропоновано проводити аналіз чутливості за матрицею

$$H = \left( R_V^{-1} \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^+ R_V^{-1/2}, \quad (26)$$

де  $+$  - оператор псевдообернення.

У роботі проведено аналіз різноманітних способів псевдообернення (Грама-Шмідта, Гревлія, сингулярного розкладу). Показано, що найбільш ефективним є сингулярний розклад.

З урахуванням (12) псевдообернена матриця  $A^+$  визначається співвідношенням

$$A^+ = V S^+ U^T, \quad (27)$$

де  $S^+$  - псевдообернена  $m \times n$  матриця, у якій на головній діагоналі стоять елементи, обернені сингулярним числом.

Враховуючи можливість різноманітних варіантів постановки та загальну трудомісткість задач, що вимагають визначення матриці чутливості, у роботі розглянено питання їх декомпозиції за активною-реактивною потужністю та шляхом розбивки на підсистеми.

Розглядено задачі, де використовують матриці чутливості.

1. Опіювання стану. Для спостережних систем, з телеметрією, що забезпечує добре обумовлену матрицю  $\frac{\partial V}{\partial Y}$  використання матриць чутливості неефективне. Ситуація змінюється у випадку локальної неспостережності ЕЕС. Врахування можливої втрати спостережності в існуючих програмних комплексах потребує суттєвих змін алгоритмічного та програмного характеру. Для ОС з використанням матриць чутливості втрата спостережності є звичайною ситуацією, тому що це виражається у пониженні рангу матриці  $\frac{\partial V}{\partial Y}$ , що можна виявити аналізом її сингулярних чисел.

Лінійна залежність стовпців матриці  $\frac{\partial V}{\partial Y}$  супроводжується появою нульових сингулярних чисел. "майже" лінійна залежність (тобто погана зумовленість при повному ранзі) - появою сингулярних чисел, менших деякого порогового значення  $\tau$ , що визначається виразом (16).

Перша ситуація характерна для топологічної неспостережності ЕЕС. Друга ситуація характерна для нетопологічної ( $\varepsilon$ -неспостережності), зумовленої певним співвідношенням режимних параметрів. Відсів малих сингулярних чисел відбувається шляхом формування псевдооберненої матриці  $S_{\text{зр}}^+$ :

$$\sigma_{i \text{ зр}}^+ = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i} & , \sigma_i \geq \tau \\ 0 & , \sigma_i < \tau \end{cases} \quad (28)$$

Матриця чутливості, отримана із виразу (27) з використанням нової матриці  $S_{\text{зр}}^+$ , дає рішення вхідної системи рівнянь, відмінне від рішення за МНК, але найбільш стійке щодо помилок вхідних даних за рахунок ліквідації джерела поганої зумовленості.

2. Аналіз спостережності. Змінні стану, пов'язані з відсіяним сингулярним числом  $\sigma_i$ , тобто що належали неспостережному району, можуть бути визначені аналізом елементів відповідного  $i$ -того правого сингулярного вектора матриці  $V$ . Ненульові елементи відповідають неспостережним змінним стану, при цьому кількість відсіяних сингулярних чисел дорівнює кількості неспостережних районів, тобто районів, що визначаються сукупністю змінних стану, які можна зробити

спостережними введенням одного додаткового виміру.

### 3. Аналіз чутливості.

- отримання загальної кількісної оцінки чутливості результатів ОС режиму ЕЕС щодо похибок ТВ, тобто визначення "якості" розстановки телеметрій;

- виявлення "вузьких" місць у телеметрії та отримання кількісної оцінки чутливості ОС щодо похибок окремих ТВ.

Коваріаційна матриця помилок оцінених змінних стану

$$R_Y = M(\xi_Y, \xi_Y) = M(H\xi_V, \xi_V^T H) = HR_V H^T. \quad (29)$$

Сума дисперсій оцінених змінних стану використовується як кількісна оцінка впливу похибок вимірювань на помилки оцінок змінних:

$$D_\Sigma = \text{tr} R_Y = \sum_i^n \sum_j^m \sum_k^m h_{ij} h_{ik} z_{jk}, \quad (30)$$

де  $z_{jk}$  -  $(j, k)$ -тий елемент матриці  $R_V$ ;  $h_{ij}$  та  $h_{ik}$  - відповідно  $(i, j)$  та  $(i, k)$  -ті елементи матриці  $H$ ;  $\text{tr}$  - оператор сліду.

Як оцінка внеску  $i$ -того ТВ у сумарну дисперсію оцінених змінних стану режиму використовується вираз

$$D_{V_i} = \sum_j^n \sum_k^m h_{ij} h_{ik} z_{jk}. \quad (31)$$

4. Синтез оптимальної мережі телеметрій. Оптимізація полягає у мінімізації  $D_\Sigma$  за всіма можливими розміщеннями ТВ до досягнення необхідної точності ОС.

Запропоновано дві процедури вибору оптимального розкладу ТВ: алгоритм додавання ТВ (починаючи з базисного складу) та алгоритм виключення ТВ (починаючи з базисного складу ТВ плюс всі можливі додаткові вимірювання).

В обох випадках покроковий характер оптимізаційних алгоритмів може бути врахований для підрахунку матриць чутливості рекурентним способом. Для алгоритму додавання ТВ (додавання рядків у матрицю  $A$ ), псевдообернена матриця може бути отримана за методом Гревілья.

Для матриці  $A_{k+1}$ , що отримується із  $A_k$  додаванням рядка  $\alpha^T$

$$A_{k+1} = \begin{vmatrix} A_k \\ \alpha^T \end{vmatrix}, \quad (32)$$

псевдообернена матриця визначається як

$$A_{k+1}^+ - |(E - \beta \alpha^T) A_k^+ \beta|, \quad (33)$$

де  $E$  - одинична матриця;  $\beta$  - вектор-стовпець

$$\beta = \begin{cases} \frac{(E - A_k^+ A_k) \alpha}{\|(E - A_k^+ A_k) \alpha\|^2}, & A_k^+ A_k \alpha \neq \alpha \\ \frac{A_k^+ A_k^T \alpha}{1 + \|A_k^+ \alpha\|^2}, & A_k^+ A_k \alpha = \alpha \end{cases} \quad (34)$$

Аналогічні рекурентні співвідношення виведено із (32)-(34) для зворотного алгоритму виключення ТВ.

Критерієм вибору додаткового (виключеного) ТВ є мінімум  $D_{\Sigma}$ . Це приводить до значних обчислювальних витрат, до того ж вибір оптимального додаткового (виключеного) ТВ на кожному етапі не гарантує глобальність оптимума кінцевого розміщення. Як наближений критерій запропоновано використання мінімуму  $D_{V_j}$ , що підлягає визначенню за виразом (31).

Алгоритми визначення матриць ч. чливості для задач ОС програмно реалізовані та впроваджені в ВЕО "Донбасенерго". Їх ефективність підтвердили розрахунки на тестових та реальних схемах.

Для 50-вузлової схеми і 100 ТВ необхідний обсяг оперативної пам'яті - 300 Кбайт. Час розрахунку однієї матриці чутливості на ЕС-1040:

- схема 7 вузлів, 9 віток, 35 ТВ - 3 сек.
- схема 25 вузлів, 31 вітка, 78 ТВ - 16 сек.

#### ГОЛОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Задачі оперативного управління режимами електроенергетичних систем вимагають використання математичних моделей, що відрізняються від тих, що використовуються при плановій постановці диспетчерських задач. Особливості інформаційної бази оперативних задач - неповнота інформації та наявність помилок - приводять до необхідності використання статистичних методів і підходів до формування оперативних моделей.

2. Досліджено методику оперативного еквівалентування внутрішніх неспостережених систем, що ґрунтується на корекції їх еквівалентних параметрів за даними ТВ. Розроблено та досліджено спосіб урахування

топологии эквивалентowanego району за допомогою алгоритма автоматичної класифікації. Обрано оптимальні метрика для об'єктів та критерій якості класифікації, запропоновано використання процедури двомірного відображення для візуального контролю класифікації.

3. Розроблено та досліджено алгоритм межового погодження еквівалентів зовнішніх неспостережних систем за даними ТВ.

4. Розроблено метод аналізу структури міжсистемних перетоків активної потужності в ЕЕС, що ґрунтується на компонентному розкладі коваріаційної матриці міжсистемних перетоків. Запропоновано алгоритм візуалізації структури міжсистемних перетоків за методом Крускала та спосіб підрахунку впливу транзитної складової міжсистемних перетоків на втрати потужності та енергії.

5. Розроблено та досліджено спосіб обрахування матриць чутливості результатів ОС режиму ЕЕС щодо помилок ТВ з використанням методу сингулярного розкладу. Запропоновано використання матриць чутливості для ОС та синтезу оптимальної мережі телеметрії.

За темою дисертації опубліковано 15 праць, 13 них головні:

1. Rogozin A. G. Применение методов теории планирования эксперимента, регрессионного анализа и теории распознавания образов для задачи оперативного управления режимами энергосистем // Перспективы и опыт внедрения статистических методов в АСУ ТП: Тез. докл. II Всесоюз. конф. - Смоленск, 1984. - М.: 1984. - С. 192.

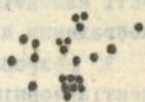

2. Щербина Ю. В., Качанова Н. А., Лосяцкий Ю. Е., Гапченко Н. А., Rogozin A. G. Применение статистических эквивалентов электрических систем для оперативных расчетов. - Киев, 1984. - 53с. (Препринт N 381/Изд АН УССР).

3. Гапченко Н. А., Качанова Н. А., Rogozin A. G. Корректировка эквивалентных схем внешних энергосистем по данным телеметрии для управления в реальном времени // Методы анализа режимов электроэнергетических систем и установок. - Киев: Наукова думка, 1987. - С. 10-14.

4. Rogozin A. G., Заболотный И. П. Расстановка телеизмерений в электрических системах с использованием матриц чувствительности. - Донецкий политехн. ин-т. - Донецк, 1988. - 14с. - Деп. в УкрНИИЭТИ 02.06.88. N 1375.

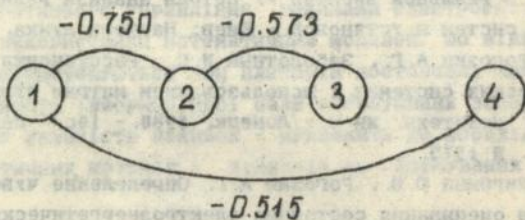
5. Щербина Ю. В., Rogozin A. G. Определение чувствительности результатов оценивания состояния электроэнергетических систем к погрешностям телеизмерений с использованием метода сингулярного разложения. - Киев. политехн. ин-т. - Киев, 1988. - 12с. Деп. в УкрНИИЭТИ 01.02.88. N 325.

ЛНБ ім. В. Стефа  
АН України

$y_1$			
			$y_2$

Мап. 1

1.0	-0.750	0.259	-0.515
-0.750	1.0	-0.573	-0.014
0.259	-0.573	1.0	0.301
-0.515	-0.014	0.301	1.0



Мап. 2

Архив  
 1988 - 1989  
 1088 - 1089

6. Гапченко Н. А., Качанова Н. А., Рогозин А. Г., Снежко А. Г., Шербина Ю. И. Вопросы теории моделирования и оптимизации режимов электрических систем в реальном времени с учетом дефицита телеметрии. - Киев, 1989. - 36с. (Препринт № 591/ ИЭД АН УССР).

7. Гапченко Н. А., Качанова Н. А., Рогозин А. Г., Снежко А. Г., Шербина Ю. В. Комплекс программ оптимального оперативного управления режимами электрических систем с учетом дефицита телемерии. - Киев, 1989. - 36с. (Препринт № 594/ ИЭД АН УССР).

8. Качанова Н. А., Макаревич Р. А., Перга С. П., Рогозин А. Г. Новые возможности программного комплекса "Эквивалентирование" // Энергетика и электрификация. - 1991. - № 3. - С. 21-23.

9. Шербина Ю. В., Рогозин А. Г. Анализ структуры перетоков активной мощности в энергосистеме с использованием статистических методов // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. IV научно-техн. конф. - Киев, 1992. - Киев, 1992. - С. 103

Нідл. до друку. 13.04.93      Формат 60×84/16 Папірофс  
Друк. офс. Умовн. друк. арк. 1,93      Обл.-вид. арк. 0,66 тир.100  
Зам. 3-3539.

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Репіна, 4.

465373

AB 27.096