

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 621.3.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.028>

### МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БАГАТООПОРНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КОНТУРНИХ СТРУМІВ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТРЕНАЖЕРІВ

**О.В. Сангінова**<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, **В.О. Гурєєв**<sup>2\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [sanginova@xtf.kpi.ua](mailto:sanginova@xtf.kpi.ua)

<sup>2</sup> Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України,

вул. Генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна,

e-mail: [viktor.gurieiev@infotec.ua](mailto:viktor.gurieiev@infotec.ua)

*Розглянуто особливості використання багатоопорного методу розрахунку контурних струмів для моделювання режимів великих енергосистем у складі веб-орієнтованих тренажерних систем оперативно-диспетчерського персоналу магістральних електромереж. Показано, що найбільш важливими критеріями вирішення низки практичних завдань навчання, контролю знань і тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу є час розрахунку режиму. Перевірка ефективності запропонованого методу виконана на моделях енергосистем України. Результати експериментальних розрахунків показали, що такий багатоопорний метод може використовуватися для розрахунку режимів великих енергосистем у веб-орієнтованих комп'ютерних тренажерах. Бібл. 10, рис. 2.*

**Ключові слова:** енергосистема, багатоопорний метод розрахунку контурних струмів, моделювання, віртуальні технології, веб-орієнтовані тренажерні системи.

Результати розрахунків режимів роботи великих електроенергетичних систем (ЕС) та їх об'єднань (ОЕС) широко використовуються для пошуку та забезпечення оптимальних умов експлуатації, ефективного управління та їх розвитку. Моделювання режимів також є важливою складовою комп'ютерних протиаварійних тренажерів оперативно-диспетчерського персоналу ЕС і ОЕС. Цим питанням у всьому світі приділяється велика увага [1, 2, 3].

Найважливішими вимогами до методів розрахункових комплексів і систем, які вбудовуються в комп'ютерні тренажери і працюють у режимі он-лайн, є забезпечення максимальної швидкості розрахунків та збіжності ітераційних процесів розрахунку режимів. Математичний опис та вивчення режимів ЕС та ОЕС для веб-орієнтованих тренажерних систем є досить складними завданнями [4, 5].

Режим роботи електричної мережі в загальному випадку можна записати як лінійне матричне рівняння:

$$[\dot{Y}_{ss}] \cdot [\dot{U}_s] = [\dot{I}_s], \quad (1)$$

де  $[\dot{Y}_{ss}]$  – комплексна матриця відомих вузлових провідностей електричної мережі;  $[\dot{U}_s]$  – вектор-стовпець невідомих комплексних напруг вузлів;  $[\dot{I}_s]$  – вектор-стовпець комплексних відомих/заданих струмів вузлів.

Відомими параметрами ЕС, які використовуються в більшості промислових програм розрахунку режимів, є потужності/генерація вузлів  $[\dot{S}_s]$ , а не струмів  $[\dot{I}_s]$ . Систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, яка застосовується для розрахунку напруги вузлів мережі,

\* © Сангінова О.В., Гурєєв В.О., 2020

ORCID ID: \*<https://orcid.org/0000-0001-6378-7718>; \*\*<https://orcid.org/0000-0002-8496-3626>

можна записати у вигляді скалярного добутку вектора струмів вузлів  $[i_s]$  на спряжений вектор напруги вузлів  $[\hat{U}_s]$ :

$$[\dot{S}_s] = ([i_s][\hat{U}_s]). \quad (2)$$

Розробка методів рішення великих систем лінійних (1) і нелінійних (2) рівнянь алгебри, які можуть забезпечити надійний результат у комп'ютерних режимних тренажерах з прийнятними обчислювальними витратами, є важливим і актуальним завданням.

Для вирішення великих систем (1) і (2) прямі методи часто потребують великого об'єму пам'яті й працюють занадто довго. У таких випадках використовують ітераційні методи.

Для диспетчерських режимних тренажерів зазвичай застосовують розрахункові схеми з великою кількістю вимикачів та роз'єднувачів, які використовуються в технології оперативних перемикачів для аналізу заявок на вивід/ввід обладнання в ремонт/роботу. Зважаючи на те, що опір цих комутаційних апаратів є дуже малим, елементи матриці провідностей  $[\dot{Y}_{ss}]$  та відповідно й матриці Якобі, яка структурно подібна матриці провідності, прагнуть до нескінченності. Тому застосування прямих методів для комп'ютерних тренажерних систем є проблематичним. Іноді цю проблему вирішують за допомогою методів прямого і зворотного еквівалентування частин електричної мережі. Але для великої кількості вимикачів у мережі час еквівалентування стає порівнянним (або більшим) з часом розрахунку вибраного методу, а час реакції тренажера на збурення – невизначеним.

Тут і далі великими будемо вважати ЕС або ОЕС з кількістю вузлів, яка перевищує тисячу. Більшість публікацій щодо вибору методів розрахунку режимів таких енергосистем присвячено пошуку та розробці зручних, надійних та швидких алгоритмів [4,5]. Проте проблеми прийнятності часу розрахунків режимів, збіжності та вибору початкових наближень у таких методах залишаються досі невирішеними.

Основна мета цієї роботи полягає в розробці прийнятності швидкого алгоритму розрахунку режимів роботи великих енергосистем на базі багатоопорного методу розрахунку контурних струмів для застосування в комп'ютерних веб-орієнтованих протиаварійних диспетчерських тренажерах [9, 10].

**Моделювання та дослідження режимів.** Згідно з методом всю мережу автоматично поділяють на окремі дерева та хорди. Кожне дерево завжди має лише один опорний вузол із джерелом енергії. Хорди (зв'язки) між деревами можуть утворювати звичайні або вироджені незалежні контури, струми яких розраховуються після кожної поточної ітерації процесу розрахунку напруги вузлів. Автоматизована система розрахунків режимів використовує класи вузлів, гілок, дерев, хорд і реалізована таким чином, що будь-яка хорда або гілка дерева мережі однозначно визначаються адресами початкового та кінцевого вузлів, які можуть бути розміщені в різних базах даних на різних серверах, включаючи віртуальні. У цьому методі опорні вузли виконують функції балансуєвих з урахуванням існуючих фізичних обмежень з генерації.

Щодо збіжності ітераційних процесів використаних методів розрахунку режимів і можливості фізичного існування режимів у роботі пропонується застосовувати деякі заходи, які можна назвати інтелектуалізацією «в малому».

Для попередньої оцінки можливості збіжності ітераційного методу аналізується баланс потужності. Спочатку розраховуються інваріантні втрати потужності. Виконується розрахунок режиму для електричної мережі із заданими векторами напруги вузлів джерел енергії і нульовими кутами. У випадку, якщо втрати є більші наперед заданих, приймається допущення про відсутність можливості фізичного існування режиму і, очевидно, треба змінити навантаження деяких вузлів. У розрахункових циклах також виконується перевірка струмів гілок на термічну стійкість і перевірка напруг вузлів. Це дає змогу виділяти і брати до уваги тільки клас прогнозовано фізично можливих режимів і таким чином підвищувати ймовірність збіжності пропонованого методу.

Більшість сучасних програмних систем для розрахунку режимів великих ЕС мають ряд обмежень щодо способів задання балансуєчих вузлів джерел генерації в розрахункових схемах. Зазвичай використовуються три основні моделі вузлів з джерелами енергії: вузли з фіксацією модулів напруги і відомою активною генерацією (розраховують невідомі реактивну генерацію  $Q$  і кут напруги) і векторів напруги (розраховують невідомі активну  $P$  і реактивну  $Q$  генерацію), а також з фіксацією повної генерації. В існуючих промислових комплексах розрахунку режимів передбачається, що є тільки один балансуєчий вектор, а призначити вузли з фіксацією векторів напруги з різними кутами неможливо. У пропонованому методі така можливість передбачена, а кількість таких вузлів не обмежується. Саме це дає змогу створити та застосувати розосереджене моделюєче середовище у веб-орієнтованих комп'ютерних тренажерах.

Для дослідження складних систем, до яких, поза сумнівом, відносяться великі ЕС і ОЕС, часто застосовують метод діакоптики [9, 10]. Згідно з методом загальна велика система розділяється на підсистеми, які розраховуються окремо, а результат для загальної системи складається із окремих результатів.

Для великих електроенергетичних систем у роботі пропонується автоматично розділяти ОЕС на окремі ЕС шляхом визначення хорд з граничними вузлами, які утворюють ОЕС. Цю операцію будемо називати декомпозицією першого рівня. Декомпозиція другого рівня полягає в розділенні схем заміщення паралельно працюєчих окремих ЕС на окремі дерева та хорди.

Застосування декомпозиції дає змогу розділити рівняння (1) і (2) на  $t$  матричних рівнянь, кількість яких дорівнює кількості автоматично виділених дерев, і тоді (1) можна записати наступним чином:

$$[\dot{Y}_{ss}]_t \cdot [\dot{U}_s]_t = [\dot{I}_s]_t \pm [\dot{I}_h]_{t,t+1}, \quad (3)$$

де  $[\dot{Y}_{ss}]_t$  – матриця вузлових провідностей  $t$ -го дерева або ЕС;  $[\dot{U}_s]_t$  – вектор-стовпець напруги вузлів  $t$ -го дерева або ЕС;  $[\dot{I}_h]_{t,t+1}$  – вектор-стовпець струмів хорд між вузлами  $t$ -го та  $(t+1)$  дерев або ЕС.

Струми хорд  $[\dot{I}_h]_{t,t+1}$  розраховуються з використанням матричного рівняння:

$$[\dot{I}_h]_{t,t+1} = ([\dot{U}_{sg}]_t - [\dot{U}_{sg}]_{t+1}) \cdot [\dot{Y}_h]_{t,t+1}^T,$$

де  $[\dot{I}_h]_{t,t+1}$  – вектор-стовпець струмів хорд між вузлами  $t$ -го та  $(t+1)$  дерев або ЕС;  $[\dot{U}_{sg}]_t$  – вектор-стовпець заданих (відомих) напруг граничних вузлів  $t$ -го та  $(t+1)$  дерев або ЕС;  $[\dot{Y}_h]_{t,t+1}^T$  – транспонований вектор провідності відповідних хорд.

Потужність початку хорд можна розрахувати за допомогою формули:

$$[\dot{S}_h]_{t,t+1} = ([\dot{I}_h]_{t,t+1} \cdot [\hat{U}_{sg}]_t),$$

а потужність кінця – за формулою:

$$[\dot{S}_h]_{t,t+1} = ([\dot{I}_h]_{t,t+1} \cdot [\hat{U}_{sg}]_{t+1}).$$

У цьому випадку систему рівнянь (2) також можна записати в матричному вигляді як скалярний добуток вектора струмів вузлів  $[\dot{I}_s]_t$   $t$ -го дерева або ЕС на спряжений вектор напруги  $[\hat{U}_s]_t$ , якщо потужність навантаження вузлів  $t$ -го дерева або ЕС відома або встановлена:

$$([\dot{I}_s]_t, [\hat{U}_s]_t) = [\dot{S}_s]_t \pm [\dot{S}_h]_{t,t+1}, \quad (4)$$

де  $[\dot{S}_s]_t$  – вектор заданих потужностей вузлів  $t$ -го дерева або ЕС;  $[\dot{S}_h]_{t,t+1}$  – вектор потужностей хорд між  $t$ -м та  $(t+1)$ -м деревами або ЕС.

Такий підхід до розрахунків режимів за допомогою дворівневої декомпозиції великих ОЕС дає змогу розділити процес рішення рівнянь (1) і (2) на окремі паралельні процеси з

можливістю залучення віртуальних комп'ютерів (хмарних технологій) або технології паралельних обчислень. Для забезпечення однозначної адресації вузлів і гілок розрахункової схеми ОЕС їх адреси доповнюються номерами (IP) серверів та іменами баз даних (БД). Імена таблиць з інформацією про вузли і гілки є однаковими для всіх БД і тому не потребують додаткової ідентифікації.

Алгоритм багатоопорного методу розрахунку контурних струмів у загальному вигляді можна сформулювати наступним чином:

1. Попередньо до загальної схеми ОЕС застосовується дворівнева декомпозиція.
2. Як початкові наближення для напруг всіх вузлів задаються номінальні напруги опорних вузлів для всіх виділених дерев.
3. Розраховуються (уточнюються) струми вузлів  $[i_s]_t$  всіх дерев. Перевіряється критерій збіжності – небаланс потужності вузлів. Якщо ітераційний процес зійшовся, то управління передати на п.8.
4. Розраховуються, починаючи з кінцевих гілок  $ij$  дерева і до кореня, струми гілок  $[i_{ij}]$  з урахуванням струмів за наявності прилеглих до них хорд. У цьому циклі перевіряються обмеження для струмів кожної гілки на термічну міцність лінії електропередачі.
5. Розраховуються напруги вузлів, починаючи з кореня дерев  $[U_s]_t$ . Перевіряються розраховані напруги вузлів на відповідність допустимим межам.
6. Розраховуються струми всіх хорд  $[i_h]_{t,t+1}$  у випадку зміни напруг їх вузлів і перевіряються обмеження.
7. Передача управління п.3.
8. Запис результатів у БД.

Наведений алгоритм методу був реалізований мовою JAVA у вигляді вбудованих функцій БД ORACLE та PostgreSQL для використання в комп'ютерному диспетчерському тренажері PORT [5]. Результати чисельних розрахунків режимів наявних ЕС України не перевищують 2 секунд, що є прийнятним для використання в диспетчерських тренажерах. На рис. 1 і 2 показано фрагмент високовольтної мережі з результатами розрахунку режиму: на рис. 1 показано результати розрахунку в режимному диспетчерському симуляторі PORT для тестової мережі, тоді як на рис. 2 показано більш детальні результати розрахунку для підстанції та гідроелектростанції.

**Результати.** Розроблений багатоопорний метод розрахунку контурних струмів орієнтований на застосування в розподіленому моделюючому середовищі з можливістю використання віртуальних технологій. Такий підхід до моделювання великих енергосистем дає змогу збільшити в деяких випадках міру деталізації елементів ЕС для класу фізично можливих (існуючих) режимів шляхом використання інтелектуалізації розрахунків «у малому». Демоверсія веб-орієнтованої тренажерної системи PORT з використанням багатоопорного методу розрахунку контурних струмів у її складі була передана в диспетчерську службу системного оператора НЕК «Укренерго» для тестової експлуатації.

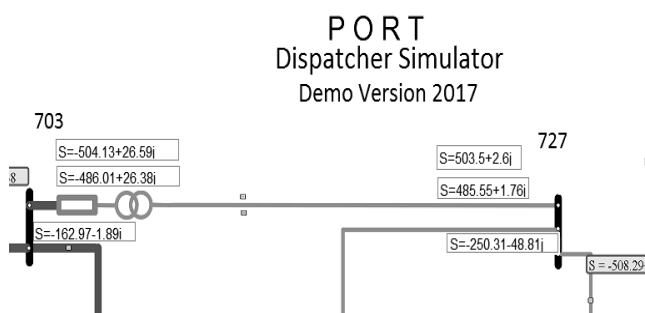


Рис. 1

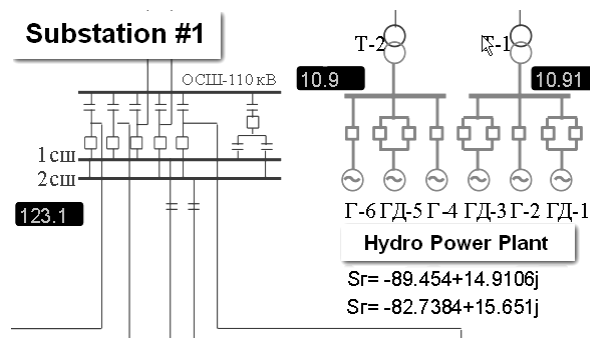


Рис. 2

**Висновки.** На основі аналізу існуючих методів розрахунку режимів та отриманих результатів досліджень був розроблений багатоопорний метод розрахунку контурних струмів, який може бути рекомендований для використання у складі веб-орієнтованих тренажерних систем для всіх рівнів ієрархії управління режимами роботи ОЕС України.

1. Badrzadeh B., Emin Z. The need for enhanced power system modelling techniques and simulation tools. *Cigre Science & Engineering*. 2020. Vol. No 17. Pp. 30–46.
2. Van Cutsem T., Hasse G., Moors C., Guillon S., Mailhot R. A new training simulator for improved voltage control of the Hydro-Quebec system, *Power Systems Conference and Exposition 2004. IEEE PES*. 2004. Vol. 1. Pp. 366–371.
3. Afolabi O.A., Ali W.H., Cofie P., Fuller J., Obiomon P. and Kolawole E.S. Analysis of the Load Flow Problem in *Power System Planning Studies*. Energy and Power Engineering. 2015. No 7. Pp. 509–523.
4. Gurieiev V., Sanginova O. Distributed Simulation Environment of Modes for Full-Scale Mode Simulator for Ukrainian Energy Systems”. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 67–69. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.067>
5. Gurieiev V., Sanginova O. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems, Proc. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, 7–11 June 2016, Pp. 1–4.
6. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. 2nd ed. *SIAM Society for Industrial & Applied Mathematics*, 2003. 477 p.
7. Савина Н.С., Зленко О.А., Матвеева Т.А., Агишева Д.К. Решение СЛАО итерационными методами и их преимущества. *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 5–2. С. 197–198. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=34069> (дата обращения: 10.04.2020).
8. Баландин М.Ю., Шурина Э.П. Методы решения СЛАО большой размерности. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. 70 с.
9. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. Пер с англ. М.: Наука, 1972.
10. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи. Пер с англ. М.: Мир, 1974.

УДК 621.3.51

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГООПОРНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА КОНТУРНЫХ ТОКОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

**О.В. Сангинова**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **В.А. Гуреев**<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: [sanginova@xtf.kpi.ua](mailto:sanginova@xtf.kpi.ua)

<sup>2</sup>Институт проблем моделирования в энергетике им. Е. Пухова НАН Украины,

ул. Генерала Наумова, 15, Киев, 03164, Украина,

e-mail: [viktor.gurieiev@infotec.ua](mailto:viktor.gurieiev@infotec.ua)

*Рассмотрены особенности использования многоопорного метода расчета контурных токов для моделирования режимов больших энергосистем в составе веб-ориентированных тренажерных систем оперативно-диспетчерского персонала магистральных электросетей. Показано, что наиболее важными критериями решения ряда практических задач обучения, контроля знаний и тренажерной подготовки оперативно-диспетчерского персонала является время расчета режима и сходимость метода. Проверка эффективности предложенного метода выполнена на моделях основных энергосистем Украины. Результаты экспериментальных расчетов показали, что предложенный многоопорный метод является приемлемо быстрым, и, следовательно, может использоваться для расчета режимов крупных энергосистем в веб-ориентированных компьютерных тренажерах. Библ. 10, рис. 2.*

**Ключевые слова:** энергосистема, многоопорный метод, моделирование, виртуальные технологии, веб-ориентированные тренажерные системы.

## MESH ANALYSIS FOR COMPUTER-AIDED MODES SIMULATION

**O.Sanginova**<sup>1</sup>, **V. Gurieiev**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: [sanginova@xtf.kpi.ua](mailto:sanginova@xtf.kpi.ua)

<sup>2</sup> Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine,

General Naumov str., 15, Kiev, 03164, Ukraine,

e-mail: [viktor.gurieiev@infotec.ua](mailto:viktor.gurieiev@infotec.ua)

*The peculiarities of using the multi-reference mesh analysis for the large-scale energy systems a part of web-oriented training systems of operating and dispatching staff of the bulk electricity systems are considered. It is shown that the most important criteria for solving a number of practical tasks related to training, knowledge assessment and personnel training are the network calculation time and the method convergence. The verification of the proposed method is performed based on the models of the key Ukrainian power supply systems. The experimental calculation results showed that the suggested multi-reference mesh analysis is considered to be reasonably fast and, therefore, can be used to calculate the large-scale energy systems modes of web-based computer simulators. References 10, figures 2.*

**Keywords:** energy system, mesh analysis with many references nodes, simulation, virtual technologies, web-based training systems.

1. Badrzadeh B., Emin Z. The need for enhanced power system modelling techniques and simulation tools. *Cigre Science & Engineering*. Vol. No 17. February 2020 issue. Pp. 30–46.
2. Van Cutsem T., Hasse G., Moors C., Guillon S., Mailhot R. A new training simulator for improved voltage control of the Hydro-Quebec system. *Power Systems Conference and Exposition 2004. IEEE PES*. Pp. 366–371. Vol.1. 2004.
3. Afolabi O.A., Ali W.H., Cofie P., Fuller J., Obiomon P. and Kolawole E.S. Analysis of the Load Flow Problem in *Power System Planning Studies*. Energy and Power Engineering. 2015. No 7. Pp. 509–523.
4. Gurieiev V., Sanginova O. Distributed Simulation Environment of Modes for Full-Scale Mode Simulator for Ukrainian Energy Systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 67–69. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.067>
5. Gurieiev V., Sanginova O. Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems, Proc. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, 7–11 June 2016. Pp. 1–4.
6. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. 2nd ed. SIAM Society for Industrial & Applied Mathematics. 2003. 477 p.
7. Savyna N.S. Zlenko O.A. Matveeva T.A. Ahysheva D.K. SLAE solution by iterative methods and their advantages. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*. 2014. No 5–2. Pp. 197–198. (Rus) URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=34069> (accessed: 10.04.2020).
8. Balandyn M.Yu. Shuryina E.P. Methods for solving SLAE of large dimension. Novosibirsk: Izd-vo NHTU, 2000. 70 p. (Rus)
9. Kron H. The study of complex systems in parts - diakoptika . Per s anhl. M.: Nauka, 1972. (Rus)
10. Khepp Kh. Diakoptics and electrical circuits . Per s anhl. M.: Mir, 1974. (Rus)

Надійшла: 28.02.2020

Received: 28.02.2020