

УДК 621.311

**В. Ц. Зелінський, к. т. н., доц.; В. В. Зелінський****МОДЕЛЮВАННЯ ГРАФІВ У ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

*На основі методів теорії графів запропоновано методу моделювання та оптимізації розрахункової моделі електроенергетичної системи, яка дозволяє сформувати адаптивні розрахункові моделі для систем оперативного-диспетчерського керування нормальними режимами електроенергетичних систем (ЕЕС).*

**Ключові слова:** *розрахункова модель, адаптивна модель, дерево графа, незалежний контур, хорда, неоднорідність.*

Розвиток автоматизованих систем диспетчерського керування (АСДК) електроенергетичними системами потребує вдосконалення методів моделювання та оптимізації розрахункових схем електричних мереж, алгоритмічного та програмного забезпечення задач керування режимами та автоматизації процесу реалізації керуючих впливів у системах керування нормальними режимами ЕЕС. Традиційні математичні методи та моделі не задовольняють повною мірою нові вимоги з реалізації принципів автоматичного керування режимами ЕЕС. Доцільним є формування математичних моделей для управління нормальними режимами на основі сучасних методів і засобів моделювання з використанням теорії оптимального керування складними технологічними системами та методів теорії графів [1, 4].

Основною метою проведених у роботі досліджень є визначення умов формування й оптимізація дерева графа розрахункової моделі ЕЕС, що дозволить забезпечити певні умови синтезу та реалізації оптимальних керуючих впливів у АСДК й адекватність моделі реальним умовам технологічного режиму в ЕЕС.

Формування цільової функції задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС потребує цілеспрямованого формування розрахункових схем з метою синтезу на їхній основі оптимальних керуючих впливів для регулювальних пристроїв, які задіяні в процесі ведення технологічного режиму в ЕЕС. Задачу синтезу оптимальних керуючих впливів загалом формулюють як задачу теорії оптимального керування складними технологічними процесами [1], розв'язком якої є закони керування регулювальними пристроями у вигляді, зручному для їх подальшої практичної реалізації в автоматизованих або автоматичних системах керування режимами. Загалом закони керування можуть бути отримані у вигляді рівняння:

$$u(t) = -W y(t), \quad (1)$$

де  $u(t), y(t)$  – відповідно вектори керування та спостереження,  $W$  – матриця зворотного зв'язку, яка відображає зв'язок топології мережі з її сталими параметрами.

Для визначення законів керування (1) необхідно побудувати розрахункову модель за певним алгоритмом. Насамперед, сформувати модель дерева графа таким чином, щоб виділити в якості хорд незалежних контурів трансформаторні вітки. Це дозволить реалізувати в контурах схеми заміщення зрівнювальні електрорушійні сили (е. р. с.) у лінійній залежності від параметрів регулювальних пристроїв. На етапі попередніх розрахунків необхідно виконати ранжування регулювальних трансформаторів за пріоритетом керування режимами [2].

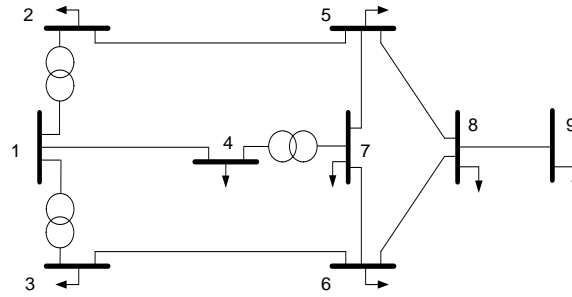


Рис. 1. Схема з'єднань модельованої електричної мережі

Моделювання дерева графа розпочинається з аналізу результатів залежностей втрат активної потужності від коефіцієнтів трансформації регулювальних пристроїв  $\Delta P = f(K_T)$  для всіх трансформаторів з РПН електричної мережі та ранжування їх за пріоритетом керування в АСДК [1, 2]. Так наприклад, для електричної мережі (рис. 1) ці залежності можуть мати вигляд, представлений на рис. 2. Першою під час моделювання незалежного контура вибиратиметься в якості хорди першого незалежного контура вітка 4 – 7, оскільки чутливість до зниження втрат потужності в ній є найбільшою, надалі для другого контура обираємо вітку 1 – 2, для третього- вітку 1 – 3. Модель дерева графа електричної мережі представимо як кореневе дерево, в якому корінь – це балансувальний вузол. Усі допустимі варіанти розвитку дерева графа моделі утворюють початкову множину дерев, оптимізація яких за певних сформованих для задач АСДК умов дозволяє синтезувати оптимальну розрахункову модель.

Початковими умовами процесу моделювання є вибір балансувального вузла, вибір хорд (за результатами ранжування) та системи незалежних контурів. В якості критерію формування оптимального обходу контурів вибрано неоднорідність віток схеми заміщення електричної мережі [1, 4]. Віткам графа  $N_{i,j}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$  надаємо певну вагу, яка відповідає величині неоднорідності кожної з них. Хорди для контурів вибираються за результатами попереднього аналізу за методикою, запропонованою у [2], і формується відповідна матриця хорд  $L_j$ , де  $j = 1, \dots, k$  – кількість регулювальних пристроїв. Побудова моделі дерева графа розпочинається з вибору балансувального вузла та знаходження мінімальної відстані між двома фіксованими вершинами графа з масиву  $L_j$ , тобто першою віткою, яка за результатами ранжування трансформаторів вибирається хордою в першому контурі.

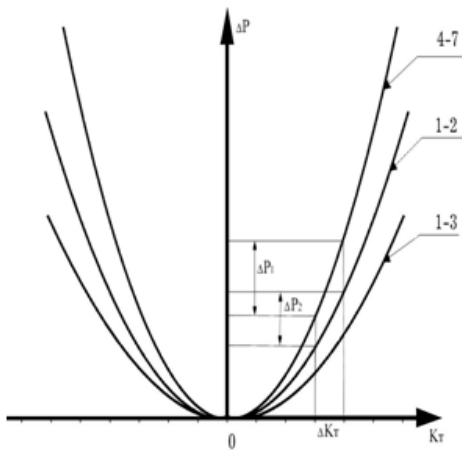


Рис. 2. Визначення регулювального ефекту трансформаторів з РПН

Розглянемо довільне дерево графа  $G$  схеми заміщення електричної мережі з вершинами  $\overline{1, m}$  та заданою довжиною (вагою)  $w_{ij}$  ребер  $\overline{1, n}$ . Сформуємо матрицю ваги віток розміру  $n \times n$ , в якості недиагональних елементів якої є величина неоднорідності віток схеми заміщення

$$W = (w_{ij}), \tag{2}$$

де  $w_{ij}$  – довжина (вага) ребра  $ij$ .

Під час формування діагональних елементів, тобто коли  $i = j$ , величина  $w_{ij} = 0$ , якщо ж відсутня вітка, яка безпосередньо зв'язує вузли  $i$  та  $j$ , то величина  $w_{ij} = \infty$ . Починаючи з матриці  $W^{(0)} = W$ , алгоритм розбудови дерева формує послідовність  $W^{(0)}, W^{(1)}, \dots, W^{(n)}$  таких  $n \times n$  матриць, що елемент  $w_{ij}^{(n)}$  матриці  $W^{(n)}$  є мірою відстані між  $i$  та  $j$  вузлами в графі  $G$ . Матриця ваги  $W^{(m)} = (W_{ij}^{(m)})$ , для всієї множини вершин  $m_{ij}$  визначається як

$$W_{ij}^{(m)} = \min\{W_{ij}^{(m-1)}, W_{im}^{(m-1)} + W_{mj}^{(m-1)}\} \quad (3)$$

Шлях мінімальної довжини контуру серед усіх орієнтованих  $i-j$  шляхів, які використовують вершини  $m_{ij}$  множини, визначається як  $P_{(ij)}^{(m)}$ . Для усіх вершин  $0 \leq m \leq n$  множина  $W_{ij}^{(m)}$  визначає довжину шляху обходу незалежного контуру  $P_{(ij)}^{(m)}$ . Окрім мінімальних довжин віток графа, які визначаються під час вибору шляху обходу контуру необхідно отримати також і контури з мінімальними довжинами. Це досягається так: під час побудови послідовності  $w^{(0)}, w^{(1)}, \dots, w^{(n)}$  одночасно будують таку послідовність матриць  $P^{(0)}, P^{(1)}, \dots, P^{(n)}$ , що елемент  $p_{ij}^{(m)}$  матриці  $P^{(m)}$  вказує на вершину, яка слідує за вершиною  $i$  в  $p_{ij}^{(m)}$ , тоді:

$$p_{ij}^{(0)} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } w_{ij} \neq \infty \\ 0, \text{ якщо } w_{ij} = \infty \end{cases} \quad (4)$$

Значення матриці  $P^{(m)} = (p_{ij}^{(m)})$  отримуємо з умови  $P^{(m-1)} = (p_{ij}^{(m-1)})$  у відповідності з: якщо  $M = \min\{w_{ij}^{(m-1)}, w_{im}^{(m-1)} + w_{mj}^{(m-1)}\}$

$$p_{ij}^{(m)} = \begin{cases} p_{ij}^{(m-1)}, \text{ якщо } M = w_{mj}^{(m-1)} \\ p_{im}^{(m-1)}, \text{ якщо } M < w_{ij}^{(m-1)} \end{cases} \quad (5)$$

Якщо  $M = w_{mj}^{(m-1)}$ , то довжина  $p_{ij}^{(m)}$  дорівнює довжині  $p_{ij}^{(m-1)}$ , тому  $p_{ij}^{(m)}$  збігається з  $p_{ij}^{(m-1)}$ .

З іншого боку, якщо  $M < w_{ij}^{(m-1)}$ , то  $p_{ij}^{(m)}$  – конкатенація шляхів  $p_{ij}^{(m-1)}$  та  $p_{mj}^{(m-1)}$ , тому  $s_{ij}^{(m)} = s_{im}^{(m-1)}$ . Найкоротший шлях визначається послідовністю вершин  $i, i_1, i_2, \dots$ , де

$$i_1 = s_{ij}^{(n)}; i_2 = s_{ij}^{(m)}; i_3 = s_{ij}^{(n)}; \dots; i_j = s_{ki}^{(n)} \quad (6)$$

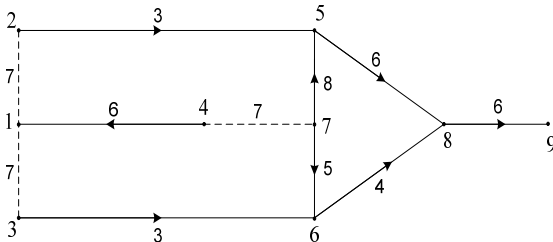


Рис. 3. Граф електричної мережі з вибраними хордами та ваговими коефіцієнтами

Якщо ж  $w_{ij}^{(m)}$  або  $w_{ij}^{(m-1)}$  дорівнюють  $\infty$ , то  $w_{ij}^{(m)} = w_{ij}^{(m-1)}$ . В алгоритмі введено також дію з перевірки зв'язності графа розрахункової моделі мережі.

Розроблений алгоритм і його програмна реалізація дозволяють знайти мінімальний шлях обходу як першого незалежного контуру поступовим перебором всієї матриці вагових

повинні бути такі хорди з масиву  $L_j$ . За неможливості реалізації повного списку запланованого масиву хорд  $L_j$ , сформованого за результатами аналізу ранжування регулювальних пристроїв, пропонується побудова дерева графа мережі шляхом виключення з цього списку трансформаторних віток, чутливість до зниження втрат яких незначна і керування якими не дає суттєвого ефекту від оптимізації режимів. Запропонований алгоритм пошуку мінімальної довжини (ваги) контуру за критерієм неоднорідності його віток використано для запису матриць з'єднань і формування вузлових та контурних рівнянь стану електричної мережі.

Процес моделювання та оптимізації розрахункової схеми розглянуто на прикладі електричної мережі (рис. 1), граф якої з ваговими коефіцієнтами кожної з віток представлено на рис. 3. Для розглянутої схеми попередньо визначено матрицю хорд  $L_j$ , в яку, згідно з пріоритетом, входять трансформаторні вітки 4 – 7, 1 – 3, 1 – 2. Ці вітки в процесі моделювання будуть включені в якості хорд незалежних контурів з одночасним пошуком мінімальної довжини (ваги) кожного з контурів в околі цієї вітки (хорди).<sup>11</sup>

У результаті сформовано розрахункову модель дерева графа (рис. 4) з трьома незалежними контурами мінімальної довжини та вибраними на етапі попередніх розрахунків хордами. Довжина кожного з незалежних контурів графа складає:

1 контур, хорда 4 – 7 ( $w_{47}=7$ ), обхід контура (номер вітки та її вага) – 7 – 6 (5), 6 – 3 (3), 4 – 1 (6), 3 – 1 (7), загальна довжина контура –  $P_{1к.} = 28$ .

2 контур, хорда 1 – 3 ( $w_{13}=7$ ), обхід контура (номер вітки та її вага) – 3 – 6 (3), 6 – 7 (5), 7 – 5 (8), 5 – 2 (3), 2 – 1 (7), загальна довжина контура –  $P_{2к.} = 33$ .

3 контур, хорда 1 – 2 ( $w_{12}=7$ ), обхід контура (номер вітки та її вага) – 2 – 5 (3), 5 – 8 (6), 8 – 6 (4), 6 – 3 (3), 3 – 1 (7), загальна довжина контура –  $P_{3к.} = 30$ .

Сформовані таким чином контури мінімальної довжини дерева графа електричної мережі за критерієм неоднорідності використовуються для формування рівнянь стану ЕЕС і

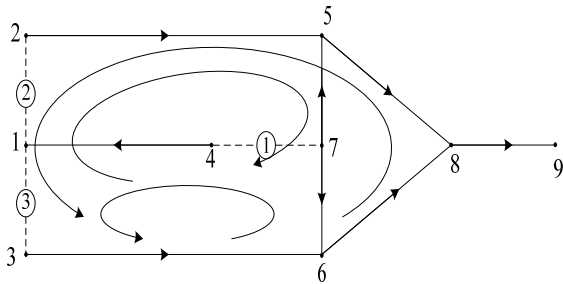


Рис. 4 Незалежні контури графа розрахункової моделі

визначення параметрів як усталених, так і оптимальних режимів. Під час моделюванні дерева графа, для реальних ЕЕС великої розмірності реалізація сформованого масиву хорд повним списком буває неможливою. А в окремих випадках і недоцільною як з технічного, так і з економічного погляду, оскільки чутливість до зниження втрат активної потужності трансформаторів, які мають похилі характеристики (рис. 1), незначна і

керування ними не має суттєвого впливу на параметри оптимального режиму ЕЕС.

Отже, моделювання дерева графа за певним визначеним алгоритмом в задачах формування розрахункових адаптивних моделей ЕЕС та реалізація отриманих з їхньою допомогою керуючих впливів у АСДК нормальними режимами дозволяють підвищити ефективність оперативно-диспетчерського керування режимами, а також, завдяки впорядкуванню цих впливів, більш раціонально використовувати ресурс трансформаторів з РПН. Цілеспрямоване формування й оптимізація розрахункової моделі забезпечує їй значну гнучкість, високий ступінь адаптивності та керованості, що є одним з визначальних чинників під час розвитку та модернізації існуючих АСДК нормальними режимами ЕЕС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.
2. Лежнюк П. Д., Зелінський В. Ц., Серова І. А. Методика координації роботи регулюючих пристроїв при оптимальному управлінні режимами електричної системи // Устрійство перетворення інформації для контролю і управління в енергетиці. – Харків, 1992. – С. 108 - 112.
3. Бурков В. Н., Георгідзе І. А., Ловецький С. Е. Прикладні задачі теорії графів. – Тбілісі: Мецніереба, 1974. – 234 с.
4. Зелінський В. Ц., Остра Н. В. Оптимізація розрахункової моделі електроенергетичними системами для автоматизованих систем диспетчерського управління з урахуванням втрат потужності // Вісник ВПІ. – 2005. – № 4. – С. – 63 - 68.

**Зелінський Віктор Цезарович** – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем.

**Зелінський Вадим Вікторович** – студент інституту магістратури, аспірантури та докторантури.  
Вінницький національний технічний університет.