

## **МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ ТА ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕНЕРГОСИСТЕМ В УМОВАХ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

***А.М. СКРИПНИК, кандидат технічних наук***

*Розглядається розроблений комплекс програмного забезпечення для моделювання усталених та оптимальних режимів електричних мереж енергосистем в умовах їх експлуатації.*

***Моделювання, усталений, оптимальний, неоднорідні контури, лінеаризація, матриця коефіцієнтів, питомі транспортні витрати, математичні моделі, база даних.***

На кафедрі електропостачання ім. проф. В.М. Синькова НУБіП України розроблений комплекс програмного забезпечення «Розрахунки та оптимізація усталених режимів електричних мереж енергосистем» для моделювання усталених режимів та оптимізації неоднорідних контурів електричних мереж енергосистем.

Технічно-програмне забезпечення складають персональний комп'ютер (ПЕОМ) та програмно-розрахунковий комплекс: програма моделювання усталених режимів електричних мереж напругою 35 кВ і вище та програма оптимізації конфігурації експлуатаційних схем (оптимізація неоднорідних контурів) електричних мереж напругою 35 – 150 кВ; база даних моделей елементів електричних мереж енергосистем.

У програмі моделювання усталених режимів електричних мереж використаний класичний метод Ньютона – лінеаризація системи нелінійних рівнянь на кожному кроці ітераційного процесу [2,5]. Матриця коефіцієнтів  $A$  системи лінійних рівнянь  $A \cdot X = B$  формується у вигляді розрідженої матриці. Вирішення системи лінійних рівнянь реалізовано оберненням матриці коефіцієнтів методом Крута (прямий і зворотний хід) [3] з попереднім упорядкуванням виключення опорних рядків і стовпців з метою мінімізації появи нових елементів в оберненій матриці.

У програмі оптимізації конфігурації експлуатаційних схем електричних мереж напругою 35 – 150 кВ розмикання неоднорідних контурів моделюється методом питомих транспортних витрат [1] на основі моделі усталеного режиму.

База даних містить наперед внесені математичні моделі окремих елементів електричних мереж і систем (моделі ліній,

трансформаторів, вузлів) та допоміжну інформацію, на основі яких вищевказані програми формують відповідні розрахункові схеми з наступним моделюванням усталених чи оптимальних їх режимів.

*Моделі елементів електричних мереж енергосистем.*  
Розрахункові схеми електричних мереж енергосистем формуються з моделей (схем заміщення) ліній електропередачі, трансформаторів, генераторів, батарей статичних конденсаторів, реакторів та моделей вузлового споживання.

Повітряні та кабельні лінії електропередачі моделюються П-подібними схемами заміщення, в яких активний  $R_{\text{л}}$  і реактивний  $X_{\text{л}}$  опори (Ом) та активна  $G_{\text{л}}/2$  і реактивна  $B_{\text{л}}/2$  провідності по кінцях ліній (См) розраховуються згідно з марками проводів та довжинами відповідних ділянок.

Двообмоткові трансформатори і автотрансформатори моделюються Г-подібними схемами заміщення ( $R_T$  – активний опір та  $X_T$  – реактивний опір – паспортні дані відповідних типів трансформаторів і автотрансформаторів). Активна  $G_T$  та індуктивна  $B_T$  провідності визначаються як:

$$G_T = \frac{\Delta P_x}{U_{\text{НОМ}}^2}, \text{ СМ};$$

$$B_T = \frac{\Delta Q_x}{U_{\text{НОМ}}^2}, \text{ СМ}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{НОМ}}$  – номінальна напруга обмотки вищої напруги.

Коефіцієнт трансформації  $K_T$  (в.о.) визначається як відношення номінальної напруги обмотки вищої напруги  $U_i$  до номінальної напруги обмотки нижчої напруги  $U_j$ , тобто

$$K_T = \frac{U_i}{U_j}, \text{ в.о} \quad (2)$$

Триобмоткові трансформатори і автотрансформатори моделюються трипроменевою схемою заміщення і розглядаються як три двообмоткові трансформатори з однією спільною точкою з'єднання (середня точка).

Параметри  $R_{T1}, X_{T1}$  (обмотки вищої напруги),  $R_{T2}, X_{T2}$  (обмотки середньої напруги) та  $R_{T3}, X_{T3}$  (обмотки нижньої напруги) для відповідних типів трансформаторів і автотрансформаторів є розрахунковими величинами, приведені до номінальної напруги обмотки вищої напруги  $U_i$ .

При цьому коефіцієнт трансформації обмотки вищої напруги  $K_{T1} = 1$ , а коефіцієнти трансформації обмоток середньої та нижчої напруги визначаються як

$$K_{T2} = \frac{U_i}{U_m}; \quad K_{T3} = \frac{U_i}{U_n}, \quad (3)$$

де  $U_m$  і  $U_n$  – номінальні напруги відповідно обмоток середньої та нижньої напруги .

Параметри активної  $G_T$  та індуктивної  $B_T$  провідності розраховуються аналогічно, як і для двообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів.

Генератори електричної енергії (генераторні вузли) моделюються за умов наявності автоматичних регуляторів швидкості (АРШ) та автоматичних регуляторів збудження (АРЗ), які забезпечують відповідно необхідні значення видачі активної потужності  $P$  [МВт] та модуль напруги  $U$  [кВ] на шинах генератора. При цьому найпростіша математична модель генератора при моделюванні електричних систем має вигляд:  $P=const$ ,  $U=const$ . У разі відсутності вищевказаних автоматичних регуляторів генератори моделюються як:  $P=const$ ,  $Q=const$ .

Батареї статичних конденсаторів як генератори реактивної потужності, моделюються спрощеною математичною моделлю у вигляді  $Q=const$ , якщо автоматичне регулювання модуля напруги не передбачено;  $U = const$ , якщо передбачено автоматичне регулювання модуля напруги (фіксація модуля напруги).

Шунтові реактори в розрахункових схемах моделюються у вигляді реактивної провідності

$$B_p = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I_{НОМ}}{U_K \cdot U_{НОМ}}, \quad \text{мкСм}, \quad (4)$$

де  $U_K$  – падіння напруги в реакторі, яке для шунтових реакторів дорівнює  $100\% U_{НОМ}$ ;  $U_{НОМ}$  – номінальна напруга реактора, кВ;  $I_{НОМ}$  – номінальний струм реактора, А.

Споживання електричної енергії у вузлах розрахункової схеми моделюється статичними моделями активної  $P$  та реактивної  $Q$  потужності, тобто:  $P=const$ ,  $Q=const$ .

*Метод Ньютона та його використання для розв'язання систем нелінійних вузлових рівнянь усталеного режиму.* Існує ряд математичних методів розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж енергосистем (ЕМЕ) – Гауса, Зейделя, Ньютона та ін. Нині найбільше поширення набув метод Ньютона (та його модифікації), який належить до групи ітераційних методів розв'язання систем нелінійних алгебраїчних рівнянь.

Суть методу полягає в послідовній заміні на кожній ітерації обчислень вихідної нелінійної системи рівнянь деякою лінійною (лінеаризація), розв'язок якої дозволяє визначити чергові наближення невідомих величин. При застосуванні методу Ньютона система вузлових рівнянь усталеного режиму може бути записана як у вигляді вузлових потужностей  $P$  і  $Q$ , так і у вигляді їх небалансів  $\varepsilon P$ ,  $\varepsilon Q$ . Система рівнянь у вигляді вузлових небалансів активних і реактивних потужностей має вигляд:

$$\begin{aligned}\varepsilon P_i &= P_i + U_i^2 G_{ii} - U_i \sum U_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)), \\ \varepsilon Q_i &= Q_i - U_i^2 B_{ii} - U_i \sum U_j (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)),\end{aligned}\quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – символ нев'язки;  $i$  – індекс вузла, який розглядається;  $j$  – поточний індекс вузла, який має безпосередній електричний зв'язок з вузлом що розглядається;  $G_{ii}$ ,  $B_{ii}$ ,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  – дійсні та уявні складові елементів матриці вузлової провідності;  $\theta_i$ ,  $\theta_j$ ,  $U_i$ ,  $U_j$  – кути (фази) та модулі напруги  $i$ -го та  $j$ -го вузлів;  $P_i$ ,  $Q_i$  – задані значення вузлових потужностей.

Ітераційний метод Ньютона записується, як

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \delta X^{(k)} = X^{(k)} - \left[ \frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} \cdot F(X^{(k)}), \quad (6)$$

де  $k$  – порядковий номер ітерації;  $X$  – вектор невідомих величин;  $\delta X$  – вектор поправок до невідомих, який розраховується на кожному кроці ітераційного процесу;  $\frac{\partial F}{\partial X}$  – матриця частинних похідних (матриця Якобі) від заданої вектор-функції за невідомим вектором;  $[ ]^{-1}$  – символ, що означає операцію розв'язання лінійної системи рівнянь з матрицею Якобі, вектором поправок до невідомих  $\delta X^{(k)}$  та вектором правих частин  $F(X^{(k)})$ .

Як елементи вектора невідомих величин виступають кути та модулі напруги вузлів  $\theta$  і  $U$ . Відповідно матриця Якобі складається із блоків

$$\frac{\partial F}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_p}{\partial \theta} & \frac{\partial F_p}{\partial U} \\ \frac{\partial F_q}{\partial \theta} & \frac{\partial F_q}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Виходячи з (5), (6) і (7), ітераційний процес Ньютона має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ U \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ U \end{bmatrix}^{(k)} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon P}{\partial \theta} & \frac{\partial \varepsilon P}{\partial U} \\ \frac{\partial \varepsilon Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \varepsilon Q}{\partial U} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \varepsilon P \\ \varepsilon Q \end{bmatrix}^{(k)}, \quad (8)$$

згідно з яким поправки  $\delta \theta$  і  $\delta U$  до невідомих величин визначаються на кожній ітерації розв'язанням системи лінійних рівнянь

$$\begin{bmatrix} \delta\theta \\ \delta U \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon P}{\partial \theta} & \frac{\partial \varepsilon P}{\partial U} \\ \frac{\partial \varepsilon Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \varepsilon Q}{\partial U} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \varepsilon P \\ \varepsilon Q \end{bmatrix}^{(k)} \quad (9)$$

Система лінійних рівнянь (9) як складова (8) розв'язується з використанням алгоритму Крута ( $LU$  – факторизація) та врахуванням розрідженості матриці Якобі [4], яка формується за допомогою ланцюгових посилань на ненульові елементи. Матриця провідності вузлів, що використовується при формуванні розрідженої матриці Якобі, має модель адресних посилань.

Розрахунок усталеного режиму ЕМЕ при відомих вузлових потужностях (споживання, генерація) починається з перших наближень невідомих величин, якими є номінальні значення напруги вузлів (крім балансуєчого і вузлів з фіксацією модуля напруги, в яких величина модулів напруги визначається експлуатаційно-технологічними умовами) та нульові значення кутів напруги вузлів з подальшим їх уточненням в ході ітераційного процесу.

Процес розрахунку усталеного режиму ЕМЕ вважається закінченим, якщо елементи вектора вузлових небалансів  $\varepsilon P$  і  $\varepsilon Q$  стають меншими або дорівнюють наперед заданій величині, яка визначає точність результатів розрахунків.

*Метод питомих транспортних витрат та використання його при оптимізації конфігурації схем електричних мереж.* Як відомо, кожна ділянка електричної мережі (лінії електропередач, трансформатори і автотрансформатори) характеризується поздовжніми параметрами – активним  $R$  та реактивним  $X$  опорами, в яких перетікання активної і реактивної потужностей в умовах експлуатації супроводжується технологічними витратами активної потужності на ділянці  $i - j$ :

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij}, \quad (10)$$

де  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ ,  $U_i$  – відповідно активний і реактивний перетоки початку ділянки  $i - j$  та модуль напруги вузла початку ділянки.

Одним із шляхів зниження технологічних витрат активної потужності в електричній мережі є зміна її конфігурації на основі найбільш простих і доступних показників питомих транспортних витрат (ПТВ). Це частинні похідні від витрат активної потужності за активною потужністю, яка передається від джерел генерації до конкретного споживача. Для кожної ділянки  $i - j$  електричної мережі ПТВ визначаються відповідно до (10), як:

$$\lambda'_{ij} = \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{2P_{ij}}{U_i^2} R_{ij}. \quad (11)$$

Розрахунок ПТВ за схемою складної (розгалуженої) електричної мережі виконується згідно з шляхами електропостачання від вузлів генерації до кінцевих вузлів розімкнутої мережі та місць розподілу потоків у замкнутій мережі. Якщо шлях електропостачання від вузла генерації  $S$  до вузла електроспоживання  $f$  не має відгалужень, величина  $\lambda'_{sf}$  знаходиться як алгебраїчна сума ПТВ ділянок, що є між вузлами  $S$  і  $f$  згідно з виразом (11). Якщо шлях розгалуджується на два і більше напрямків, відповідно розгалуджується розрахунок ПТВ. У замкнутій мережі розгалужені шляхи можуть знову зійтись у деякому вузлі  $K$  з різними значеннями  $\lambda'_{sk}$ . Для подальшого руху за схемою мережі від вузла  $K$  до вузла  $f$  необхідно для вузла  $K$  розрахувати середньоарифметичне значення  $\lambda'_{sk}$  по шляхах його електропостачання як від одного, так і від різних вузлів генерації.

Однією з вимог зниження (мінімізації) технологічних витрат активної потужності в електричній мережі є необхідність, щоб у вузлах сходження шляхів розрахунку величини  $\lambda'_{sf}$ , отримані різними шляхами, збігалися (були максимально наближеними).

За таких умов зниження технологічних витрат можливе шляхом розмикання замкнутої електричної мережі в оптимально вибраних місцях з метою виключення неоднорідних контурів (оптимізація розмикання неоднорідних контурів).

Необхідно зазначити, що виконання оптимізаційних розрахунків по розмиканню неоднорідних контурів електричної мережі базується на результатах моделювання її усталеного режиму.

*База даних моделей елементів електричних мереж енергосистем* включає дві таблиці – «Вузли» (математичні моделі вузлів) та «Ділянки» (математичні моделі ліній електропередач, трансформаторів і автотрансформаторів).

Структурно наведені таблиці мають форму прямокутних матриць, елементи рядків яких включають відповідно складові математичних моделей вузлів схеми (модуль і кут напруги, активне і реактивне споживання та активну і реактивну генерацію) та її ділянок (активні і реактивні опори, активні і реактивні провідності та дійсні і уявні коефіцієнти трансформації трансформаторних ділянок).

Кожен рядок таблиці «Вузли», крім складових математичних моделей вузлів, включає ряд допоміжних елементів: назву вузла; номер вузла; ознаку статусу вузла (балансуючий – 1, з фіксацією модуля напруги – 2, з фіксованою потужністю – 0); номінальну напругу вузла; модуль фіксованої напруги та нижню і верхню границі обмеження реактивної потужності (тільки для вузлів з регульованою реактивною потужністю); активну та реактивну провідності вузлів; нижню та верхню границі обмеження модуля напруги (тільки для вузлів з регулюванням напруги).

Кожен рядок таблиці «Ділянки», крім складових математичних моделей ділянок, включає також ряд допоміжних елементів: номери початку та кінця ділянок; ознаку паралельності – 1,2... (тільки для паралельних ділянок); ознаку фізичного стану ділянки (включена – 0, відключена – 1); ознаку заборони на відключення ділянки – 1 (використовується тільки задачею оптимізації конфігурації схеми електричної мережі).

Налагодження програмних компонентів комплексу виконувалось на реальних схемах електричних мереж із досягненням ідентичності результатів, отриманих при використанні промислових програм відповідного профілю.

На даний час розроблений програмно-розрахунковий комплекс використовується студентами факультету енергетики і автоматики зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання» при виконанні курсового проекту з дисципліни «Математичні задачі енергетики» та при виконанні бакалаврських і магістерських робіт.

### **Висновки**

Використання програмно-розрахункового комплексу в навчальному процесі дає можливість студентам отримати практичні навички для вирішення конкретних технологічних питань управління електричними мережами енергосистем, набути досвіду в підготовці моделей елементів електричних систем і використанні бази даних для їх збереження, навчитися використовувати діючі програмні засоби моделювання усталених та оптимальних режимів електричних мереж енергосистем, а також виконувати аналіз результатів розрахунків та, в разі необхідності, приймати і реалізовувати правильні рішення. При виконанні бакалаврських і магістерських робіт обов'язковою умовою є проведення розрахунків на фрагментах реальних схем електричних мереж з максимальним наближенням до технології розрахунків і аналізу результатів, які проводяться службами режимів енергосистем і обленерго.

### **Список літератури**

1. Щербина Ю.В. Автоматизация управления технологическим расходом и потреблением электроэнергии /Щербина Ю.В., Лепорский В.Д., Жмурко В.А. – К.: Техніка, 1984. – 113 с.

2. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / Идельчик В.И.; под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. –189 с.

3. Щербина Ю.В. Моделирование установившихся режимов электрических систем с использованием алгоритма Краута /Щербина Ю.В., Скрипник А.Н., Гадер О.М. // Энергетика. – 1988. –№1. – С.10–13.

4. Брамеллер А. Слабо заполненные матрицы: Анализ электроэнергетических систем / Брамеллер А., Аллан Р., Хэмэм Я. – М.: Энергия, 1979. –192 с.

5. Электрические системы. / Математические задачи электроэнергетики; под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1970.–336 с.

*Рассматривается разработанный комплекс программного обеспечения для моделирования установившихся и оптимальных режимов электрических сетей энергосистем в условиях их эксплуатации.*

***Моделирование, установившийся, оптимальный, неоднородные контуры, линеаризация, матрица коэффициентов, удельные транспорт-ные расходы, математические модели, база данных.***

*The developed software for modeling of steady-state and optimal condidtions of electricity networks of circuits of energy systems under operational conditions is described.*

***Modelling, steady-state, optimal, unhomogenous contours, linearization, matrix, cost transport per units, mathematical models, database.***