

О. Б. Бурикін, канд. техн. наук, доц.;  
В. А. Видмиш

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ НА БАЗІ ІНТЕРНЕТ ТЕХНОЛОГІЙ

*Проведено вдосконалення математичного забезпечення автоматизації оптимального керування електричними системами (ЕС). Запропоновано математичну модель уточнення оптимальних за критерієм мінімуму втрат потужності коефіцієнтів трансформації трансформаторів ЕС з урахуванням змінних параметрів ЕС. Показано, що використання Інтернет технологій та розробка на їх базі відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення, дозволяє деталізувати розрахунки з визначення оптимальних параметрів регульовальних пристроїв у системоутворювальних електричних мережах (ЕМ).*

### Вступ

Оптимальне керування нормальними режимами (НР) ЕМ є одним з найменш витратних засобів підвищення ефективності функціонування транспортних енергокомпаній. Класично, як критерій оптимального керування НР ЕМ використовуються втрати активної електроенергії на її передачу від джерел електроенергії до її споживачів. З метою підвищення економічності функціонування ЕМ необхідно максимально деталізувати розрахунки з визначення втрат у кожному елементі мережі з метою виявлення зон підвищених технічних і комерційних втрат, техніко-економічної оцінки доцільності проведення конкретних оптимізаційних заходів для їх зменшення і т. д. [1].

Кількісна оцінка обраного критерію оптимального керування залежить від наявних параметрів електричної мережі, що обумовлює вибір методу розрахунку. В більшості випадків, втрати електроенергії розраховуються за спрощеними методиками, внаслідок відсутності точної інформації про параметри електричної мережі, однак для системоутворювальних електричних мереж інформація про параметри є достатньо достовірною. Тому одним із актуальних напрямків підвищення якості оптимального керування у таких мережах є уточнення реальних активних опорів проводів з урахуванням навантажувального струму, що протікає по лініям, температури навколишнього середовища та швидкості вітру в темпі процесу оптимального керування ЕС.

Найвідомішою методикою уточнення активного опору проводів повітряних ліній є його розрахунок за таким виразом [2]:

$$R = R_{20} \left[ 1 + \alpha_t (t_{\text{пр}} - 20) \right], \quad (1)$$

де  $R_{20}$  — питомий активний опір при температурі проводу  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом/км (набуває різних значень в залежності від матеріалу — мідь чи алюміній);  $\alpha_t = 0,004$  — температурний коефіцієнт питомого електричного опору сталевалюмінієвих проводів,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $t_{\text{пр}}$  — температура проводу,  $^{\circ}\text{C}$ .

В цьому виразі невідомою величиною є температура проводу, оскільки її значення залежить від багатьох факторів, таких як: електричний струм, що протікає в проводі, температура навколишнього середовища та швидкість вітру, які в свою чергу змінюються не тільки протягом року, а й протягом доби чи години. Відповідно, актуальним є врахування саме цієї величини в розрахунках реальних активних опорів ЕС, оскільки традиційно в довідниках прийнято їх значення приводити до температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В [2] показано, що відносні похибки розрахунку питомого активного опору від температури навколишнього середовища змінюються від  $-8$  до  $24\%$  в діапазоні зміни температури від  $-40$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким чином, неврахування метеопараметрів у розрахунковій моделі оптимального керування може привести до суттєвого відхилення від очікуваних результатів. Крім того, оперативне керування в темпі процесу призводить до накопичення такої похибки протягом звітної періоду та впливає на ефективність прийнятих рішень з оптимізації поточкорозпроділу.

На сьогоднішні практична реалізація врахування зовнішніх впливів навколишнього середовища

в системоутворювальних мережах ОЕС України реалізована мало, зважаючи на відсутність методики нормування втрат для таких електричних мереж, а також використання у розрахунках наближеної методики врахування кліматичних втрат на корону та витoki у ізоляторах [3].

У статті пропонується використання відомого підходу оптимізації потоків потужності в складнозамкнених електричних мережах за допомогою введення в замкнені контури зрівнювальних е. р. с. регульовальними пристроями силових трансформаторів [4, 5]. На відміну від [4] запропонована математична модель у матричній формі враховує змінні параметри електричної мережі у явному вигляді, що дозволяє отримувати вектор оптимальних коефіцієнтів трансформації, базуючись не лише на умовно постійних параметрах заступної схеми та інформації про зміни режиму навантаження, а і з урахуванням навантажувального струму  $I_H$ , що протікає по лініям, температури навколишнього середовища  $t$  та швидкості вітру  $v$ . Пропонований підхід дозволить проводити аналіз чутливості оптимальних рішень у задачах керування поточкорозподілом ЕС з урахуванням змінних параметрів електричної мережі.

### Математична модель нормального режиму ЕС з урахуванням змінних параметрів

Спрощену заступну схему ЛЕП можна подати у вигляді заступної схеми з ідеальними трансформаторами (рис. 1), яка відповідає таким припущенням [6]:

- не враховується насичення сталі трансформатора;
- струм намагнічування береться рівним нулю;
- опір трансформатора, зведений до первинної напруги, не перераховується у разі зміни коефіцієнта трансформації трансформатора.

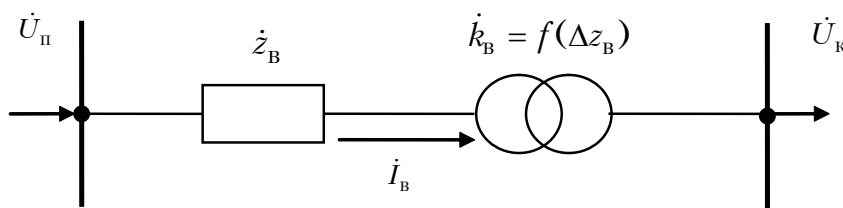


Рис. 1. Заступна схема вітки ЕЕС з ідеальним трансформатором

Зазвичай коефіцієнт трансформації такої лінії буде дорівнювати одиниці, але для уточнення активного опору його можна представити у вигляді функції від зміни параметрів навколишнього середовища, що можуть враховуватись у вигляді інтегрального показника зміни опору вітки  $\Delta z_B = f(t, v, I_H)$ .

Коефіцієнт трансформації вітки визначиться зі співвідношення напруги початку  $\dot{U}_П$  та кінця лінії  $\dot{U}_К$ , справедливого для режиму холостого ходу  $\dot{U}_П = \dot{k}_B \dot{U}_К$ . Тоді для режиму навантаження:

$$\dot{z}_B \dot{I}_B = \dot{U}_П - \dot{k}_B \dot{U}_К, \quad (2)$$

де  $\dot{k}_B$  — комплексний коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора;  $\dot{I}_B$  — струм у вітці;  $\dot{z}_B$  — опір вітки.

Якщо ідеальні трансформатори розмістити в усіх вітках заступної схеми, то відповідно до (2), можна записати матричний вираз [6]

$$\dot{z}_B \dot{I}_B = \dot{U}_П - \dot{K} \dot{U}_К, \quad (3)$$

де  $\dot{z}_B$  — діагональна матриця повних опорів віток розрахункової схеми ЕЕС;  $\dot{I}_B$  — матриця струмів у вітках;  $\dot{K}$  — діагональна матриця комплексних коефіцієнтів трансформації (якщо в  $i$ -й вітці реальний трансформатор відсутній, то  $i$ -й діагональний елемент  $\dot{k}_{i,i} \neq 1$ , та визначається зі співвідношення первинної і вторинної напруг і враховується у вигляді ідеального трансформатора);  $\dot{U}_П$ ,  $\dot{U}_К$  — вектори напруг вузлів, що є вузлами, відповідно, початку та кінця віток (у вітках з трансформаторами вузол початку відповідає первинній стороні).

### Визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку з урахуванням змінних параметрів

Як відомо, е. р. с. небалансу у відносних одиницях визначається добутком коефіцієнтів трансформації, що входять у контур з урахуванням напрямку його обходу [4, 5, 7]:

$$\dot{E}_{\text{нб}^*} = 1 - \dot{\mathbf{k}}, \quad (4)$$

де  $\dot{E}_{\text{нб}^*} = \dot{E}_{\text{нб}} \cdot U_6^{-1}$ ;  $\dot{E}_{\text{нб}}$  — вектор е. р. с. небалансу;  $U_6$  — напруга балансуєчого вузла;  $\dot{\mathbf{k}}$  — вектор добутків коефіцієнтів трансформації, що входять у контур з урахуванням напрямку його обходу.

Зауважимо, що для урахування змінних параметрів віток, вектор добутків коефіцієнтів трансформації  $\dot{\mathbf{k}}$  виразу (4) для ЛЕП буде містити значення, відмінні від одиниці.

Для забезпечення однозначності розв'язання задачі оптимізації струморозподілу в ЕС [7] кількість регульованих трансформаторів береться рівною кількості контурів, тобто решта трансформаторів, що входять у контур, є незмінними. Тоді кожний елемент виразу (4) визначається так:

$$\dot{E}_{\text{нб}^* d} = 1 - \prod_d \dot{k}^{\text{дер}} \cdot \dot{k}_d^{\text{хор}}, \quad (5)$$

де  $\dot{k}_d^{\text{хор}}$  — коефіцієнт трансформації регульованого трансформатора, що знаходяться в хорді  $d$ -го контуру заступної схеми;  $\prod_d \dot{k}^{\text{дер}}$  — добуток коефіцієнтів трансформації трансформаторів  $d$ -го контуру заступної схеми, які входять у дерева графа та враховують змінні параметри.

Використавши математичну модель оптимальних коефіцієнтів трансформації в координатах потужностей вузлів заступної схеми ЕС запропоновану в [5], отримаємо:

$$\dot{\mathbf{k}}^{\text{хор}}(t) = \dot{\mathbf{k}}_{\text{діаг}}^{\text{дер}-1} \cdot \mathbf{n}_t + \dot{\mathbf{k}}_{\text{діаг}}^{\text{дер}-1} \cdot \dot{\mathbf{N}}_{\text{к зб}} \cdot \dot{\mathbf{z}}_v \cdot \dot{\mathbf{C}}_e \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\mathbf{S}}_d(t) \cdot \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}(t) \cdot \mathbf{n}_t \cdot U_6^{-1}(t), \quad (6)$$

де  $\dot{\mathbf{k}}_{\text{діаг}}^{\text{дер}}$  — діагональна матриця, кожен елемент якої є добутком коефіцієнтів трансформації трансформаторів, що входять у відповідний контур та належать до віток дерева графу;  $\mathbf{n}_t$  — одиничний транспонований вектор-рядок;  $\dot{\mathbf{N}}_{\text{к зб}}$  — матриця зв'язків віток у контурах заступної схеми ЕС з урахуванням комплексних збалансованих коефіцієнтів трансформації, що на відміну від матриці з'єднань віток у контурах схеми  $N$  для віток, які входять в  $i$ -й контур, містить добутки коефіцієнтів трансформації трансформаторних віток у напрямку обходу цього контуру;  $\dot{\mathbf{C}}_e$  — матриця коефіцієнтів струморозподілу для заступної  $r$ -схеми;  $\dot{\mathbf{U}}_d$  — вектор вузлових напруг;  $\dot{\mathbf{S}}_d$  — вектор потужностей у вузлах.

Вираз (6) використовується у якості математичної моделі оптимальних коефіцієнтів трансформації з урахуванням змінних параметрів віток ЕМ, які у явному вигляді входять у вектор добутків коефіцієнтів трансформації.

### Урахування метеопараметрів на базі Інтернет технологій

З часу затвердження державної методики визначення втрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередач комп'ютерні технології та інформаційне забезпечення ЕМ набули значного розвитку. З появою Інтернет технологій отримання інформації та можливої автоматизації доступу до неї, наявністю загальнодоступних геоінформаційних Інтернет систем, що дозволяють отримувати інформацію про метеопараметри з прив'язкою до географічного положення, використання наближених методик розрахунку втрат електроенергії є технічно не обґрунтованим та економічно недоцільним.

На сьогоднішній день існує низка серверів Інтернет, які дозволяють отримувати метеопараметри з прив'язкою до географічного положення, а також відображення цієї інформації на топологічній або супутниковій карті землі.

Прикладом таких технологій є використання інтерфейсу програмування програмних додатків (API) Карт Google, що дозволяє вбудовувати Карти Google на сторінки сайтів за допомогою JavaScript (рис. 2). На рис. 2 лініями білого кольору зображено системоутворювальні електричні

мережі 750—330 кВ з підстанціями та межі областей України нанесені на супутникове зображення поверхні землі. Оперативна інформація про поточну температуру навколишнього середовища та її прогноз також зображена на карті та надається Глобальним центром прогнозів погоди (Weather Channel Global Forecast Center — GFC) за допомогою глобальної мережі Інтернет сайтом weather.com.



Рис. 2. Приклад використання інтерфейсу програмування програмних додатків (API) Карт Google

Розробка відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення, дозволить деталізувати розрахунки з визначення втрат електроенергії у системоутворювальних електричних мережах. Наявність такого програмного забезпечення дасть можливість точнішого відокремлення втрат та технологічних витрат електроенергії для оцінки ефективності оптимального керування та проведених електроощадних заходів.

## Висновки

1. Запропонована математична модель уточнення оптимальних за критерієм мінімуму втрат потужності коефіцієнтів трансформації трансформаторів ЕС, яка містить змінні параметри ЕЕС, дозволяє визначати оптимальні коефіцієнти трансформації з урахуванням навантажувального струму, що протікає по лініям, температури навколишнього середовища та швидкості вітру. Це має важливе значення для реалізації оптимального керування перетоками потужності з метою виявлення зон підвищених технічних і комерційних втрат, техніко-економічної оцінки доцільності проведення конкретних оптимізаційних заходів по їх зменшенню.

2. Використання Інтернет технологій для оцінки метеопараметрів з прив'язкою до географічного положення дозволить виконувати оптимальне керування НР ЕМ з урахуванням впливу змінних параметрів на процес прийняття оптимальних рішень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях : Руководство для практических расчетов // Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. — М. : ЭНАС, 2008. — 280 с. — ISBN 978-5-93196-910-7.
2. Воротицкий В. Э. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий / В. Э. Воротицкий, О. В. Туркина // Электрические станции. — 2008. — № 10. — С. 42—49.
3. Методика по визначенню втрат електроенергії в трансформаторах і лініях електропередач / затв. заст. Міністра енергетики України з енергетичного нагляду В. А. Дарчук — Київ, 1998 р.
4. Холмский В. Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности / В. Г. Холмский // Электричество. — 1965. — № 9. — С. 16—21.
5. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. — К. : Наукова думка, 1992. — 216 с.
6. Алексеев В. М. Оптимальное управление / В. М. Алексеев, В. М. Тихомиров, С. В. Фомин. — М. : Наука, 1979. — 336 с.
7. Лежнюк П. Д. Моделювання та формування умов самооптимізації режимів електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, К. І. Кравцов // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки : тематичний випуск. — 2002. — Ч. 3.— С. 96—101.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 20.10.11

Рекомендована до друку 20.11.11

**Бурикін Олександр Борисович** — доцент, **Видмиш Володимир Андрійович** — асистент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет