

УДК 621.311.

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; О. Б. Бурикін, к. т. н.; В. О. Лесько, асист.

## ЧУТЛИВІСТЬ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ДО ЗМІНИ ТРАНЗИТНИХ ПЕРЕТІКАНЬ

Розроблено метод оцінки чутливості параметрів режиму електроенергетичної системи (ЕЕС) до зміни навантаження у вузлах схеми. Можливість оцінки чутливості до зміни навантаження у вузлах примикання з іншими системами дозволяє оцінювати чутливість втрат від транзитних перетікань в окремих елементах ЕЕС. Метод ґрунтується на використанні алгоритмів і програм розрахунку з урахуванням оцінки взаємовпливу електричних мереж ЕЕС, які мають трансформаторні зв'язки.

**Ключові слова:** електроенергетична система, транзит потужності, аналіз чутливості, розподіл втрат потужності.

### Вступ

Беручи до уваги той факт, що електроенергетична система (ЕЕС) відкрита для всіх учасників оптового ринку електроенергії, постає задача дослідження впливу транзитних перетікань потужності (ТПП) на рівень додаткових втрат електроенергії та їх зменшення у мережах ЕЕС. На сьогодні існує низка методів визначення втрат від транзитних перетікань (ВТП) в ЕЕС [1 - 4]. Вони призначені для визначення втрат електроенергії за певний період часу. З різних причин значення транзитних перетікань протягом часу можуть суттєво змінюватися, в залежності від шляхів протікання транзиту та місця примикання з іншими системами (рис. 1), що впливає на точність визначення ВТП. Відсутність методів оперативного розрахунку ВТП не дозволяє вчасно коригувати параметри регулюючих пристроїв, призначених для оптимізації транзитних перетікань.

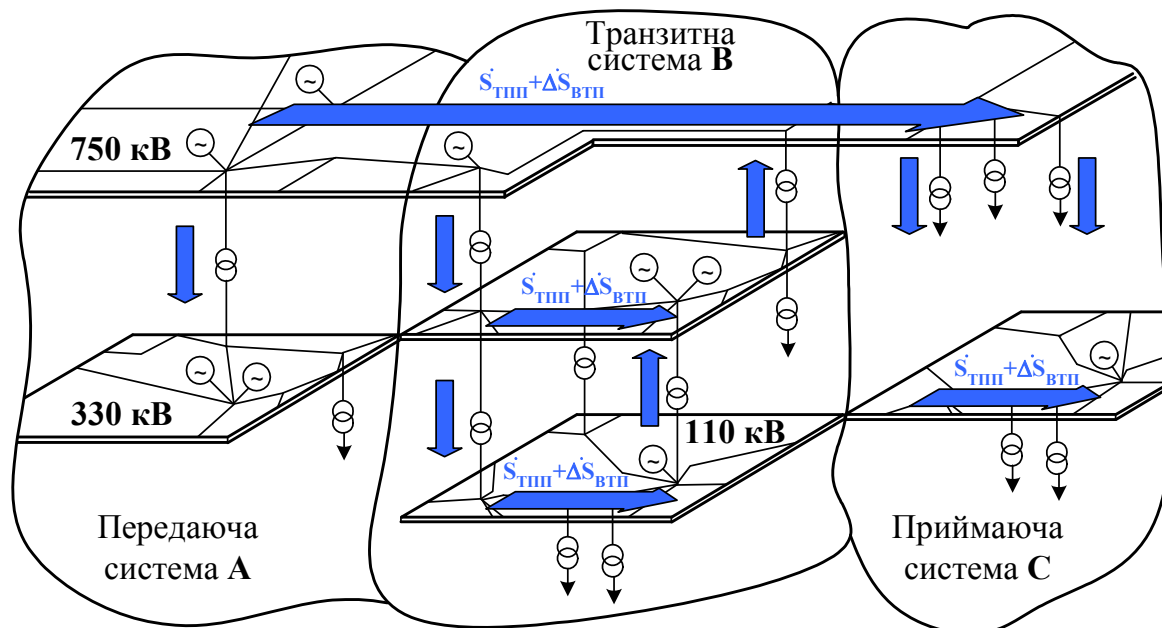


Рис. 1. Приклад транзитних перетікань електроенергії

Для оперативного моніторингу ВТП й оптимального керування транзитними перетіканнями необхідні відповідні методи. Однією із задач цих методів є визначення елементів ЕЕС, які є найбільш чутливими до транзитних перетікань і в яких ВТП найбільше

змінюються під час збурень як зовнішніх, так і внутрішніх. Врахування чутливості оптимальних рішень до зміни значення транзитних перетікань дозволить, виявивши в ЕЕС найбільш чутливі елементи, здійснювати заходи щодо зменшення втрат активної потужності ефективніше та економічно доцільнішими способами. Крім того зміна параметрів в цих елементах дасть змогу в найбільшій мірі зменшити неоднорідність системи і, таким чином, наблизити її до однорідного стану, зменшуючи додаткові втрати потужності.

Ця стаття присвячена розробці методу оцінки чутливості параметрів режиму ЕЕС до зміни навантаження у вузлах схеми ЕЕС, в тому числі у вузлах примикання з іншими системами (останнє дозволяє оцінювати чутливість ВТП в окремих елементах ЕЕС). Метод ґрунтується на використанні алгоритмів і програм розрахунку з урахуванням оцінки взаємовпливу електричних мереж ЕЕС які мають трансформаторні зв'язки [6].

### Визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності

В [6] показано, що втрати потужності у вітках схеми ЕЕС із урахуванням коефіцієнтів трансформації в неявному вигляді визначаються таким чином:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{S}}, \quad (1)$$

де  $\dot{\mathbf{T}}$  – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках електричних мереж в залежності від потужностей у їх вузлах з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку;  $\dot{\mathbf{S}}$  – вектор навантажень у вузлах схеми.

Відповідно (1) втрати потужності в і-й вітці ЕЕС розраховуються за виразом:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \dot{\mathbf{T}}_i \dot{\mathbf{S}},$$

де

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_o^{-1}, \quad (2)$$

рядок матриці  $\dot{\mathbf{T}}$ , що відповідає і-й вітці;  $\dot{\mathbf{U}}_t$  – транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і базисний;  $\mathbf{M}_{\Sigma i}$  – і-й рядок матриці з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансуєчий;  $\hat{\mathbf{C}}_i$  – і-й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах по вітках схеми;  $\dot{\mathbf{U}}_o$  – діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і балансуєчий.

Припустимо, що коефіцієнти розподілу втрат потужності  $\dot{\mathbf{T}}$  у вітках не залежать від потужності транзитних перетікань і є незмінними. Тоді під час зміни навантаження у вузлах зміняться втрати потужності в і-й вітці, значення яких розраховуються відповідно до виразу:

$$\delta \Delta \dot{S}_{ei} = \dot{\mathbf{T}}_i \delta \dot{\mathbf{S}}, \quad (3)$$

де  $\delta \dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$  – зміна потужності навантаження вузлів ЕЕС під час переходу від k-го до k+1-го режиму.

Якщо зміна потужності навантаження відбувається лише в j-му вузлі, то приріст втрат потужності в і-й вітці від зміни потужності навантаження j-го вузла визначиться так:

$$\delta \Delta \dot{S}_{ij} = i_{ij} \delta \dot{S}_j. \quad (4)$$

З виразу (4) випливає, що:

$$i_{ij} = \frac{\delta \Delta \dot{S}_{ij}}{\delta \dot{S}_j}. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $i_{ij}$  відповідає вимогам, наведеним у [7], і є коефіцієнтом чутливості втрат потужності в і-й вітці до зміни потужності навантаження j-го вузла. Отже, матриця  $\dot{\mathbf{T}}$  встановлює зв'язок між приростами втрат потужності у вітках ЕЕС і змінами потужності

навантаження у вузлах і є матрицею чутливості, кожен коефіцієнт якої складається з елементів виду  $t_{ij}$ .

На практиці в ЕЕС є задачі, коли у вузлах змінюються тільки активна або реактивна потужності. Якщо в транзитному перетіканні змінюється тільки активна потужність ( $\delta Q_j = 0, \delta P_j \neq 0$ ), то з (5) витікає, що:

$$t_{ij} = \frac{\delta \Delta P_{ij}}{\delta P_j} + j \frac{\delta \Delta Q_{ij}}{\delta P_j}. \quad (6)$$

В іншому випадку, під час компенсації реактивного перетоку у вузлі змінюється тільки реактивна потужність (вмикається або вимикається джерело реактивної потужності,  $\delta Q_j \neq 0, \delta P_j = 0$ ), тоді відповідно до виразу (5) отримуємо, що:

$$t_{ij} = \frac{\delta \Delta Q_{ij}}{\delta Q_j} - j \frac{\delta \Delta P_{ij}}{\delta Q_j}. \quad (7)$$

Оскільки критерієм оптимальності нормального режиму ЕЕС в цій роботі є втрати активної потужності, то особливий інтерес представляють собою перша складова виразу (6) і друга складова виразу (7). Відповідно до вказаних коефіцієнтів формуються матриці чутливості  $T_{iP}$  і  $T_{iQ}$  втрат активної потужності у вітках до зміни активної і реактивної потужностей навантаження у вузлах відповідно. Тоді втрати активної потужності в і-й вітці при зміні потужності навантаження у вузлах визначаються за виразом:

$$\delta \Delta P_{iP} = T_{iP} \delta P, \quad \delta \Delta P_{iQ} = T_{iQ} \delta Q, \quad (8)$$

де  $\delta P$  і  $\delta Q$  – зміна активної і реактивної потужностей навантаження у вузлах ЕЕС відповідно.

### Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках до напруги у вузлах

Як видно з (2), значення коефіцієнтів матриці чутливості  $\dot{T}$  в загальному випадку залежать від напруги у вузлах  $\dot{U}_i$ , яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах. У цьому випадку під час зміни потужності у вузлах, втрати потужності в і-й вітці зміняться і, на відміну від (3), будуть рівні:

$$\delta \Delta \dot{S}_i = \dot{T}_i^k \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \dot{S}^{k+1}.$$

З урахуванням того, що  $\dot{S}^{k+1} = \dot{S}^k - \delta \dot{S}$ , а  $\delta \dot{T}_i = \dot{T}_i^k - \dot{T}_i^{k+1}$ , останній вираз переписується:

$$\begin{aligned} \delta \Delta \dot{S}_i &= (\delta \dot{T}_i + \dot{T}_i^{k+1}) \cdot \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \cdot (\dot{S}^k - \delta \dot{S}) = \\ &= \delta \dot{T}_i \cdot \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \cdot \dot{S}^k - \dot{T}_i^{k+1} \cdot \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \cdot \delta \dot{S}, \end{aligned}$$

або

$$\delta \Delta \dot{S}_i = \delta \dot{T}_i \dot{S}^k + \dot{T}_i^{k+1} \delta \dot{S}. \quad (9)$$

Якщо зміни відбулися тільки в одному вузлі – j-му, то відповідно до (9), приріст втрат потужності в і-й вітці від зміни потужності в j-му вузлі  $\delta \Delta \dot{S}_j$  визначатимуться так:

$$\delta \Delta \dot{S}_{ij} = \delta t_{ij} \dot{S}_j^k + t_{ij}^{k+1} \delta \dot{S}_j. \quad (10)$$

З останнього виразу коефіцієнт чутливості втрат потужності в і-й вітці до зміни потужності в j-му вузлі при переході від k-го до k+1-го режиму з урахуванням зміни напруги у вузлах визначається таким чином:

$$i_{ij}^{k+1} = \frac{\delta \Delta \dot{S}_{ij}}{\delta \dot{S}_j} - \frac{\delta i_{ij}}{\delta \dot{S}_j} \dot{S}_j^k. \quad (11)$$

Порівнюючи (5) і (11), бачимо, що загалом, чутливість втрат потужності в і-й вітці до зміни потужності j-го вузла зумовлена також коефіцієнтом чутливості  $\frac{\delta i_{ij}}{\delta \dot{S}_j}$  та значенням потужностей навантажень вузлів у вихідному режимі  $\dot{S}_j^k$ .

Вираз для визначення коефіцієнтів чутливості  $\delta i_{ij}$  визначається як різниця коефіцієнтів матриці  $\dot{\mathbf{T}}$  для k-го та k+1-го режиму, кожен з яких визначається з (2):

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{T}}_i &= \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} = (\dot{\mathbf{U}}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma i}) \widehat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_o^{-1})^k - (\dot{\mathbf{U}}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma i}) \widehat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_o^{-1})^{k+1} = \\ &= \widehat{\mathbf{C}}_i (\delta \dot{\mathbf{U}}_{io}^k - \delta \dot{\mathbf{U}}_{io}^{k+1}), \end{aligned}$$

де  $\delta \dot{\mathbf{U}}_{io}$  – діагональна матриця, кожен елемент якої визначається з відношення:

$$\frac{\Delta \dot{U}_i}{\dot{U}_j}, \quad j = \overline{1, m},$$

де  $\Delta \dot{U}_i = \dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}$  – спад напруги в і-й вітці схеми.

Значення коефіцієнтів матриці  $\dot{\mathbf{T}}$  дозволяє визначити, які вітки найбільше реагують на зміну напруги у вузлах, яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах.

### Алгоритм визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності

Структурно-логічна схема визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності від збурень, викликаних зміною навантаження вузлів ЕЕС, та протікання транзитних перетоків потужності наведена на рис. 2.

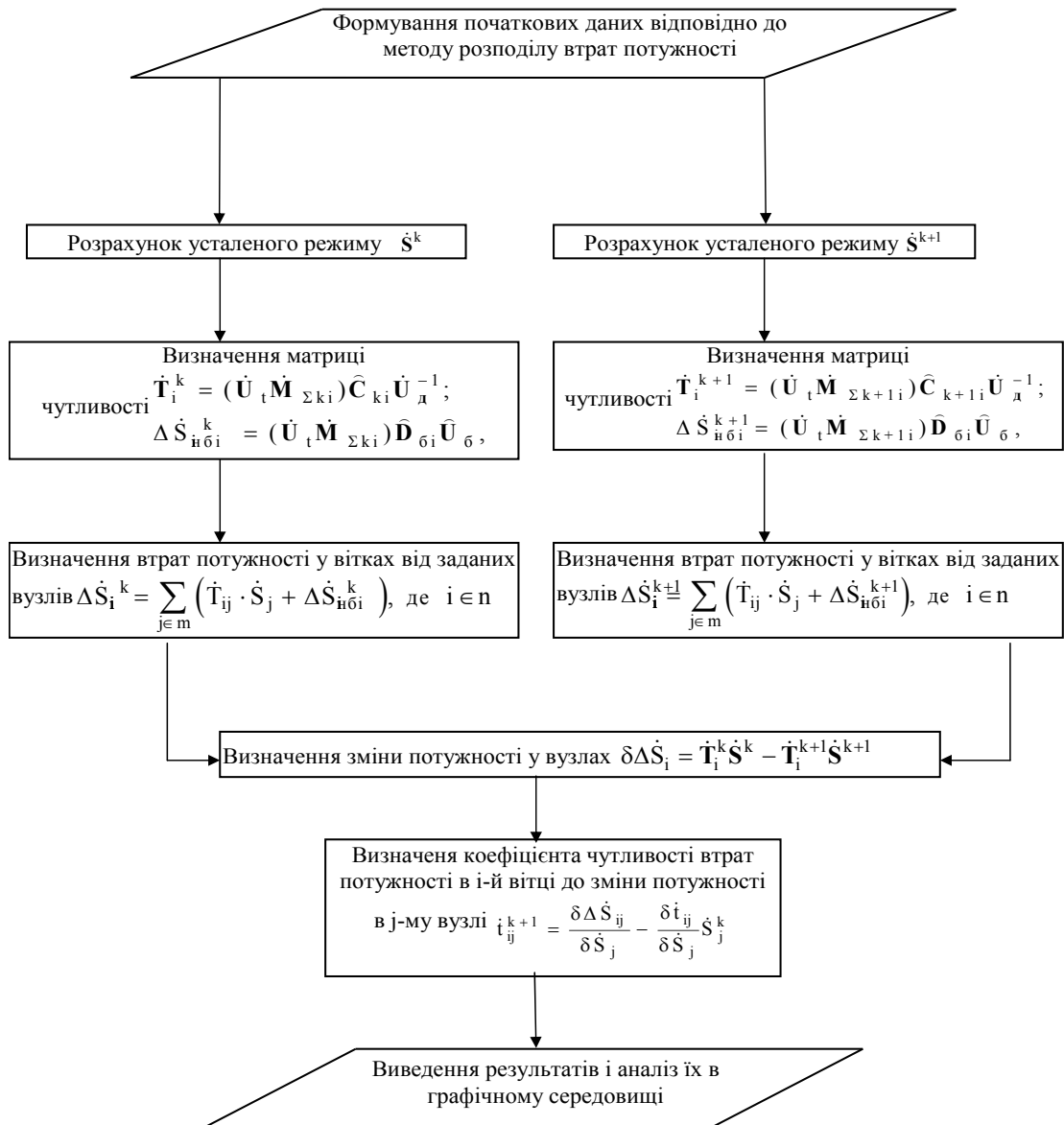


Рис. 2. Алгоритм визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності

### Висновки

1. Для оперативного моніторингу втратами від транзитних перетікань та їх оптимізації можуть використовуватися коефіцієнти чутливості втрат потужності до збурень в системі, зокрема до зміни навантаження або генерування у вузлах. Матриця коефіцієнтів чутливості формується за результатами розрахунку характерного усталеного режиму і за необхідності уточнюється урахуванням зміни напруги у вузлах схеми ЕЕС.

2. Розроблений метод оцінки чутливості параметрів режиму ЕЕС до зміни навантаження у вузлах схеми, дозволяє оцінювати чутливість втрат потужності в окремих її елементах під час зовнішніх та внутрішніх збурень, таких як: зміна навантаження або генерування окремих вузлів схеми. Застосування методу стосовно вузлів примикання з іншими системами дозволяє оцінювати чутливість втрат в окремих елементах ЕЕС до транзитних перетікань.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Таласов А.Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 20 – 25.

2. Стогний Б., Павловский В. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергообеспечивающих компаний // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 26 – 31.
3. Потребич А.А. Определение норматива потерь электроэнергии облэнерго с учётом её транзитных перетоков // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 10. – С. 20 – 23.
4. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Втрати потужності в електроенергетичних системах від транзитних перетікань // Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 3. – С. 26 – 33.
5. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A.L. Guijarro, // Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms // Power Systems, IEEE, - vol. 17, pp. 571 – 576, Aug. 2002.
6. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки. ч. 7. – 2006. – С. 27 – 30.
7. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

**Лежнюк Петро Дем'янович** – завідувач кафедри електричних станцій та систем;

**Бурикін Олександр Борисович** – старший викладач кафедри електричних станцій та систем;

**Лесько Владислав Олександрович** – асистент кафедри електричних станцій та систем.  
Вінницький національний технічний університет.