

## ЗАХОДИ ТА ЗАСОБИ, СПРЯМОВАНІ НА ЗАПОБІГАННЯ ПЕРЕОБТЯЖЕННЮ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

**Аладько В. В., магістрант, Буткевич О. Ф., д.т.н., проф.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем*

**Вступ.** Переобтяження елементів електричних мереж (ЕМ) електроенергетичних систем (ЕЕС) може мати різні негативні наслідки, масштаби яких залежатимуть від призначення таких ЕМ (магістральні чи розподільні), поточних схемно-режимних умов, функціонування засобів протиаварійної автоматики та впливу інших чинників. Зазначені переобтяження можуть призводити до розвитку аварійних процесів та пошкодження обладнання, втрати стійкості ЕЕС та знеструмлення споживачів електроенергії на значних територіях. Відомі приклади виникнення системних аварій, першопричиною яких, а точніше, «спусковим механізмом» яких стало переобтяження елементів ЕМ.

Заходи та засоби, які використовують для запобігання переобтяженню елементів магістральних та розподільних ЕМ, мають відмінності, хоча в обох зазначених випадках як на етапі проектування, так і на етапі експлуатації ЕМ завжди виходять із гранично допустимих значень окремих параметрів режиму, встановлених на етапі проектування ЕМ. Наприклад, під час проектування будь-яких ЕМ одним із чинників, який завжди враховують, є сила струму, що призводить до втрати термічної стійкості дротів повітряних ліній електропередачі (ПЛ), і визначення обмежень щодо допустимого навантаження ПЛ під час їхньої експлуатації завжди відбувається з урахуванням зазначеної сили струму (її беруть до уваги і під час визначення гранично допустимих потоків потужності контрольованими перетинами ЕЕС, виходячи з умов забезпечення нормативних запасів статичної стійкості за різних передбачуваних схемно-режимних умов, що знаходить відповідне відображення в інструкціях диспетчерському персоналу).

Переобтяження елементів ЕМ можуть виникати як під час аварій, так і за нормальних режимів. Внаслідок зростання сумарної потужності розподілених джерел енергії в ЕМ, зокрема ВДЕ, такі ЕМ набувають окремих ознак ЕЕС. Потужність генерування ВДЕ залежить від впливу чинників стохастичної природи, що певною мірою ускладнює процеси керування режимами таких ЕМ. Енергопостачальні компанії зацікавлені в максимальному використанні пропускнув спроможності ЕМ, але поєднання впливу таких чинників, як робота ЕМ з потоками потужності ПЛ, близькими до гранично допустимих, непередбачувані зростання активної потужності окремих споживачів електроенергії та зміна потужності окремих джерел енергії, насамперед ВДЕ, може спричинити переобтяження елементів ЕМ. Наведений нижче матеріал стосується результатів дослідження питань запобігання переобтяженню контрольованих (диспетчерським персоналом) ПЛ за нормальних режимів роботи ЕМ.

**Мета роботи** – проаналізувати заходи та засоби, спрямовані на запобігання переобтяженню контрольованих елементів ЕМ в нормальних режимах роботи ЕЕС, та запропонувати простий в реалізації і придатний для використання в контурі оперативного керування ЕЕС підхід до розв’язання задачі розвантаження контрольованих елементів ЕМ.

**Матеріали та результати досліджень.** Щоб запобігти переобтяженню елементів ЕМ, з одного боку, і, разом з цим, максимально використовувати пропускну здатність ЕМ, застосовують різні засоби впливу на потоки потужності елементами ЕМ, зокрема на потоки потужності ПЛ. Для перерозподілу потоків потужності в ЕМ традиційно використовують фазоповоротні пристрої (ФПП) [1], зокрема фазоповоротні трансформатори, вольтододаткові трансформатори, які в окремих випадках називають *трансформаторами поперечного регулювання* (на підстанціях 750 кВ об’єднаної енергосистеми України такі трансформатори ввімкнено в нейтраль автотрансформаторів 750/330/15.75 кВ, а оскільки вектор електрорушійної сили такого вольтододаткового трансформатора у кожній фазі утворює прямий кут з векторами високої і середньої напруги автотрансформатора, то внаслідок цього його називають *трансформатором поперечного регулювання*). До засобів покращення ефективності функціонування ЕМ належать гнучкі системи передачі змінного струму [2-4], для позначення яких частіше використовують англomовну аббревіатуру FACTS (від Flexible Alternative Current Transmission Systems), здатні впливати на повний опір, кут фазового зсуву між векторами напруги по кінцях ПЛ та значення інших взаємопов’язаних параметрів, що дає змогу використовувати FACTS з різною метою, зокрема для підвищення пропускну здатності ЕМ [5]. Далеко не всі ЕМ мають «на озброєнні» ФПП та/чи FACTS, щоб цілеспрямовано впливати на потоки потужності ПЛ, проте запобігти переобтяженню елементів ЕМ можливо за певних умов і без зазначених засобів, змінивши з цією метою навантаження певних джерел генерування (зберігаючи незмінним сумарне навантаження), що роблять свій «внесок» до потоків потужності переобтяженими ПЛ. Розглянемо детальніше ці питання.

Для визначення впливів джерел генерування чи вузлів споживання електроенергії на потоки потужності окремими ПЛ можна використати різні підходи. Наприклад, відомі різні методи та алгоритми до трасування маршрутів *адресного* постачання електроенергії споживачам від джерел генерування з метою визначення впливу такого постачання на втрати потужності та їх урахування для правильного ціноутворення та обґрунтування прозорих тарифів на електроенергію [6-12]. Про важливість вирішення таких питань за ринкових умов свідчить, наприклад, і той факт, що в курсі економіки електроенергетичних систем, який вивчають студенти в Національному Технічному Університеті в Афінах (NTUA), питанням ціноутворення на передачу електроенергії приділяють значну увагу: в програмному забезпеченні, спеціально розробленому для використання під час навчання ціноутворенню в контексті курсу економіки енергосистем (*програмне забезпечення тарифікації передачі* – TPS), реалізовано 8 методів аналізу-обґрунтування ціноутворення та три методології визначення розподілу витрат на передачу електроенергії [13].

Однак дана робота не стосується питань зазначеного ціноутворення (хоча окремі методи, розглянуті в [6-13], пов'язані з аналізом впливів поточкорозподілу в ЕМ на ціноутворення) і в кінцевому підсумку зводиться до розв'язання задачі оперативного розвантаження переобтяжених контрольованих елементів ЕМ. Розглянемо запропонований в даній роботі підхід до її розв'язання.

Сама постановка задачі запобігання переобтяженню елементів ЕМ стосується нормальних режимів і свідчить про орієнтацію на використання результатів її розв'язання в контурі оперативного керування ЕЕС чи ЕМ. Орієнтуючись на усталені режими, можна виходити з припущення, що у разі своєчасного «дозованого» реагування на загрозу переобтяження деяких (контрольованих) елементів ЕМ (контрольованих ПЛ), значення параметрів режиму ЕМ не зазнаватимуть істотних змін (відхилень від значень, що мали місце до реалізації «дозованих», невеликих за інтенсивністю керуючих впливів). Отже, можна обмежитися лінеаризованою моделлю ЕЕС в припущенні, що можливі відхилення параметрів режиму не перевищуватимуть 20% від відповідних значень за усталеного режиму у точці лінеаризації нелінійної моделі ЕЕС.

Одержати аналітичні вирази залежностей потоків потужності контрольованими ПЛ від потужності джерел генерування проблематично, тому у дослідженнях було використано наявні програмні засоби розрахунку усталених режимів ЕЕС та чисельне диференціювання – подібно тому, як це було запропоновано в [14] під час розв'язання задачі визначення розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України. Таке використання дає змогу визначити коефіцієнти чутливості потоків активних потужностей *контрольованими* ПЛ до зміни активної потужності джерел генерування за різних (передбачуваних) схемно-режимних умов, які стосуються, насамперед, умов, передбачених оперативними інструкціями диспетчерському персоналу ЕЕС (ЕМ).

Розглянемо загальний алгоритм формування таблиць коефіцієнтів чутливості потоків активних потужностей *контрольованими* ПЛ до зміни активної потужності джерел генерування.

#### Алгоритм формування таблиць коефіцієнтів чутливості

1. Розрахувати множину передбачуваних усталених режимів – за повної схеми електричних з'єднань та за передбачуваних схемно-режимних змін.

2. Для кожного із розрахованих в п.1 режимів визначити множину *контрольованих* ПЛ, що гіпотетично можуть бути переобтяженими (зазвичай такі ПЛ утворюють *контрольовані перетини* ЕМ і є спостережуваними з використанням засобів моніторингу, враховуючи значущість таких ПЛ в аспекті оперативного ведення режимів диспетчерським персоналом).

3. Організувати цикл  $(l = \overline{1, r})$  по розрахованим режимам (передбачуваним схемно-режимним умовам).

4. Сформуванати масив значень потоків активної потужності кожною (*i*-ою) *контрольованою* ПЛ ( $P_{плi}$ ) за поточного (чергового) розрахованого режиму.

5. Організувати цикл по джерелам генерування ( $j = \overline{1, m}$ ), активну потужність яких може бути оперативно змінено для бажаного впливу на потоки потужності контрольованими елементами ЕМ.

6. Для поточного (чергового) ( $j$ -го) джерела генерування змінити на 15-20% активну потужність генерування ( $\Delta P_{Гj}$ ) і на таке ж значення змінити сумарну активну потужність електроспоживання, розподіливши його пропорційно значенням активної потужності електроспоживання у вузлах ЕМ, та розрахувати за таких змін усталений режим ЕЕС.

7. Організувати цикл ( $i = \overline{1, k}$ ) по контрольованим ПЛ зміненого режиму (у циклі  $j = \overline{1, m}$  зміни потужності  $j$ -го джерела генерування) та визначити прирости (алгебрично, з урахуванням знаків) потоків активної потужності контрольованими ПЛ ( $\Delta P_{ПЛi}$ ,  $i = \overline{1, k}$ ) у зміненому режимі у порівнянні з поточним режимом, за якого потужності джерел генерування змін не зазнавали, і обчислити коефіцієнти чутливості потоків активної потужності контрольованими ПЛ до зміни активної потужності поточного ( $j$ -го) джерела генерування  $k_{ij} = \Delta P_{ПЛi} / \Delta P_{Гj}$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Розраховані коефіцієнти чутливості занести до таблиці (для кожного поточного  $l$ -го режиму у циклі  $l = \overline{1, r}$  формується своя таблиця зазначених коефіцієнти чутливості).

8. **Якщо** цикл по джерелам генерування ( $j = \overline{1, m}$ ), активну потужність яких може бути оперативно змінено для бажаного впливу на потоки потужності контрольованими елементами ЕМ, **не завершено** ( $j \neq m$ ), **то перейти до чергового джерела генерування** (і розглядати його як поточне джерело генерування) – перейти до п. 6, **інакше** перейти до п. 9.

9. **Якщо** цикл ( $l = \overline{1, r}$ ) по режимам (передбачуваних схемно-режимних умовах) **не завершено** ( $l \neq r$ ), **то перейти до чергового режиму** (і розглядати його як поточний режим) – перейти до п. 4, **інакше** перейти до п. 10.

10. Завершити роботу алгоритму, оскільки таблиці коефіцієнтів чутливості потоків активних потужностей контрольованими ПЛ до зміни активної потужності джерел генерування для кожного із розрахованих режимів (передбачуваних схемно-режимних умов) сформовано.

Таблиця, що формується для кожного із розрахованих режимів (передбачуваних схемно-режимних умов), у загальному випадку має вигляд:

Контрольовані ПЛ	Джерела генерування						
	$ДГ_1$	$ДГ_2$	$ДГ_3$	...	$ДГ_j$	...	$ДГ_m$
$ПЛ_1$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$	...	$k_{1j}$	...	$k_{1m}$
$ПЛ_2$	$k_{21}$	$k_{22}$	$k_{23}$	...	$k_{2j}$	...	$k_{2m}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$ПЛ_i$	$k_{i1}$	$k_{i2}$	$k_{i3}$	...	$k_{ij}$	...	$k_{im}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$ПЛ_k$	$k_{k1}$	$k_{k2}$	$k_{k3}$	...	$k_{kj}$	...	$k_{km}$

Значення зазначених в таблиці коефіцієнтів можуть бути додатними, від’ємними, чи практично нульовими. Нехай, наприклад, в рядку таблиці для контрольованої ПЛ, позначеної як  $ПЛ_i$ , значення коефіцієнтів  $k_{i2}$  та  $k_{i3}$  додатні, а значення коефіцієнту  $k_{im}$  від’ємне. З урахуванням цього, для зменшення потоку активної потужності  $ПЛ_i$  на деяке значення  $\Delta P_{ПЛ_i}$  можна перерозподілити навантаження джерел генерування по-різному, враховуючи наявний «регульовальний діапазон» зміни активної потужності кожного джерела генерування. Наприклад, якщо для зменшення потоку активної потужності  $ПЛ_i$  використати три зазначені вище джерела генерування, то зміни потоку активної потужності зазначеною ПЛ можна досягти збільшенням активної потужності генерування  $ДГ_m$  та відповідним зменшенням (сумарно) активної потужності генерування  $ДГ_2$  та  $ДГ_3$ . Наближене значення, на яке зміниться у такому випадку потік активної потужності  $ПЛ_i$ , можна визначити за виразом

$$\Delta P_{ПЛ_i} = k_{im} \Delta P_{ДГ_m} - k_{i2} \Delta P_{ДГ_2} - k_{i3} \Delta P_{ДГ_3} \quad (1)$$

На рис. 1 показано схему ЕЕС (24-bus power system IEEE), яку було використано під час досліджень.

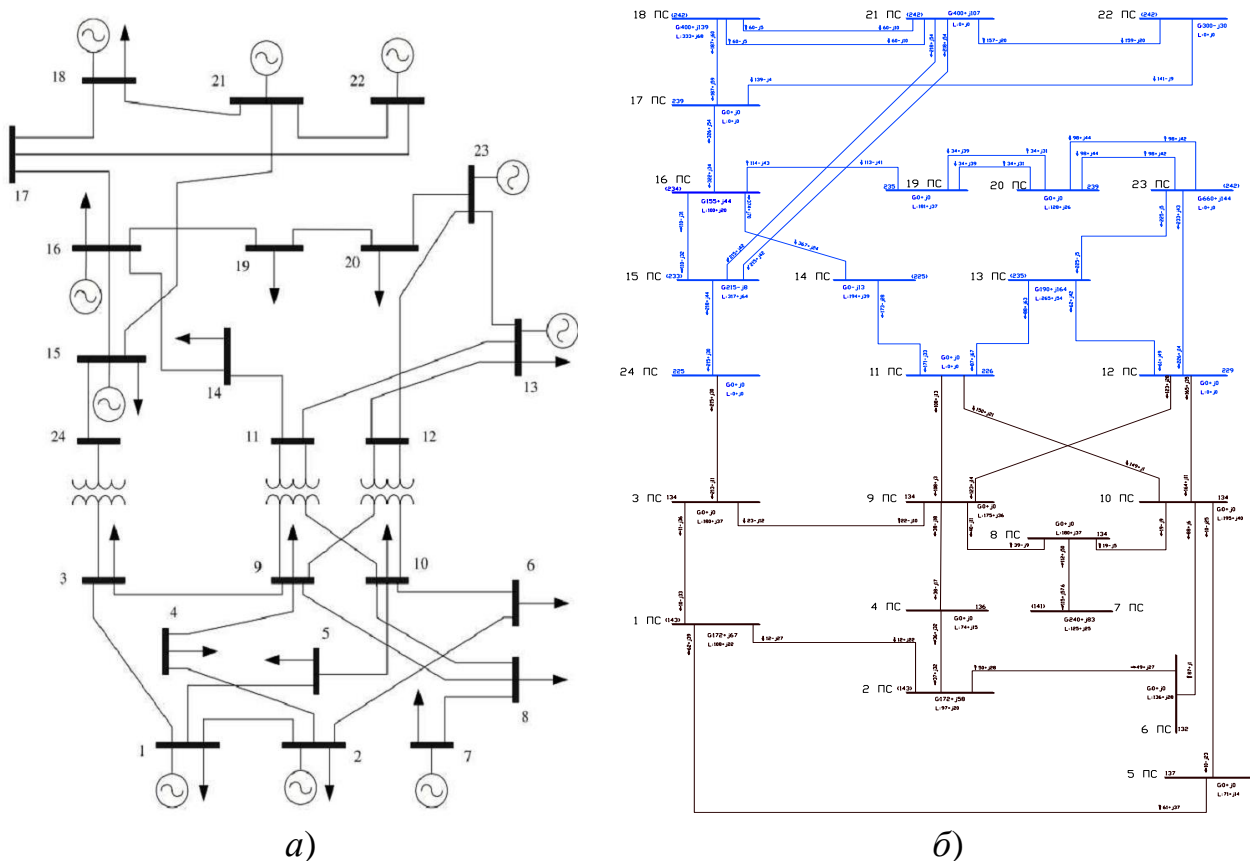


Рисунок 1 – а) 24-вузлова схема ЕЕС; б) результати розрахунку одного із передбачуваних режимів ЕЕС

**Висновки.** Запропоновано простий в реалізації і придатний для використання в контурі оперативного керування підхід до запобігання переобтяженню в усталених режимах роботи ЕЕС контрольованих елементів ЕМ, що для передбачуваних схемно-режимних умов ЕЕС потребує

попереднього розрахунку коефіцієнтів чутливості потоків активної потужності контрольованими елементами ЕМ до зміни активної потужності джерел генерування. Для розрахунку зазначених коефіцієнтів чутливості запропоновано використовувати програмні засоби моделювання усталених режимів ЕЕС та чисельне диференціювання.

Працездатність запропонованого підходу перевірено і підтверджено результатами комп'ютерного моделювання з використання 24-вузлової схеми ЕЕС (24-bus power system IEEE).

#### Перелік посилань

1. Стельмаков В.Н., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А., Панфилов Д.И. Фазоповоротное устройство. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://poleznayamodel.ru/model/10/107421.html/> (дата звернення: 01.11.2022).
2. Sambasivarao N., Amarnath J., Purnachandrarao V. Congestion management using FACTS devices in deregulated power system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. Issue 11. Pp. 90-95.
3. Dhoble P., Bhandakkar A. Review of Active Reactive Power Flow Control Using Static Synchronous Series Compensator (SSSC). *International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE)*. 2013. Vol. 1. Issue. 3. Pp. 74-82.
4. Dubey R.K., Suman S. K. Control of Power Ststem Stability through FACTS. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*. 2015. Vol. 1. Issue 8. Pp. 352-359.
5. Буткевич О.Ф., Костира А. Використання FACTS для підвищення пропускної здатності електричних мереж. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Зб. наук. праць. 2016. Вип. 44. С. 5-12.
6. Bialek J. Tracing the flow of electricity, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* Vol. 143, no. 4. Jul 1996. Pp. 313-320.
7. Kirschen D., Allan R., and Strbac G. Contribution of individual generators to loads and flows. *IEEE Trans. Power Systems* 12 (1997), 52–60.
8. Mustafa M. W. and Shareef H. A Comparison of Electric Power Tracing Methods Used in Deregulated Power Systems. *Proc. of the IEEE International Power and Energy Conference, Putra Jaya, Malaysia, November 28-29, 2006*. Pp. 156-160.
9. Barcia, P.; Pestana, R. Tracing the flows of electricity. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2010. Vol. 32. Pp. 329-332.
10. Pan J., Teklu Y., Rahman S., and Jun K. Review of usage-based transmission cost allocation methods under open access. *IEEE Trans. Power Systems* 15 (2000), 1218–1224.
11. K. Venkata Narayan, J. Krishna Kishore, “Tracing Of Power Using Bialek’s Tracing Method In A Deregulated Power System”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. Vol. 2 Issue 7, July – 2013. Pp. 173-1740.
12. Baczynska A. and Niewiadomski W. Power Flow Tracing for Active Congestion Management in Modern Power Systems. *Energies*, 2020, Vol. 13(18), 4860. 25 p.
13. Tziasiou G.N., Orfanos G.A., Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. Transmission Pricing Software for Powr Engineering Education. June 2011. Pp. 410-428. Электронний ресурс. Режим доступу: [https://www.academia.edu/31107983/Transmission\\_Pricing\\_Software\\_for\\_Power\\_Engineeing\\_Education](https://www.academia.edu/31107983/Transmission_Pricing_Software_for_Power_Engineeing_Education) (дата звернення: 01.11.2022).
14. Буткевич О.Ф., Юнєєва Н.Т., Гурєєва Т.М., Стецюк П.І. Задача розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності контрольованими перетинами. *Техн. електродинаміка*. 2020. № 4. С. 46-50.