

УДК 621.311.072

**Ю. О. Карпов, д. т. н., проф.; П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.;  
Н. В. Остра, асп.**

## **ЗМЕНШЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЕС З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ЧУТЛИВОСТІ**

### **Вступ**

На сьогодні проблема оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) залишається важливим і актуальним завданням в сфері наукових досліджень проблем енергетики, від ефективного вирішення якого залежить підвищення економічності і надійності роботи ЕЕС в цілому. Першопричиною неоптимальності нормальних режимів ЕЕС, що визначає їх економічність, є неоднорідність системи, яка спричиняє додаткові втрати електроенергії в процесі її транспортування та розподілу. Крім того, неоднорідність ЕЕС призводить також до ряду інших негативних явищ, а саме: зниження якості електроенергії, додаткове перевантаження окремих ЛЕП, а також зниження рівня статичної та динамічної стійкості ЕЕС, що в свою чергу зменшує пропускну здатність систем в цілому [1, 2].

Компенсація неоднорідності системи не в однаковій мірі проявляється на оптимальних значеннях параметрів режиму окремих віток і вузлів схеми ЕЕС. Це значить, що оптимізація станів системи не повинна закінчуватися одержанням розв'язку задачі. Важлива частина оптимізаційного дослідження полягає в обґрунтуванні правильності розв'язку й аналізі його чутливості. З погляду ефективності процесу переходу системи від її поточного стану до оптимального важливим є не сам отриманий розв'язок, а інформація про стан системи в околі розв'язку. Це дозволяє краще зрозуміти її основні властивості і використовувати їх для побудови адаптивної системи автоматичного керування (САК) [3]. Тому дана стаття присвячена компенсації негативного впливу неоднорідності ЕЕС з урахуванням параметричної чутливості. Ставиться задача виявлення в ЕЕС найчутливіших місць, в яких зміна параметрів дала б змогу максимально зменшити неоднорідність системи і таким чином наблизити її до однорідного стану.

### **Аналіз стану проблеми і постановка задачі**

В процесі функціонування ЕЕС піддається малим та великим впливам, таким як зміна навантажень, комутація елементів схеми, зміна генерацій активної та реактивної потужностей, впливи автоматики (це все приклади нормальних відносно малих збурень), а також короткі замикання, великі спади та зростання навантажень, несанкціоновані відключення обладнання, робота захисту та протиаварійної автоматики (це приклади великих збурень). ЕЕС реагує на зовнішні впливи зміною параметрів режиму — модулів і фаз напруг, перетоків потужностей і струмів в її елементах, швидкостей обертання синхронних та асинхронних машин.

Чутливість розв'язку до зміни значень параметрів системи вказує на те, які оцінки параметрів варто поліпшити для того, щоб знайти оптимальний розв'язок із заданою точністю. В результаті аналізу чутливості, по-перше, відшукуються параметри, які найбільше впливають на оптимальний розв'язок. Якщо параметри існують, то можливо доцільно досліджувати питання про корекцію відповідних властивостей системи. По-друге, визначається вплив на оптимальні стани системи варіацій неточно заданих параметрів. Аналіз чутливості дозволяє реально сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення задачі оптимізації, а також виділити ті параметри, похибка визначення яких не суттєво впливає на результати оптимізації і тому уточнювати їх значення немає необхідності. По-третє, з'ясовуються можливі реакції системи на некеровані зовнішні впливи. Може ви-

явитися, що вихідна математична модель потребує суттєвої корекції, оскільки практична реалізація оптимальних розв'язків не дає очікуваного результату.

Ця проблема досліджувалась різними методами [4, 5], зокрема за допомогою критеріального аналізу [3]. Цей метод дозволяє оцінити вплив реальних збурень на реакцію параметрів режиму ЕЕС, тобто оцінити чутливість ЕЕС. В результаті такого аналізу знаходяться найбільш чутливі до збурень елементи ЕЕС — «сенсори» [5], виявляються причини, які призводять до появи сенсорів — слабких віток, перерізів, вузлів, і визначаються способи підсилення нерівностійкої мережі.

Математичною базою методу, викладеного в [5], став сингулярний (для симетричних матриць-спектральний) аналіз матриці Якобі або матриці вузлових провідностей. Поєднання сингулярного аналізу з критеріальним дає можливість виявити неоднорідності електричної мережі як для нормальних, так і для перехідних процесів, де властивості матриці Якобі (матриці провідності) також є визначальними [2]. Саме тут наявність різних властивостей чутливості і слабкості в різних місцях ЕЕС, по суті, і є проявом неоднорідності схеми ЕЕС.

Неоднорідність ЕЕС, яка породжує появу сенсорів, визначається здебільшого схемою ЕЕС і її параметрами, при цьому в принципі можна виділити такі елементи ЕЕС, зміна параметрів яких в найбільшій мірі впливає на величину прояву ЕЕС на збурення. Саме за допомогою цих параметрів можливо якнайшвидше покращити (або погіршити) властивості ЕЕС. Такі елементи називаються слабкими місцями. В загальному випадку для ЕЕС залежність прояву (реакції)  $\Delta X$  (зміни параметрів режиму) від збурень  $\Delta D$  (частково, від змін навантаження споживачів) — нелінійна. Раніше майже завжди для дослідження чутливості використовувалась процедура лінеаризації. Вона, звичайно, дієва лише в тому випадку, коли або збурення не настільки великі, щоб нелінійність була помітно відчутна, або ж самі збурення діляться на  $p$  досить малих часток:

$$\Delta D = \sum_{k=1}^p \Delta D_k,$$

де кожна  $k$ -та частка допускає використання лінеаризованих моделей.

При цьому чутливість моделі ЕЕС визначається як

$$\Delta X = \sum_{k=1}^p \Delta X_k = \sum_{k=1}^p A_k \Delta D_k.$$

Досліджуючи неоднорідність в нашому випадку, ми розглядаємо її як конструктивний параметр електричних мереж, а саме — відношення відповідно параметрів активної та реактивної складових опорів елементів ЕЕС ( $x_i/r_i$ ). Далі розглянемо, яким чином зміна параметрів, як наслідок негативних збурень, буде впливати на оптимальність нормальних режимів ЕЕС.

### Математична модель ЕЕС з урахуванням неоднорідності

Оскільки управління нормальними режимами ЕЕС потребує сумісного розв'язку задач короткострокового планування, оперативного та автоматичного керування, тому для проведення подібних розрахунків доцільно користуватись математичною моделлю на основі методу вузлових напруг [6]

$$\sqrt{3} \dot{U}_d \hat{J} = \dot{S}; \quad (1)$$

$$\dot{Y}(\dot{U} - U_0) = \sqrt{3} \dot{J}, \quad (2)$$

де  $\dot{S}$  — вектор потужностей джерел або споживачів, приєднаних до вузлів ЕЕС;  $\dot{U}_d$  — діагональна матриця напруг у вузлах;  $\dot{J}$  — струмів у вузлах;  $\dot{U}$  — вектор напруг у вузлах;  $U_0$  — вектор, кожен елемент якого дорівнює напрузі в вузлі, що балансує;  $\dot{Y}$  — матриця вузлових провідностей ЕЕС.

Матриця  $\dot{Y}$  визначається параметрами пасивних елементів системи, які в свою чергу характеризують неоднорідність ЕЕС. Вона входить складовою частиною в матрицю чутливості Якобі [6]. Тому логічно постає зв'язок між неоднорідністю параметрів ЕЕС і чутливістю розв'язку до зміни значень параметрів системи.

Оскільки саме неоднорідність параметрів ЕЕС викликає протікання незбалансованих струмів в контурах, що в свою чергу спричиняє додаткові витрати потужності, тому з метою наближення ЕЕС до стану самооптимізації за активною потужністю необхідно знизити міру неоднорідності ЕЕС за рахунок параметричної чутливості елементів ЕЕС, які найбільш чутливі до збурень (слабкі місця). Тобто необхідно змінити параметри ЕЕС таким чином, щоб максимально наблизити систему до однорідного стану.

В моделі однорідної електроенергетичної системи існує можливість заміни комплексної матриці  $\dot{Y}$  на відповідну матрицю за г-схемою  $Y_r$ , яка у більшості випадків є краще зумовленою [3]. Це сприяє поліпшенню зумовленості моделі в цілому. Аналогічний підхід, певною мірою, може бути застосований до неоднорідних ЕЕС з невисоким рівнем неоднорідності, спираючись на такі припущення:

- вітки схеми ЕЕС, приєднані до окремого вузла, відносяться до одного рівня напруги;
- мережі одного рівня напруги можна вважати достатньо однорідними.

Враховуючи зазначені припущення та форму вхідної моделі ЕЕС (1), (2), матрицю  $\dot{Y}$  з певною мірою похибки, що зростає із збільшенням рівня неоднорідності системи, можна розглядати як добуток двох матриць

$$\dot{Y} = v_d \cdot Y_r, \quad (3)$$

де  $v_d$  – діагональна матриця коефіцієнтів неоднорідності, приведених до вузлів схеми ЕЕС.

Такий поділ можливий, виходячи із структури матриці  $\dot{Y}$ ,  $i$ -й рядок якої відповідає множині віток схеми  $V_i$ , приєднаних до  $i$ -го вузла. Приймавши, у відповідності з припущеннями, що  $x_k/r_k \approx \text{idem}$  для всіх  $k \in V_i$ ,  $i$ -й рядок матриці  $\dot{Y}$  можна подати у вигляді

$$\dot{Y}^{(i)} = v_i Y_r^{(i)}; \quad v_i \approx v_{ek} = \frac{1}{1 + jx_k/r_k}; \quad k \in V_i,$$

де  $v_{ek}$  – коефіцієнт неоднорідності  $k$ -ї вітки схеми.

Значення  $v_i$ , розраховані для кожного рядка матриці  $\dot{Y}$ , утворюють діагональну матрицю  $v_d$ . Для зменшення похибки подібного представлення матриці  $\dot{Y}$  використовуються середньозважені значення  $v_i$

$$v_i = \frac{\sum_{k \in V_i} v_k \cdot \dot{Y}_{i,k}}{\sum_{k \in V_i} Y_{r_i,k}} = \frac{\dot{Y}_{i,i}}{Y_{r_i,k}}.$$

Використовуючи (3) математична модель ЕЕС (2) може бути подана у вигляді

$$Y_r(\dot{U} - U_0) = v_d^{-1} \hat{U}_d^{-1} \hat{S}. \quad (4)$$

Після перетворення (4) у дійсну площину з урахуванням наявності балансувального вузла отримуємо аналітичну модель ЕЕС, що залежить від неоднорідності у явному вигляді

$$F(U', U'') = \begin{vmatrix} 0 & G_r \\ G_r & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U'' \\ U' \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} J'' \\ J' \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} G_{r0} U_0 \\ 0 \end{vmatrix} = 0; \quad (5)$$

$$J' + jJ'' = v_d^{-1} \widehat{U}_d^{-1} \widehat{S}, \quad (6)$$

де  $U'$ ,  $U''$  — дійсна і уявна частини вектора вузлових напруг;  $G_r$  — матриця вузлових провідностей  $r$ -схеми заміщення ЕЕС.

Враховуючи (5), (6), модель для розрахунку усталених режимів ЕЕС методом Ньютона [6] на  $k$ -му кроці ітераційного процесу матиме такий вигляд:

$$\frac{\partial F}{\partial U} \left( U^{(k-1)} \right) \Delta U^{(k)} = -F \left( U^{(k-1)} \right), \quad (7)$$

де  $\Delta U^{(k)} = \begin{pmatrix} \Delta U''^{(k)} \\ \Delta U'^{(k)} \end{pmatrix}$  — вектор поправок вузлових напруг.

В (7) матриця чутливості (матриця похідних) визначається як [7]

$$W = \frac{\partial F}{\partial U} = \begin{pmatrix} 0 & G_r \\ G_r & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -D_v & A_v \\ -A_v & -D_v \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де  $A_v$  і  $D_v$  — діагональні матриці, що визначаються параметрами режиму системи та її неоднорідністю і складаються з елементів, відповідно,  $A_{vi}$  і  $D_{vi}$ :

$$A_{vi} = \frac{(U_i'^2 - U_i''^2)(v_i' P_i - v_i'' Q_i) + 2U_i' U_i'' (v_i' Q_i + v_i'' P_i)}{U_i^4}; \quad (9)$$

$$D_{vi} = \frac{(U_i'^2 - U_i''^2)(v_i'' P_i + v_i' Q_i) - 2U_i' U_i'' (v_i' Q_i - v_i'' P_i)}{U_i^4}.$$

Як бачимо, матриця чутливості (Якобі)  $\frac{\partial F}{\partial U} = Y + V(P, Q, U)$

складається з двох частин. Перша — матриця вузлових провідностей, постійна. Вона не залежить від параметрів режиму ЕЕС і визначається тільки структурою та активними параметрами пасивної частини схеми. Друга — змінна. Її власні значення залежать від параметрів режиму системи та її неоднорідності, тобто змінюються в процесі розрахунку.

### Чутливість математичної моделі ЕЕС до зміни її неоднорідності

Як відомо [6], обумовленість матриці Якобі залежить від ступеня однорідності абсолютних значень елементів матриці. Аналізуючи змінну складову матриці (9) бачимо, що неоднорідність є одною з причин ненормованості її елементів. Збільшення міри відхилення стану системи від однорідного викликає відхилення  $v_i'$  від одиничного, а  $v_i''$  — від коефіцієнта неоднорідності системи ( $x_j/r_j \neq \text{idem}$ ). Таким чином виникає додатковий фактор розсіювання значень елементів матриці Якобі, що в свою чергу призводить до підвищення дисперсії власних значень матриці і погіршення обумовленості системи. Все вище сказане дозволяє стверджувати, що показник неоднорідності характеризує коефіцієнт чутливості, який визначається як

$$k_{yx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (10)$$

Покажемо залежність неоднорідності і параметричної чутливості слабких місць на прикладі схеми ЕЕС 110–220 кВ (рис.), яка містить вісім вузлів, десять віток та чотири трансформатори зв'язку. Для цієї схеми з заданими параметрами віток виконаємо розрахунок узагальненої матриці системних показників неоднорідності. Вузол 15 є балансувальним, напруга балансувального вузла прийнята за базисну.

Матриця системних показників неоднорідності  $\gamma$  визначається за формулою [3]

$$\gamma = M_t x r^{-1} - x_B r_B^{-1} M_t, \tag{11}$$

де  $M$  – перша матриця з’єднань схеми ЕЕС;  $r, x$  – активна та реактивна складові матриці вузлових опорів для z-схеми заміщення ЕЕС;  $r_B, x_B$  – відповідно, діагональні матриці активних та реактивних опорів віток, приведених до базисної напруги.

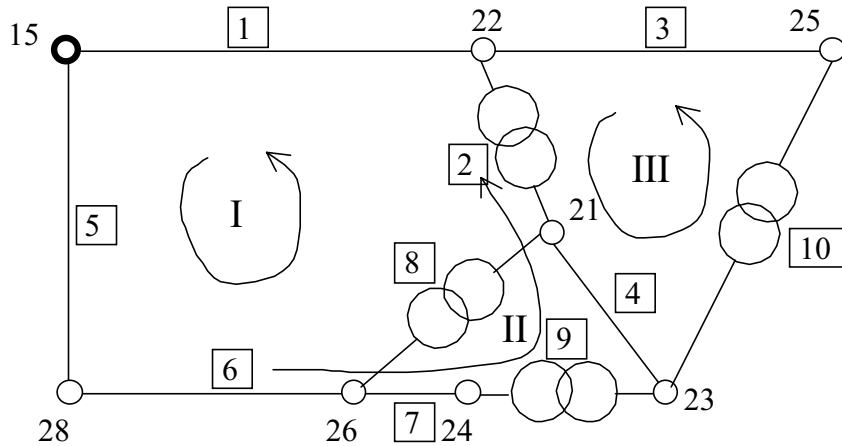


Схема ЕЕС 110–220 кВ

Розрахована за формулою (11) матриця системних показників неоднорідності має вигляд:

	21	22	23	24	25	26	28	
$\gamma =$	0,055	-0,34	0,121	0,338	-0,468	0,49	-0,064	1
	3,231	-5,651	-3,064	0,32	2,237	3,756	-0,272	2
	-0,652	0,684	0,944	0,559	-1,401	0,04	-0,057	3
	<b>8,118</b>	-3,212	<b>-6,745</b>	2,63	2,842	-3,544	-0,029	4
	-0,126	0,773	-0,275	-0,768	1,063	-1,113	0,146	5
	-0,07	0,43	-0,153	-0,428	0,592	-0,62	0,081	6
	-0,918	-0,062	0,361	-1,068	0,851	0,645	0,063	7
	3,483	2,995	-2,514	1,855	0,113	-0,687	0,248	8
	-2,269	-0,154	0,891	-2,639	2,104	1,594	0,155	9
	2,787	-2,923	-4,036	-2,391	5,99	-0,172	0,244	10

Як видно з матриці  $\gamma$ , найбільший вплив на міру неоднорідності ЕЕС має вітка 4, яка з’єднує вузли 21–23. Оскільки у вузлах 21 і 23 найбільші показники неоднорідності, відповідно 8,118 і -6,745, то і неоднорідність в них буде найвища. Тобто, вузли 21 і 23, які найчутливіші до зовнішніх впливів є слабкими (сенсорними) місцями даної схеми. Таким чином, саме оптимізація параметрів вітки 4 матиме найбільший ефект стосовно зменшення втрат потужності.

## Висновок

Неоднорідність ЕЕС, або, що те саме, неоптимальність режимів, залежить від всіх її параметрів. Оскільки для зменшення дії неоднорідності на економічність режимів ЕЕС вплинути на всі параметри з різних причин неможливо, то доцільно сформуванню множини таких параметрів системи, до яких критерій оптимальності найчутливіший і які необхідно змінювати в першу чергу. Для цього можна використати вузлову модель ЕЕС і матрицю системних показників неоднорідності, яка є її похідною. Можна стверджувати, що існує зв'язок між неоднорідністю і параметричною чутливістю, який характеризує міру наближення ЕЕС до однорідного стану.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. И., Баженов В. А. Оптимизация режимов электрических сетей. — К.: Наукова думка, 1992. — 216 с.
2. Чебан В. М., Ландман А. К., Фишов А. Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях. — М.: Высшая школа, 1990. — 144 с.
3. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальное керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с.
4. Розенвасер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. — М.: Наука, 1981. — 464 с.
5. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З. и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 250 с.
6. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
7. Карпов Ю. О., Кулик В. В., Бурикін О. Б. Вплив неоднорідності електроенергетичної системи на процес розрахунку її усталених режимів // Вісник ВПІ. — 2003. — № 1. — С. 42—47.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 07.12.04  
Рекомендована до опублікування 10.12.04

**Карпов Юхим Овдійович** — професор кафедри теоретичної електротехніки та промислової електроніки;

**Лежнюк Петро Дем'янович** — завідувач кафедри, **Остра Наталія Вікторівна** — аспірант.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет