

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОПТИМАЛЬНІСТЬ ЇЇ РЕЖИМІВ**

**Д.т.н., проф. Лежнюк П.Д., асп. Кулик В.В.**  
(Вінницький державний технічний університет)

**В статті розглянуто шляхи, засоби і способи поступового наближення неоднорідної електроенергетичної системи до однорідного стану. Запропоновано метод оцінки ефективності окремих заходів в процесі оптимізації режимів електричних мереж.**

**The article deals with the ways, means and techniques of gradual approaching of non-uniform electrical power system to uniform state. The method of valuation of efficiency of some techniques in the process of optimization of electrical networks modes is proposed.**

Першопричиною неоптимальності режимів електроенергетичної системи (ЕЕС) і, відповідно, додаткових втрат електроенергії при її транспортуванні та розподілі є неоднорідність ЕЕС. Неоднорідність ЕЕС призводить також до ряду інших негативних явищ в ній: зниження якості електроенергії, перевантаження окремих ЛЕП, а також зниження рівня статичної та динамічної стійкості ЕЕС, що в свою чергу зменшує пропускну здатність системи в цілому [1, 2]. Неоднорідність є конструктивним параметром ЕЕС, тому негативно впливає на її режими постійно, на протязі всього часу функціонування системи.

Зниження міри неоднорідності ЕЕС досягається встановленням в ній конденсаторів, реакторів або зміною конструкції ЛЕП. Даний шлях вирішення проблеми неоднорідності потребує значних капітальних витрат і може бути застосований лише тоді, коли міра неоднорідності обумовлена невеликою кількістю елементів ЕЕС, або якщо з тих чи інших причин необхідна реконструкція існуючих мереж.

Саме зараз склалася така ситуація, коли постала проблема глобальної реконструкції ЕЕС України. За оцінками Національної Енергетичної Програми обладнання енергетичної галузі країни має високий рівень зношеності або знаходяться в стані, непридатному для подальшої експлуатації. У відповідності з цим передбачається проведення широкомасштабних заходів з реконструкції та технічного переозброєння мереж. У відповідності з цим особливу актуальність мають два взаємопов'язаних напрямки досліджень:

- розробка принципів раціональної побудови схем електричних мереж та їх реконструкції з орієнтацією на усунення причин неоптимальності ЕЕС, тобто створення умов для самооптимізації їх режимів, як це відбувається в однорідних системах;

- розробка та вдосконалення засобів, що підвищують ефективність використання капітальних вкладень при проведенні реконструкції, направленої на досягнення загальносистемного ефекту.

Для досягнення бажаного ефекту в даному напрямку необхідно переглянути стратегію проектування та реконструкції електричних мереж таким чином, щоб кожен крок з реконструкції був спрямований на досягнення загальносистемного ефекту, тобто наближення ЕЕС до однорідного стану. У відповідності з цим постає задача

визначення загальносистемного показника неоднорідності, який би визначався конструктивними параметрами системи і однозначно характеризував рівень її оптимальності (наближення до однорідності).

### Системний показник неоднорідності ЕЕС

У неоднорідній ЕЕС струморозподіл в усталеному режимі може бути поданий у вигляді суми двох векторів струмів [3]:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_e + \mathbf{I}', \quad (1)$$

де  $\mathbf{I}_e$  – вектор економічних струмів у вітках, знайдений у результаті розрахунку режиму ЕЕС за її заступною  $r$ -схемою;  $\mathbf{I}' = \mathbf{N}\mathbf{I}_{зр}$  – вектор додаткових струмів у вітках, накладення яких на  $\mathbf{I}_e$  призводить до виконання другого закону Кірхгофа;  $\mathbf{N}$  – друга матриця з'єднань;  $\mathbf{I}_{зр}$  – вектор контурних зрівнювальних струмів.

Значення струму  $\mathbf{I}_e$  відповідає струморозподілу і втратам активної потужності в однорідній ЕЕС. Задача оптимізації втрат потужності в ЕЕС полягає в зменшенні до нуля струму  $\mathbf{I}'$ . Цей струм можна визначити [3]:

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} - \mathbf{I}_e = \mathbf{C}\mathbf{J} - \mathbf{C}_r\mathbf{J} = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r)\mathbf{J}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{J}$  - задаючий струм у вузлах ЕЕС;  $\mathbf{C} = \mathbf{z}_B^{-1}\mathbf{M}_t\mathbf{Y}^{-1}$  - матриця струморозподілу в ЕЕС;

$\mathbf{C}_r = \mathbf{r}_e^{-1}\mathbf{M}_t\mathbf{Y}_r^{-1}$  - матриця струморозподілу в заступній  $r$ -схемі ЕЕС;  $\mathbf{z}_B = \mathbf{r}_B + j\mathbf{x}_B$  – матриця опорів віток ЕЕС;  $\mathbf{M}_t$  - транспонована матриця з'єднань віток у вузлах;  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Y}_r$  – матриці вузлових провідностей відповідно для заступних  $z$ -схеми та  $r$ -схеми ЕЕС.

Отже задачу зменшення втрат потужності в ЕЕС можна сформулювати як

$$\mathbf{I}' = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r)\mathbf{J} \Rightarrow 0. \quad (3)$$

Оскільки матриця  $\mathbf{C}$  є комплексною, а матриця  $\mathbf{C}_r$  – дійсною, то (3) виконується за умови, коли  $\mathbf{C} \Rightarrow \mathbf{C}_r$ , тобто

$$\mathbf{C}_p = 0, \quad \mathbf{C}_a = \mathbf{C}_r, \quad (4)$$

де  $\mathbf{C}_a$ ,  $\mathbf{C}_p$  – активна і реактивна складові матриці струморозподілу  $\mathbf{C}$ .

Зауважимо, що перша умова з (4) є необхідною, а друга – достатньою.

Запишемо матрицю  $\mathbf{C}$  згідно її визначення [4] і позначення як в (2) через активні і реактивні опори віток та провідності вузлів ЕЕС. Вона матиме вигляд:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{g}_B - j\mathbf{b}_B)\mathbf{M}_t(\mathbf{r} + j\mathbf{x}) = (\mathbf{g}_B\mathbf{M}_t\mathbf{r} + \mathbf{b}_B\mathbf{M}_t\mathbf{x}) + j(\mathbf{g}_B\mathbf{M}_t\mathbf{x} - \mathbf{b}_B\mathbf{M}_t\mathbf{r}),$$

де  $\mathbf{g}_B$ ,  $\mathbf{b}_B$  - активна та реактивна складові матриці провідностей віток;  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{x}$  - активна та реактивна складові матриці опорів вузлів.

З останнього виразу слідує, що

$$\mathbf{C}_p = (\mathbf{g}_B\mathbf{M}_t\mathbf{x} - \mathbf{b}_B\mathbf{M}_t\mathbf{r})$$

або

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{g}_B(\mathbf{M}_t\mathbf{x}\mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B\mathbf{r}_B^{-1}\mathbf{M}_t)\mathbf{r}. \quad (5)$$

Вираз, що знаходиться в дужках в формулі (5), позначимо

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{M}_t\mathbf{x}\mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B\mathbf{r}_B^{-1}\mathbf{M}_t. \quad (6)$$

Він є матрицею системних показників неоднорідності ЕЕС. Як видно, значення  $\boldsymbol{\gamma}$  визначається співвідношенням реактивних та активних складових опорів елементів ЕЕС,

тобто неоднорідністю її параметрів [5]. Розмір даної матриці визначається кількістю віток  $n$  та кількістю вузлів  $m$  ЕЕС.

З виразу (6) неважко переконатися, що для однорідної ЕЕС, коли для всіх віток  $x_i/r_i = idem$ ,  $\gamma = 0$ . Тобто, незалежно від навантаження ЕЕС  $\dot{\mathbf{I}}' = 0$  і додаткові втрати, що викликаються зрівнювальними струмами, в ЕЕС відсутні. У інших випадках, коли  $x_i/r_i \neq idem$ ,  $\gamma \neq 0$  і, відповідно,  $\dot{\mathbf{I}}' \neq 0$ . У цих випадках, як відомо [5], з метою компенсації додаткових втрат у ЕЕС необхідно в контури вводити зрівнювальні е.р.с. Вони можуть бути визначені за формулою [6]:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = -\mathbf{N}\mathbf{Z}_B\dot{\mathbf{I}}'. \quad (7)$$

### Узагальнені показники неоднорідності ЕЕС

Проведення оцінки доцільності оптимізаційних заходів в ЕЕС та розв'язання проектних задач пов'язане з аналізом великої кількості можливих варіантів. Вибір найкращого з них з тих чи інших міркувань має бути однозначним. Оскільки запропонований показник  $\gamma$  є багатомірним, то без додаткових умов він не дає однозначної оцінки. Таким чином необхідно ввести узагальнений показник неоднорідності шляхом приведення матриці  $\gamma$  до вигляду числа, оскільки лише в такому випадку забезпечується можливість об'єктивної оцінки близьких варіантів. Такий прийом використано в [6].

У відповідності з фізичним змістом матрицю  $\gamma$  можна розглядати як функціональну метричну множину  $\{\gamma\}$ , яка задовольняє аксіомам матричного простору [7], кожен рядок якої є набором координат  $n$ -вимірному вектора-стовпця е.р.с. віток у базисі вузлових напруг, визначених на основі заступної  $r$ -схеми ЕЕС [6]. Таким чином стовпець довжин векторів неоднорідності віток схеми з урахуванням прийнятого базису у відповідності з [7] може бути визначений за таким виразом:

$$|\gamma|_i = \left[ \sqrt{\sum_{j=1}^m \gamma_{i,j}^2} \right]_{i=1,2,\dots,n}. \quad (8)$$

Таким чином значення елементів вектора  $|\gamma|$  мають фізичний зміст модулів векторів е.р.с. у вітках, які формують зрівнювальні струми в ЕЕС, і можуть бути використані як індикатор величини впливу параметрів кожної окремої вітки на рівень оптимальності системи в цілому.

Для формування узагальненого показника неоднорідності з метою забезпечення кількісної оцінки неоднорідності ЕЕС в цілому, розглянемо дві складові матриці  $\gamma$  (6), як складові функціональної метричної множини  $\{\gamma\}$ , для кожної пари елементів якої поставлено у відповідність невід'ємне дійсне число і які також задовольняють аксіомам метричного простору [7]. Метризація множини  $\{\gamma\}$  дозволяє кількісно визначити величину неоднорідності ЕЕС через розбіжність між неоднорідністю, приведеною до вузлів схеми ЕЕС приєднаних до віток схеми, та неоднорідністю віток, розподіленою по вузлах ЕЕС. Це значення може бути визначене через евклідову норму матриці  $\gamma$ :

$$d\gamma = \rho(\mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1}, \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{i,j}^2}. \quad (9)$$

Значення  $d\gamma$  є узагальненим показником неоднорідності ЕЕС. Цей показник дає змогу оцінити вплив зміни топології та параметрів схеми на оптимальність режимів ЕЕС. Діапазон його значень для конкретної ЕЕС у відповідності з [7] визначається:

$$0 \leq d\gamma \leq d\gamma_{\max},$$

$$\text{де } d\gamma_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (M_{ji} x_{ij} r_{ij}^{-1})^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{vij} r_{vij}^{-1} M_{ji})^2}.$$

Для контролю змін однорідності або оптимальності стану ЕЕС в процесі оптимізації схеми за рахунок введення того чи іншого заходу доцільно перейти до відносних оцінок:

$$d\gamma_* = \frac{d\gamma}{d\gamma_6}, \quad (10)$$

де  $d\gamma_6$  – значення узагальненого показника неоднорідності для базової схеми, тобто до внесення оптимізуючих змін.

Для оцінки потенційних можливостей оптимізаційних заходів по реконструкції ЕЕС, тобто визначення, наскільки поточний стан системи далекий від однорідного, а також для можливості порівняння електричних систем з різною топологією доцільно користуватися відносним показником неоднорідності:

$$\delta\gamma = d\gamma / d\gamma_{\max}. \quad (11)$$

Його значення знаходяться у межах:

$$0 \leq \delta\gamma \leq 1.$$

ЕЕС має тим більшу неоднорідність, чим ближче значення відносного показника неоднорідності до верхньої межі  $\delta\gamma_{\max} = 1$ .

### Використання узагальнених показників неоднорідності

На рис.2., як приклад, подано графічне представлення елементів вектора  $|\gamma|$  для фрагмента схеми 110-330 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи (ПЗЕС) рис.1., з якого видно нерівномірність впливу параметрів віток на оптимальність схеми ЕЕС. Так найістотніший вплив на міру неоднорідності спостерігається з боку ліній 819–802, 825–837 та 837–830, тобто реконструкція саме цих ліній призведе до найбільшого загальносистемного ефекту.

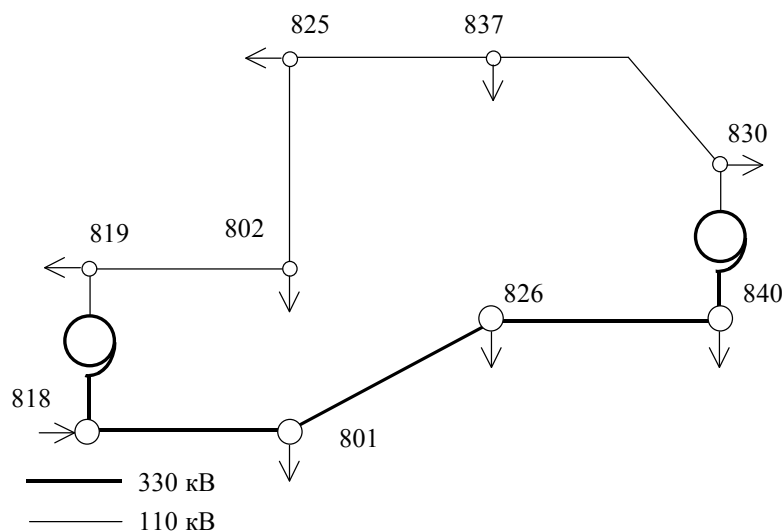


Рис.1. Фрагмент схеми ЕЕС 110–330 кВ

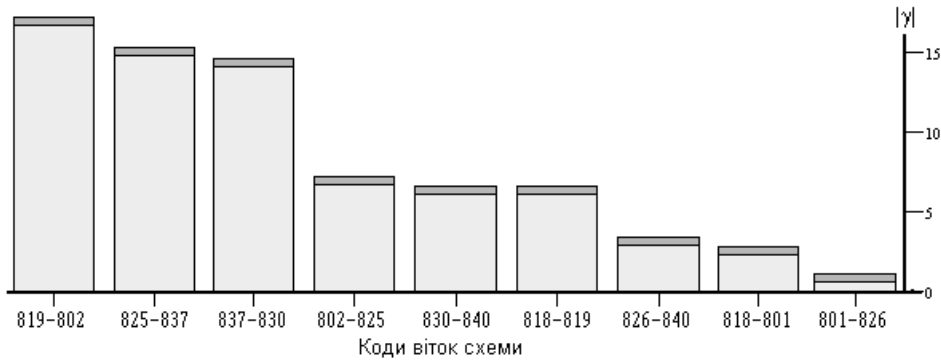


Рис.2. Ранжування віток схеми ЕЕС 110–330 кВ за мірою впливу на неоднорідність системи

Зменшення значення  $d\gamma$  відповідає поліпшенню стану системи, тобто наближенню її до однорідності. Відносне значення  $d\gamma^*$  показує наскільки ефективний оптимізаційний захід. Наприклад, на рис. 3 показана залежність  $d\gamma^*$  від відносного індуктивного опору лінії 819-802  $d\gamma^*=f(x_{л*})$ . Таку залежність можна використати для визначення оптимальних параметрів пристроїв повздовжньої компенсації (ППК). Мінімальне значення функції  $d\gamma^*=f(x_{л*})$  відповідає оптимальному значенню ємнісного опору ППК. Так для лінії 819–802 оптимальний опір ППК складає у відносних одиницях  $x_{c*} = 0.4$ , а у іменованих  $x_c = 11.24$  Ом.

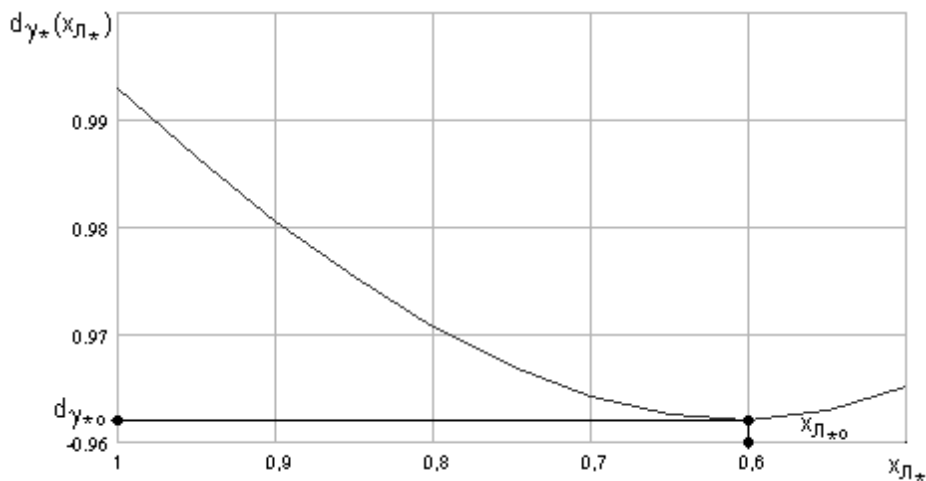


Рис.3. Визначення оптимального реактивного опору вітки 819–802 з метою встановлення ППК.

Результати аналізу неоднорідності фрагменту схеми ЕЕС 110–330 кВ до та після встановлення ППК подані у табл. 1. Результати розрахунків усталеного режиму (табл. 2) підтверджують стійке зниження втрат активної потужності за рахунок зниження міри неоднорідності даного фрагменту ЕЕС.

Таким чином за допомогою узагальнених показників можна оцінити вплив зміни топології ЕЕС, введення нових ліній електропередач, ППК та трансформаторів на оптимальність режимів ЕЕС. Ними можна скористатись для проведення цілеспрямованої реконструкції ЕЕС з метою зменшення міри її неоднорідності, тобто послідовного

усунення першопричини неоптимальності режимів і створення, таким чином умов самооптимізації поточкорозподілу в електроенергетичній системі.

Таблиця 1

**Результати аналізу неоднорідності ЕЕС 110–330 кВ**

	Узагальнений показник $d\gamma$	Максимальне значення $d\gamma_{\max}$	Відносний показник $\delta\gamma$ , %
Вихідна схема ЕЕС	30.936	110.361	28.031%
Після встановлення ППК у вітці 819–802	29.002	108.696	26.68%

Таблиця 2

**Результати розрахунку усталеного режиму ЕЕС 110–330 кВ**

Коефіцієнт обтяження		k = 0.6	k = 1	k = 1.4
Втрати активної потужності, МВт	Усталений режим вихідної схеми ЕЕС	3.88	12.32	26.89
	Після встановлення ППК у вітку 819–802	3.83	12.03	25.99
Зниження втрат потужності за рахунок встановлення ППК, МВт/%.		<u>0.05</u> 1.29%	<u>0.3</u> 2.43%	<u>0.9</u> 3.35%

**Висновки**

1. В результаті моделювання неоднорідності ЕЕС та її впливу на оптимальність режимів енергосистем розроблено ряд узагальнених показників, які можуть бути використані для модифікації норм проектування електричних мереж з метою здійснення цілеспрямованої реконструкції існуючих мереж, направленої на зниження міри неоднорідності ЕЕС в цілому та забезпечення умов їх самооптимізації.

2. До переваг запропонованих показників неоднорідності слід віднести те, що вони залежать лише від топології схеми та співвідношення параметрів пасивних елементів, і не залежить від потужностей навантаження та генерації, а також виділення системи контурів.

**ЛІТЕРАТУРА**

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., Ярных Л.В. Расчет токораспределения в электрической сети // Электричество. - 1982. - №8. – С. 10-14.
4. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1981. – 320 с.
5. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
6. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Пауткіна Л.Р. Моделювання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режимів // Вісник ВПІ. – 1996. - №4. – С. 44-49.
7. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления.– М.: Наука, 1984. – 320 с.