

УДК 621.311.161

**В.В.КУЛИК** (канд. техн. наук, доц.), **С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ**, **В.Ф. КИРИЧЕНКО**  
**Вінницький національний технічний університет**  
[kulik\\_vv@mail.ru](mailto:kulik_vv@mail.ru)

## **МОДЕЛЮВАННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ДАЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧАМИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЇХ РЕЖИМАМИ**

*Статтю присвячено розробленню математичної моделі неоднорідності електричної системи (ЕС), як одної з причин неоптимальності її режимів. На відміну від попередніх робіт, в запропонованій моделі враховано вплив на неоднорідність ЕС хвильових властивостей транспортування електроенергії довгими лініями електропередачі, що дозволяє сформулювати передумови для підвищення ефективності реконструкції магістральних електромереж та оптимального керування їх нормальними режимами.*

**Ключові слова:** електрична система, нормальні режими, магістральні електромережі, довгі лінії електропередачі, неоднорідність, оптимальне керування, математичне моделювання.

**Вступ.** Однією з основних причин неоптимальності режимів електричної системи (ЕС) і, відповідно, додаткових втрат електроенергії при її транспортуванні та розподілі є неоднорідність її параметрів. Неоднорідність ЕС призводить також до інших негативних явищ: зниження якості електроенергії, додаткове завантаження ліній електропередачі (ЛЕП) розподільних електромереж, а також зниження пропускну здатності системи в цілому [1, 2].

Неоднорідність є конструктивним параметром ЕС, тому негативно впливає на її режими на протязі всього часу функціонування системи. Зниження міри неоднорідності ЕС досягається за рахунок встановлення в ній установок повздожньої компенсації (УПК), реакторів або зміни конструкції ЛЕП, що потребує значних капітальних витрат і може бути застосоване коли неоднорідність зумовлена невеликою кількістю елементів ЕС, або якщо реконструкція електромереж (ЕМ) необхідна з інших міркувань.

З іншого боку негативний вплив неоднорідності ЕС можна частково усунути режимними заходами в процесі експлуатації. Однак, з огляду на складність та динамічність ЕС, моніторинг режимів та реалізацію оптимальних значень параметрів наявних регулювальних пристроїв (РП) відповідно до зміни станів системи можливо здійснювати лише за допомогою систем автоматичного керування (САК).

Наведені підходи до підвищення ефективності транспортування електроенергії електромережами ЕС вимагають застосування максимально адекватних моделей неоднорідності мереж, адже це визначає досяжний ефект від їх реалізації [2].

Для формування загальних математичних моделей нормальних режимів ЕС, які використовують для формуванні моделей окремих явищ та процесів, пов'язаних з транспортуванням електроенергії електромережами, традиційно використовуються підходи, що пов'язані з представленням ліній електропередачі заступними схемами з зосередженими параметрами [1, 2]. Однак, простота та зручність використання таких моделей супроводжується їх обмеженою адекватністю. Наприклад, такий підхід не дозволяє врахувати повною мірою особливості передачі електроенергії лініями 330 кВ і вище, для яких прояв хвильових властивостей виявляється суттєвим (довжина більше 300 км). Враховуючи, що методичні похибки, закладені на стадії моделювання умов оптимальності нормальних режимів ЕС будуть негативно проявлятися протягом всього часу їх застосування, то для виявлення фізичних особливостей транспортування електроенергії електромережами необхідно використовувати більш адекватні моделі об'єкту дослідження.

Робота присвячена формуванню математичної моделі неоднорідності електричних мереж ЕС з урахуванням хвильових властивостей передачі електроенергії довгими ЛЕП, а також вдосконаленню засобів аналізу неоднорідності ЕС для формування проектних та експлуатаційних рішень щодо забезпечення ефективності транспортування та розподілу електроенергії.

**Узагальнені показники неоднорідності ЕС.** Негативний вплив неоднорідності електромереж на оптимальність розподілу потужностей в ЕС може бути описаний фіктивними зрівнювальними е.р.с.  $\dot{E}_{зр}$ , які призводять до появи у замкнених контурах зрівнювальних струмів  $\dot{I}$ , таким чином, до відхилення реального струморозподілу  $\dot{I}$  від економічного  $\dot{I}_{ек}$  [1, 2]. Для неоднорідних електромереж, що містять трансформаторні зв'язки та довгі електропередачі, е.р.с.  $\dot{E}_{зр}$  можна визначити за виразом [3, 4]:

$$\dot{E}_{зр} = \dot{N}_{Ak} \dot{Z}_B (\dot{I} - \dot{I}_{ек}), \quad (1)$$

де  $\dot{N}_{Ak}$  – матриця зв'язків віток ЕС у її контурах, побудована з урахуванням трансформаторних зв'язків та довгих електропередач [4];  $\dot{Z}_B$  – діагональна матриця опорів віток заступної схеми [4], в якій вітки довгих передач

подані постійними чотириполюсника В [5, 6];  $\dot{\mathbf{I}}_{ек}$  – вектор економічних струмів у вітках заступної схеми електромереж, визначений на підставі розрахунку економічного режиму електромереж з довгими ЛЕП;  $\dot{\mathbf{I}}$  – вектор струмів у вітках, що відповідає реальному струморозподілу з врахуванням взаємовпливу електромереж різних класів напруги, які працюють паралельно.

В [4] показано, що струморозподіл з мінімально-можливими втратами потужності в ЕМ з довгими ЛЕП, який відповідає економічному режиму роботи електромереж [1], може бути розраховано за заступною  $r$ -схемою ЕС (по аналогії з [1]), за таких умов:

- в заступній схемі враховано активні опори елементів з зосередженими параметрами (коротких ЛЕП, трансформаторів тощо) та дійсні частини постійних чотириполюсників В (для довгих ЛЕП);
- коефіцієнти трансформації у замкнених контурах приймаються збалансованими (відсутні е.р.с. небалансу);
- коефіцієнти розповсюдження хвилі  $\gamma_0$  [5, 6] та довжини ЛЕП  $l$  співвідносяться так, що у замкнених контурах з довгими ЛЕП не виникає е.р.с. небалансу (постійні чотириполюсника  $\dot{A}_i = ch(\gamma_{0i} l_i) = idem$ );

Виходячи з наведеного, вирази для визначення векторів  $\dot{\mathbf{I}}$  та  $\dot{\mathbf{I}}_{а\acute{e}}$ , як функцій задаючих струмів  $\dot{\mathbf{J}}$  у вузлах заступної схеми ЕС можуть бути подані так:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \dot{\mathbf{Y}}_6 \dot{U}_6) + \dot{\mathbf{Z}}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6^T \dot{U}_6; \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{ек} = \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}'_{R6} \dot{U}_6) + \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6^T \dot{U}_6, \quad (3)$$

де  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak} = \mathbf{M}^+ + \mathbf{M}^- \mathbf{A}_d \widehat{\mathbf{K}}$  – матриця зв'язків віток ЕМ у її вузлах з урахуванням ідеальних трансформаторів та довгих електропередач [3, 4];  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T = \mathbf{M}^{T+} + \mathbf{K} \mathbf{A}_d \mathbf{M}^{T-}$  – транспонована матриця зв'язків віток ЕМ у її вузлах (символ « $T$ » тут і далі позначає операцію транспонування матриць);  $\mathbf{M}^{T+}$ ,  $\mathbf{M}^{T-}$  – матриці, які формуються заміною, відповідно, від'ємних або додатних елементів транспонованої матриці з'єднань  $\mathbf{M}^T$  [1] нулями;  $\mathbf{K}$ ,  $\widehat{\mathbf{K}}$ ,  $\mathbf{A}_d$  – діагональні матриці, відповідно, прямих і комплексно-спряжених коефіцієнтів трансформації трансформаторних віток та постійних чотириполюсника А для інших віток заступної схеми ЕМ;  $\dot{\mathbf{Y}}_6$ ,  $\mathbf{Y}'_{R6}$  – стовпці матриці вузлових провідностей, що відповідають базисному вузлу ЕМ, визначені, відповідно, за повною заступною схемою та за  $r$ -схемою;  $\dot{U}_6$  – напруга базисного вузла ЕМ;  $\dot{\mathbf{M}}_6^T$  – стовпець матриці з'єднань  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$ , що відповідає базисному вузлу ЕМ;  $\mathbf{R}_B$  – діагональна матриця опорів віток, що містить лише активні складові опорів віток  $\dot{\mathbf{Z}}_B$ ;  $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$ ,  $\dot{\mathbf{M}}'_{Ak}$ ,  $\dot{\mathbf{M}}_6^T$ ,  $\mathbf{Y}'_{R6}$  – матриці зв'язків та пасивних параметрів заступної схеми ЕС, визначені з урахуванням умов розрахунку економічного режиму, які подано вище.

Підставивши у (1) вирази для  $\dot{\mathbf{I}}$  і  $\dot{\mathbf{I}}_{а\acute{e}}$ , після перетворень та спрощень було отримано:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} (\dot{\mathbf{M}}_6^T - \dot{\mathbf{M}}_6^T) \dot{U}_6 - j \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} [\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}'_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}'_{R6} \dot{U}_6) + \dot{\mathbf{M}}_6^T \dot{U}_6] = \dot{\mathbf{E}}'_{зр} - j \dot{\mathbf{E}}''_{зр}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{X}_B$  – діагональна матриця опорів віток, що містить лише реактивні складові опорів віток  $\dot{\mathbf{Z}}_B$ .

За визначенням матриці-стовпці  $\dot{\mathbf{M}}_6^T = \dot{\mathbf{M}}_6^T$ , тобто складова  $\dot{\mathbf{E}}'_{зр} = 0$ . Отже, (4) можна подати у вигляді:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = -j (\dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6^T \dot{U}_6 + \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}'_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}'_{R6} \dot{U}_6)), \quad (5)$$

або у відносних одиницях у приведенні до напруги базисного вузла:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр*} = -j (\dot{\mu}_{1*} + \dot{\mu}_{2*}); \quad \dot{\mu}_{1*} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6^T; \quad \dot{\mu}_{2*} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T (\dot{\mathbf{M}}'_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T)^{-1} \mathbf{Y}_n, \quad (6)$$

де  $\mathbf{Y}_n = (\dot{\mathbf{J}} \dot{U}_6^{-1} - \mathbf{Y}'_{R6})$  – вектор провідностей навантажень з урахуванням взаємних провідностей базисного вузла. Вектори  $\dot{\mu}_{1*}$ ,  $\dot{\mu}_{2*}$  визначається співвідношенням реактивних та активних опорів віток заступної схеми ЕМ, коефіцієнтами трансформації трансформаторів та постійними чотириполюсника довгих ЛЕП А, тобто є узагальненими показниками неоднорідності ЕМ. Виходячи з (6), відсутність зрівнювальних е.р.с. у замкнених контурах характерна лише для ЕМ, в яких всі вітки відповідають класичній умові однорідності [1]  $x_i/r_i = idem$  (необхідна умова –  $\dot{\mu}_{2*} = 0$ ), а коефіцієнти трансформації в контурах збалансовані й для довгих

ЛЕП забезпечується умова узгодженості коефіцієнтів розповсюдження хвилі  $\gamma_i = \sqrt{(r_i + jx_i)(g_i + jb_i)} = idem$  [6] (достатня умова –  $\dot{\mu}_{1*} = 0$ ). Виходячи з останнього забезпечити однорідність електромереж з довгими ЛЕП проектними заходами є практично неможливо, особливо враховуючи істотну залежність їх поперечних провідностей  $g_i$ ,  $b_i$  від випадкового впливу навколишнього середовища. Для забезпечення режимів їх роботи, близьких до економічних доцільно застосовувати заходи з оптимального керування трансформаторами зв'язку з

поздовжньо-поперечним регулюванням.

**Загальносистемні показники неоднорідності ЕС.** Оцінювання доцільності оптимізаційних заходів в ЕС у проектних та експлуатаційних задачах пов'язане з аналізом значної кількості можливих варіантів, а вибір кращого має бути однозначним. Оскільки запропоновані показники  $\mu_{1*}, \mu_{2*}$  є векторами, то без додаткових умов не дають однозначної оцінки. Таким чином необхідно ввести загальносистемний показник неоднорідності шляхом приведення векторів  $\mu_{1*}, \mu_{2*}$  до вигляду числа. Такий прийом використано в [2].

За фізичним змістом вектори  $\mu_{1*}, \mu_{2*}$  є набором координат  $n$ -вимірного вектора-стовпця контурних е.р.с., де ортами є напруга базисного вузла. Таким чином, довжина вектора еквівалентної зрівнювальної е.р.с. з урахуванням прийнятого базису може бути визначена за виразом:

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\mu_{1*_i} + \mu_{2*_i})^2} \quad (7)$$

Значення  $\mu$  є загальносистемним показником неоднорідності ЕС. Цей показник дає змогу оцінити вплив зміни топології та параметрів системи на оптимальність режимів ЕС. Діапазон його значень для конкретної ЕС визначається:

$$0 \leq \mu \leq \mu_{\max},$$

$$\text{де } \mu_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (\mu_{1*_i})^2 + \sum_{i=1}^k (\mu_{2*_i})^2}.$$

Для оцінювання потенційних можливостей оптимізаційних заходів, направлених на компенсацію негативного впливу неоднорідності ЕС (як проектних, так і експлуатаційних), тобто визначення, наскільки поточний стан ЕМ далекий від однорідного, а також для можливості порівняння електричних систем з різною топологією доцільно користуватися відносним показником неоднорідності:

$$\mu_* = \mu / \mu_{\max}, \quad (8)$$

який змінюється в діапазоні  $0 \leq \mu_* \leq 1$ . Значення  $\mu_* > 0,4 \div 0,5$  є індикатором необхідності запровадження проектних заходів зі зменшення неоднорідності ЕС, або, що більш актуально, запровадження систем автоматичного керування трансформаторами зв'язку, які об'єднують електричні мережі різних напруг, направлених на перерозподіл природних потоків потужності з примусовим наближенням їх до потокорозподілу в однорідній ЕС. Цим досягається зменшення втрат електроенергії на її транспортування.

**Висновки.** 1. У роботі вперше поставлено наукову задачу розроблення методу визначення загальносистемного показника неоднорідності ЕС, що містить довгі лінії електропередачі. Наведена математична модель неоднорідності електричних мереж з урахуванням особливостей функціонування довгих ліній електропередач може бути використана для розроблення нових, більш ефективних методів оптимізації нормальних режимів магістральних електромереж ЕЕС.

2. За допомогою запропонованих загальносистемних показників неоднорідності можна оцінити вплив зміни топології ЕС, введення нових ліній електропередач, УПК та трансформаторів на оптимальність режимів ЕС. Ними можна скористатись для проведення цілеспрямованої реконструкції ЕС з метою зменшення міри її неоднорідності, тобто послідовного усунення першопричини неоптимальності режимів і створення, таким чином умов самооптимізації потокорозподілу в електричній системі.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Холмский В. Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности / В. Г. Холмский // Электричество. – 1965. – №9. – С. 16–21.
2. Лежнюк. П. Д. Моделирование компенсации влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. І. Оболонський // Электричество. – 2007. – №11. – С. 2-8.
3. Лежнюк П.Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.Б. Бурикін: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 123 с.
4. Кулик В.В. Комбіновані моделі нормальних режимів електричних систем з урахуванням особливостей довгих ліній електропередач / В.В. Кулик, С.Я. Вишневський // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – №1. – С. 1–7. Електронний ресурс. Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012\\_1/2012-1.files/uk/12vkvltl\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vkvltl_ua.pdf)
5. Веников В.А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока / В.А. Веников, Ю.П. Рыжов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
6. Сулейманов В.М. Электричні мережі та системи / В.М. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.

## REFERENCES

1. Kholmkiy V. G. Optimisation of power streams in the closed electrical networks with high-scale of inhomogeneity. *Electrichestvo*. 1965. 9: 16–21.
2. Lezhnyuk P. D., Kulyk V. V., Obolonskiy D. I. Modelling of compensation of agency of electrical networks inhomogeneity on profitability of their regimes. *Electrichestvo*. 2007. 11: 2–8.
3. Legnyuk P.D., Kulik V.V., Burykin O.B. *Vzayemovplyv elektrychnyh mereg i system v protsesi optimalnogo keruvannya yih regymamy* [United power system electric networks interference in the process of their modes optimum control] Vinnytsia: UNIVERSUM–Vinnytsia, 2008. 123 p.
4. Kulyk V. V. The combined models of electric systems normal regimes taking into account features of long powers line. *Naukovi Pratsi VNTU*. 2012. 1: 1–7. Electronic resource: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012\\_1/2012-1\\_files/uk/12vvkltl\\_ua.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012_1/2012-1_files/uk/12vvkltl_ua.pdf)
5. Venikov V. A. *Dalniye elektroperedachi peremennogo i postoyannogo toka* [Long-distance power transmissions variable and a direct current] Moscow: Energoatomizdat, 1985. 272 p.
6. Suleymanov V. M., Katsadze T. L. *Elektrychni mereji i systemy* [Electrical networks and systems] Kyiv: NTUU «KPI», 2008. 456 p.

Надійшла до редакції 03.04.2013

Рецензент: М.В. Гребченко

В. В. КУЛИК, С. Я. ВИШНЕВСКИЙ, В. Ф. КИРИЧЕНКО  
Винницкий национальный технический университет

**Моделирование неоднородности электрических систем с дальними электропередачами в задачах оптимального управления их режимами.** Статья посвящена разработке математической модели неоднородности электрических систем (ЭС), как одной из причин неоптимальности их режимов. В отличие от предыдущих работ, в предложенной модели учтено влияние на неоднородность ЭС волновых явлений при транспортировке электроэнергии по длинным линиям электропередачи, что позволяет сформировать предпосылки для повышения эффективности реконструкции магистральных электросетей и оптимального управления их нормальными режимами.

**Ключевые слова:** электрическая система, нормальные режимы, магистральные электросети, длинные линии электропередачи, неоднородность, оптимальное управление, математическое моделирование

V. KULIK, S. VISHNEVSKIY, V. KIRICHENKO  
Vinnytsia National Technical University

**Modelling of Inhomogeneity of Electric Systems with Long-Distance Power Transmissions in Optimum Control Problems Their Regimes.** Paper is devoted working out of mathematical model of inhomogeneity of electric power systems (EPS), as one of the reasons of nonoptimality their regimes. Unlike the previous works, in the offered model agency on inhomogeneity EPS of the wave phenomena in transit the electric power on long powers line that allows to generate preconditions for raise of efficiency of redesign of the main networks and optimum control of their normal regimes is considered. The use of systematic approach to enhancing the efficiency of the reconstruction of power systems and to their normal modes optimum control was suggested. Some generalized indexes of non-uniformity were worked out. These indexes served as the foundation for the development of the method of parametric optimization of power systems aimed at providing conditions for their self-optimization. A number system parameters of the inhomogeneity which meanings are defined exclusively by design data of circuit designs EPS is developed, and allow univocal to define extent of an optimality system, and thus to size up necessity of redesign and expediency of application for operative correction means by a normal regime for the purpose of decrease in stray load losses of the power called by agency of inhomogeneity EPS; to define agency of separate elements on a system optimality as a whole; using dependences of relative parameters on combined parameters of elements EPS to define optimum meanings of these parameters from the point of view of decrease the system inhomogeneity. Parameters give the chance to choose a direction of redesign EPS which will provide approach to a homogeneous condition. The means of operative correction of normal regimes EPS the automatic-control system which act is directed on compensation the called inhomogeneity of an electric power system.

**Keywords:** electric system, normal regimes, the main networks, long powers line, inhomogeneity, optimum control, mathematical modelling.