

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Кузнецов В. Г., Нікішин Д. А., Тугай Р. Ю.

*Інститут електродинаміки Національної академії наук України (м. Київ)*

*Розглянута несиметрія в аномальних режимах роботи лінії електропередачі, що зумовлена пофазною різницею параметрів її елементів, зокрема, плановим або аварійним неповнофазним відключенням цих елементів. Запропонована тензорна компунд-модель лінії електропередачі, яка дає змогу виконувати аналіз режимів при комбінованій несиметрії. Модель призначена для дослідження техніко-економічних показників можливих аномальних несиметричних режимів роботи електропередачі з метою визначення границь зон безпеки режимів.*

**Постановка проблеми.** Поняття нормального режиму електричної мережі включає вимогу симетрії трифазної системи параметрів її елементів, тобто їх тотожності для всіх фаз. Це зазвичай дає змогу використовувати при аналізі режимів однофазні моделі елементів систем електропостачання (СЕС). Але справедливо говорити про нормальний режим тільки до тих пір, поки нормовані показники несиметрії не перевищують регламентованих значень. Для аномальних несиметричних режимів характерним є погіршення якості електричної енергії і зростання її втрат, зниження ефективності роботи обладнання як мережі, так і споживачів, можливість відмови засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики, створення завад на лініях зв'язку. В таких режимах збільшується нагрів проводів ліній електропередач (ЛЕП), обмоток трансформаторів і двигунів. Конденсаторні установки при несиметрії напруг нерівномірно завантажують реактивною потужністю фази, що унеможлиблює повне використання встановленої конденсаторної потужності. Крім того, конденсаторні установки в цьому випадку підсилюють вже існуючу несиметрію, тому що видача реактивної потужності в мережу в фазі з найменшою напругою буде меншою, ніж в інших фазах.

Несиметричний режим роботи трифазної системи може бути спричинений несиметрією параметрів елементів електричної мережі або застосуванням споживачами електрообладнання з різним навантаженням по окремим фазам. Це стосується електрообладнання, виготовлення якого у симетричному трифазному виконанні або неможливо, або недоцільно [8]. Найбільш суттєва несиметрія параметрів елементів електричної мережі виникає при відключенні однієї чи двох фаз елементів ЛЕП при збереженні в роботі інших, тобто неповнофазний режим. В залежності від причин відключення, тривалі неповнофазні режими можна підрозділити планові і аварійні. Перші виникають, наприклад, під час плавлення ожеледі або для виконання пофазного ремонту повітряних ліній, другі – під час аварійних ситуацій: обрив проводів, відмова у роботі комутаційних апаратів, стійкі короткі замикання. Якщо в цих випадках вдається залишити в роботі неушкоджені фази, то можна стверджувати, що підвищення безперебійності та надійності електропостачання вдалося досягти за рахунок використання аномального несиметричного режиму. Виконані практичні та теоретичні дослідження показали на можливість і бажаність використання неповнофазних режи-

мів при експлуатації електричних мереж [3]. Але все ж тривалі неповнофазні режими мають обмежене застосування, оскільки при цьому доводиться нехтувати погіршенням техніко-економічних характеристик роботи мережі, перш за все, якістю електроенергії та умовами роботи обладнання.

При неповнофазному режимові ЛЕП високої напруги виникає різке порушення несиметрії струмів і напруг, з'являються струми в землі, нейтралях трансформаторів, струми нульової послідовності в приєднаннях, що суміжні з неповнофазною лінією, зростають відхилення напруги відносно нормальних робочих значень. В критичних випадках можливе підвищення напруги понад найбільшу допустиму або, іншими словами, виникнення перенапруг, з наступним розвитком важких системних аварій, які супроводжуються виходом із ладу основного обладнання енергосистем. Тому головною вимогою при реалізації неповнофазного режиму є необхідність залишити його параметри в межах, за якими можливий перехід до аварійного режиму з ушкодженням обладнання в мережах чи у споживача [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема забезпечення якості енергії, яка відповідала б граничним значенням зони безпечного існування усталених режимів в СЕС, отримала за останні десятиліття особливу актуальність у всіх розвинутих країнах світу [6]. Виявилось, що існує істотна відмінність частотних властивостей лінійної несиметричною електричної мережі або електричної мережі з несиметричними нелінійними елементами від досить добре вивчених властивостей симетричної трифазної електричної мережі. Зокрема, за несиметрії можлива поява додаткових частот вільних коливань і відповідно поява нетипових резонансних процесів з небезпечними для обладнання перенапругами та надструмами [4].

**Мета статті.** Розробити тензорну модель лінії електропередачі, що адекватно відтворює процеси в ЛЕП при несиметрії параметрів, в тому числі і в неповнофазних режимах роботи, і дозволяє оцінювати межі режимної безпеки для аномальних несиметричних режимів.

**Основні матеріали дослідження.** Більшість трифазних пристроїв, які входять до СЕС, можна вважати симетричними, хоча пофазні параметри їх елементів завжди в певній мірі відрізняються один від одного. Розглянемо схему заміщення для аналізу несиметричного режиму ЛЕП, який виникнув з тієї чи іншої причини (рис. 1).

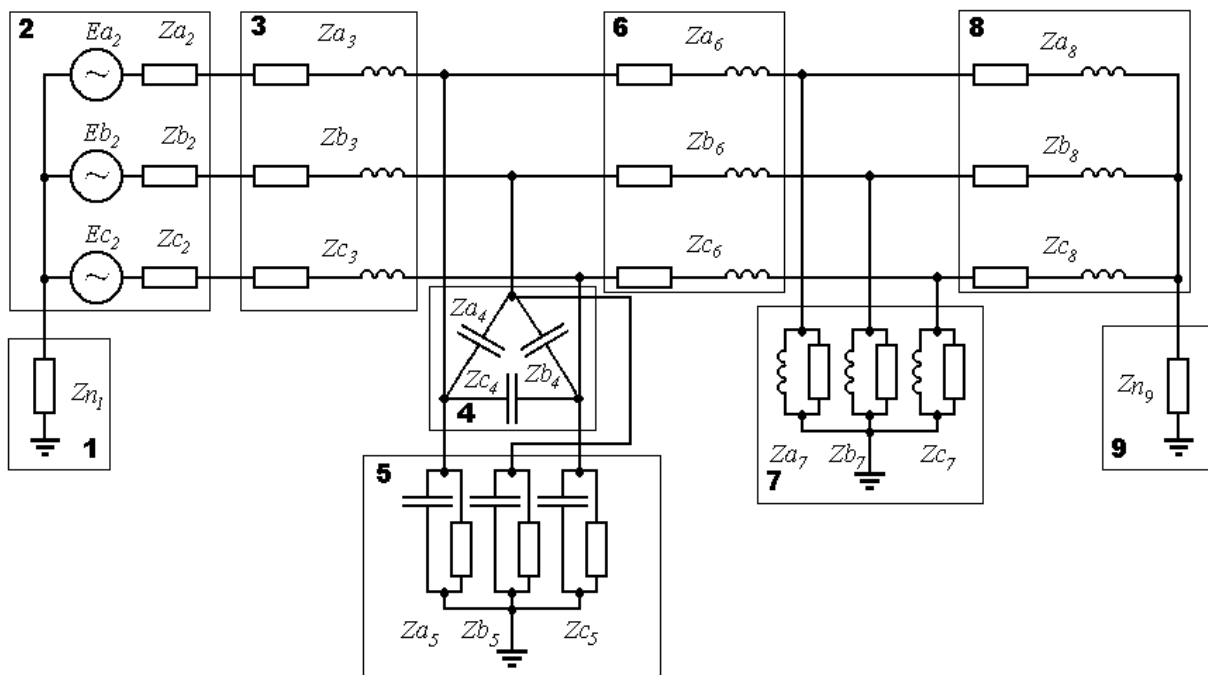


Рисунок 1 – Схема заміщення електропередачі

Для нормального режиму в практиці експлуатації електричних мереж зазвичай виникає необхідність врахування тільки можливої несиметрії параметрів повітряних ЛЕП, оскільки їх окремі фази мають різне розташування в просторі, а значить і різну ступінь електромагнітної взаємодії. Але справа значно ускладнюється у випадку аномальних неповнофазних режимів [2].

Виділимо окремі ланки трифазної електропередачі як локальні схеми, що входять до повної компаунд-моделі [1]. Схема 1 моделює заземлення системи, схема 2 є еквівалентною схемою заміщення системи живлення електропередачі. Схеми 3 – 6 відображають Т-подібну схему заміщення ЛЕП: 3 та 6 поздовжні елементи (активний елемент - виділення теплової енергії, реактивний елемент - явища самоіндукції та взаєміндукції окремих фаз); 4 та 5 поперечні елементи (активний елемент - явище коронного розряду, реактивний елемент - ємність між окремими фазами та фазами і землею). Для забезпечення єдності в підході до опису окремих моделей в компаунд-моделі, поперечні елементи схеми заміщення позначені як опори, на відміну від традиційного для електричних мереж використання провідностей. Схеми 7 і 8 є моделями обмоток вищої напруги трансформатора, що відповідають втратам активної та реактивної потужності в дослідах холостого ходу та короткого замикання трансформатора, відповідно. Індекси елементів заміщення фаз та нейтралі, відповідно:  $a, b, c, n$ . В статті розглядаємо режим, при якому несиметрія викликана різницею параметрів, а не навантажень окремих фаз, тому моделі обмоток нижчих напруг відсутні. Схема 9 моделює режим роботи нейтралі трансформатора. Зазвичай вона заземлена наглухо або через спеціальний реактор.

Відповідна схема компаунд-мережі (рис. 2) зовні нагадує звичайну однолінійну схему заміщення, але

всі тензори в цій схемі є компаунд-тензорами, а їх – індекси компаунд-індексами (так, наприклад, компаунд-індекс 8 записано замість індексів окремих фаз -  $a_8, b_8, c_8$ ).

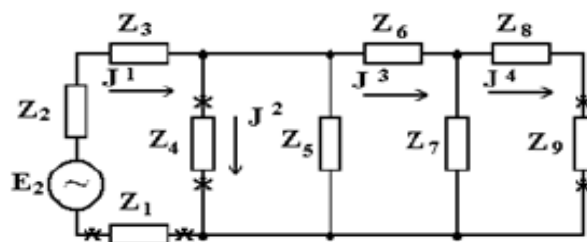


Рисунок 1 – Схема компаунд мережі

Тензор перетворень компаунд мережі:

$$C_{c}^b = \begin{bmatrix} C_g & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -C_{\Delta} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & C_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

Взагалі вся теорія та закони перетворень тензорного аналізу окремих електричних мереж є справедливими й для компаунд-мереж [1]. Тільки звичайні фізичні величини замінюються тензорами, а тензори – компаунд-тензорами. Для чіткості в подальшому викладі компаунд-тензори зображені жирними літерами.

Система індексів відповідає скороченій формі записів тензорних рівнянь [7]:  $\mathbf{b}$  - гілки,  $\mathbf{c}$  - замкнені контури. Так, тензор імпедансів елементарної компаунд-мережі  $Z_{bb}$  в нашому випадку складається з тензорів окремих мереж валентності 2 розташованих діагонально, а вектор-стовпчик тензора електрорушійної сили (ЕРС)  $E_b$  для даної мережі має тільки один другий ненульовий елемент. Схема компаунд-мережі має чотири контури, тому очевидна поява чотирьох нового контраваріантного тензора контурних струмів валентності чотири  $J^c$ .

В даному випадку використовуються два трифазні тензори перетворення, які пов'язані з підключенням до компаунд-мережі пристрою із з'єднанням трикутник та з опором заземлення нейтралі з'єднання зірки. Інші моделі мають співпадаючі осі, що відповідають елементарній системі координат. Якщо параметри деяких моделей задані в інших координатах, то на їх вхідних вузлах з'являється відповідний тензор перетворення. Втім, можна вважати, що кожна модель підключена через компаунд-вузол, але якщо символ \* на відповідній гілці відсутній, то тензор перетворень є одиничним. Необхідно зауважити, що всі елементи  $C_c^b$  (1) є тензори відповідної валентності:  $\mathbf{1}$  та  $\mathbf{0}$  – одиничний та нульовий тензори,  $C_g$  та  $C_\Delta$  - трифазні тензори перетворень заземлення і трикутника.

Тензор контурного імпедансу компаунд-мережі  $Z_{cc}$  тепер можна знайти за виразом

$$Z_{cc} = C_c^b Z_{bb} C_c^b \quad (2)$$

Тензор контурних ЕРС системи прикладений до компаунд мережі буде

$$E_c = C_c^b E_b \quad (3)$$

Тоді невідомий тензор

$$J^c = (Z_{cc})^{-1} E_c \quad (4)$$

Струми в окремих мережах можна обчислити як

$$I^b = C_c^b J^c \quad (5)$$

а напруги

$$U_b = Z_{bb} C_c^b J^c \quad (6)$$

Вирази описують процеси в трифазній мережі, причому вони не зміняться, якщо замість фазних координат використати координати послідовностей, оскільки компаунд-індекси залишаться тими самими (кількість осей координат однакова), хоча і матимуть інші складові ( $p, q, \theta$ ). Таким чином модель може бути використана для аналізу несиметричних режимів як в фазних координатах, так і за допомогою симетричних послідовностей.

В останньому випадку зазнають зміни вузлові тензори перетворень. Їх нові значення можуть бути

обчислені за допомогою оберненого тензора перетворень  $A$

$$C'_\Delta = A_p^q C_\Delta C_q^p \quad (7)$$

Наприклад, при з'єднанні в трикутник трифазний тензор перетворень може бути переведений для осей послідовностей

$$C'_\Delta = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 - a & 0 \\ 0 & 0 & a - a^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Можна зауважити, що перший рядок у  $C'_\Delta$  нульовий. Це ілюструє відомий факт, що струм нульової послідовності не може вийти з трикутника. З (7) випливає, що якщо  $C_\Delta$  є одиничним, то й  $C'_\Delta$  буде одиничним, тобто нові вузлові тензори перетворень при заміні фазних координат на координати послідовностей (і навпаки) не з'являються. Тому компаунд-мережа є зручною моделлю для аналізу систем, в яких різні трифазні пристрої описані з використанням координат різного типу. Для аналізу неповнофазних режимів у компаунд-мережі (рис. 3) можна відповідним чином змінити модель 3, при цьому інші моделі можуть залишатися збалансованими. Але при необхідності можна врахувати додаткову несиметрію в будь-якій з них, тобто запропонована компаунд-модель допускає виконання аналізу випадків складної комбінованої несиметрії. Виходячи з граничних умов по кожному з місць порушення симетрії трифазної системи, можна скласти по три рівняння зв'язку симетричних складових струму і напруг різних послідовностей, а виходячи із схем заміщення кожної послідовності, записати рівняння, які зв'язують відповідно симетричні складові струму і напруги однойменної послідовності. При цьому модель отримує власний тензор перетворення  $C_p$ , який на відміну від вузлових тензорів свідчить не про заміну координатних осей, а про зміну складу змінних (рис. 3).

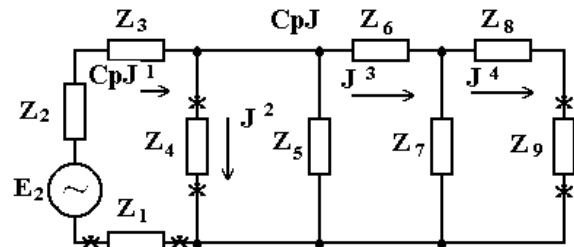


Рисунок 3 – Неповнофазний режим

У відповідності до викладеного вище, новий компаунд тензор перетворень для такої компаунд-мережі може бути записаний

$$C_{c.c}^b = \begin{bmatrix} C_g C_p & 0 & 0 & 0 \\ C_p & 0 & 0 & 0 \\ C_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ C_p & -C_\Delta & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & C_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

Для аналізу несиметричного режиму необхідно попередньо визначити параметри схеми заміщення елементів системи електропередачі з урахуванням особливостей протікання фізичних процесів при цьому. Реалізація розробленої моделі була виконана в системі MATLAB-Simulink [9]. Результатами моделювання стало з'ясування можливих наслідків несиметричного режиму та пропускну здатність лінії електропередачі в ньому.

Дослідження неповнофазних режимів було виконано для ЛЕП надвисокої напруги, оскільки вони мають важливе значення для роботи енергосистеми в цілому і дуже важливо зберегти їх працездатність в максимальному ступені. Крім того великі відстані між фазами обумовлюють найбільшу ймовірність саме однофазних коротких замикань для цих ліній. Результати досліджень дозволили обрати захисні заходи від перенапруг [3].

## Висновки

1. Несиметричні режими ліній електропередачі можуть бути викликані як пофазною різницею параметрів їх елементів, так і нерівномірним розподілом навантаження між окремими фазами. Основою дослідження обрано моделювання першого фактору, оскільки другий складно використовувати як керуючий вплив при оптимізації режимів [5].

2. Використання тензорних рівнянь компаунд мереж дозволило з їх допомогою описати узагальнену модель електропередачі, яка дає можливість досліджувати складні випадки комбінованої несиметрії спричиненої різними факторами.

3. Реалізація обраних в результаті моделювання заходів по запобіганню екстремальним значенням напруги та струму в неповнофазних режимах ЛЕП дозволяє підвищити надійність експлуатації та безперервність електропостачання.

## Список використаних джерел

1. Крон Г. Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – М.: Сов. радио, 1978. – 720с.
2. Кузнецов В. Г. Математические модели и анализ неполнофазных режимов ЛЭП / В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко, А. А. Висящев // Техническая электродинамика. – 1985. – №4. – С. 62-67.
3. Кузнецов В. Г. Вибір опору компенсаційного реактора з врахуванням впливу несиметрії параметрів ЛЕП НВН / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай,

В. В. Кучанський // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – № 33. – С. 13-18.

4. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Київ: Наукова думка, 1985. – 268 с.

5. Шидловский А. К. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. – Київ: Наукова думка, 1987. – 173с.

6. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions / IEEE Std 1459-2010. – NY USA, 2010. – 40 p.

7. Happ Н. Н. Diakoptics and networks / Н. Н. Happ. – London: Academic Press, 1971. – 286 p.

8. Kowalski Z. Asymetria w układach elektroenergetycznych / Z. Kowalski. – Warszawa: Państw. Wydaw. Nauk., 1987 – 512 s.

9. Tyagi A. MATLAB and SIMULINK for Engineers / Agam Kumar Tyagi. – Oxford: University Press, 2012.– 492 p.

## Аннотация

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Кузнецов В. Г., Тугай Ю. И, Никишин Д. А.

*Рассмотрена несимметрия в аномальных режимах работы линии электропередачи, обусловленная пофазной разницей параметров ее элементов, в частности, плановым или аварийным неполнофазным подключением этих элементов. Предложена тензорная компаунд-модель линии электропередачи, использование которой позволяет выполнять анализ режимов при наличии комбинированной несимметрии. Она предназначена для исследования технико-экономических показателей возможных аномальных несимметричных режимов работы электропередачи с целью выявления границ зон безопасных режимов.*

## Abstract

### SIMULATION OF ASYMMETRICAL OPERATING MODES OF ELECTRIC TRANSMISSION LINE

V. Kuznetsov, D. Nikishin, R. Tugai

*The phase asymmetry is considered in abnormal operating conditions of the transmission line. It is due to the phase difference of the parameters of its elements, in particular, the planned or emergency incomplete phase connection of these elements. A tensor compound model of the transmission line is proposed. This model allows to perform regimes analysis with combined asymmetry and it's intended for the study of possible abnormal asymmetric modes of operation of the power transmission in order to identify the boundaries of zones of regime security.*