

# ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРО- ТА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.31

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗМІШАНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ В ЗАДАЧІ ОЦІНКИ ВИКРИВЛЕННЯ НАПРУГИ В ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

Саснко Ю. Л.<sup>1</sup>, Калюжний Д. М.<sup>2</sup>, Свергуненко С. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Приазовський державний технічний університет (м. Маріуполь)

<sup>2</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

*Запропоновано структуру схеми заміщення змішаного навантаження з відновлювальними джерелами електричної енергії та розглянуто шляхи визначення її параметрів.*

**Постановка проблеми.** Ідентифікація джерел викривлень (ДВ) напруг в електричних мережах (ЕМ) і оцінка їх впливу на якість електричної енергії в точці загального приєднання (ТЗП) є важливими завданнями. Існуючі на сьогоднішній день методи їх розв'язку розроблені для таких приєднань як узагальнена електроенергетична система (ЕС) і споживач електроенергії без джерел активної потужності. Враховуючи масове використання відновлювальних джерел електричної енергії споживачами проблема ідентифікації їх схем заміщення в завданні оцінки викривлення напруг у ТЗП є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існуючі на сьогоднішній день методи ідентифікації й оцінки впливу ДВ напруг на якість електроенергії в ТЗП за ознакою використання базової математичної моделі можна розділити на дві основні групи. Перша група методів заснована на використанні однофазної схеми заміщення Тевеніна (рис. 1) або її еквівалента - схеми заміщення Нортонна [1-3]. У цих методах споживач електроенергії так само як і ЕС наводяться у вигляді послідовного з'єднання ЕРС і комплексного опору по кожній  $n$ -й послідовності (гармоніці). Не дивлячись на свою простоту, аналіз методів даної групи показав, що їх практична реалізація має серйозні завади. Основна причина цього полягає у тому, що струми й напруги, які вимірюються у ТЗП ( $\underline{I}_n$  і  $\underline{U}_n$ ) можна пов'язати із двома невідомими параметрами схеми заміщення ( $\underline{E}_n^c$  і  $\underline{Z}_n^c$ ) тільки одним рівнянням

$$\underline{U}_n = \underline{I}_n \cdot \underline{Z}_n^c + \underline{E}_n^c. \quad (1)$$

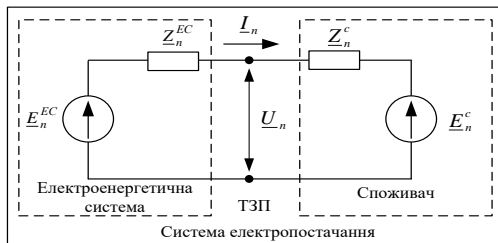


Рисунок 1 – Схема заміщення Тевеніна

Друга група методів заснована на використанні трифазної схеми заміщення системи електропостачан-

ня (СЕ) [5]. Для них узагальнена математична модель оцінки впливу лінійних ДВ напруг на якість електричної енергії в ТЗП має такий вигляд

$$\sum_{k=1}^l \vec{U}_{вик}^{ДВk} = A^T Y_{невик}^{-1} \left( \sum_{i=1}^n \vec{J}_{вик}^{ДВи} + \sum_{j=1}^m \vec{I}_{вик}^{ДВj} \right), \quad (2)$$

де  $A^T$  - транспонована матриця інцидентій;

$Y_{невик}$  - матриця вузлових провідностей, яка сформована за елементами схеми заміщення СЕ, що не призводять до викривлення напругу;

$\vec{J}_{вик}^{ДВи}$  - матриця вузлових струмів, яка сформована за пасивними елементами схеми заміщення  $i$ -го ДВ, які призводять до викривлення напругу;

$\vec{I}_{вик}^{ДВj}$  - матриця вузлових струмів, яка сформована за активними елементами схеми заміщення  $j$ -го ДВ, які також призводять до викривлення напругу;  $l = m + n$  - загальна кількість ДВ в СЕ.

**Мета статті.** Виконати структурну й параметричну ідентифікацію еквівалентної схеми заміщення узагальненого навантаження з відновлювальними джерелами енергії (надалі активного узагальненого навантаження АУН) для математичної моделі (1) за результатами вимірів струмів і напруг у ТЗП у рамках методики виміру ПЯЕ.

**Основні матеріали дослідження.** Обмежимося лінійним випадком, який відповідає синусоїдальним параметрам режиму роботи мережі. Його існування можливе або в ідеалізованій лінійній СЕ, або в рамках основної гармоніки несинусоїдального режиму, де можуть мати місце несиметрія, відхилення й провал напруг.

**Структурна ідентифікація.** Розглянемо СЕ щодо довільної ТЗП, до якої з однієї сторони підключена ЕС, а з іншого – АУН (рис 2).

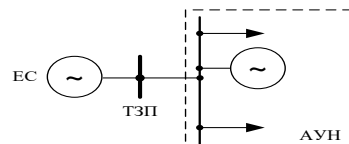


Рисунок 2 - Структурна схема СЕ відносно ТЗП

Схема заміщення такої СЕ являє собою сукупність з'єднань активних і пасивних елементів (рис. 3).

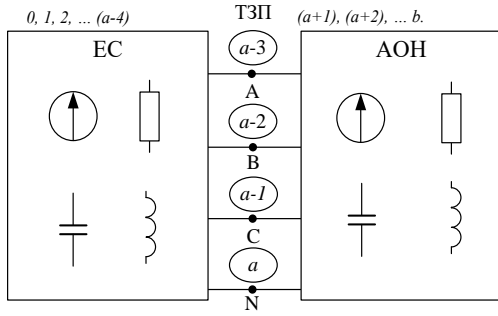


Рисунок 3 - Структурна схема СЕ відносно ТЗП

Виконаємо структурну ідентифікацію еквівалентної схеми заміщення АОН за допомогою матричного методу еквівалентування електричних кіл. Для цього пронумеруємо усі вузли схеми СЕ таким чином, щоб вузли, які відносяться до ЕС, виявилися на початку цього списку, а вузли, які відносяться до АОН – наприкінці цього списку. Рівняння вузлових потенціалів для такої схеми заміщення у матричному виді буде мати такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\Phi}_a \\ \vec{\Phi}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{I}_a \\ \vec{I}_b \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де  $Y_{aa}$  - квадратна підматриця  $[a \times a]$ , елементи якої визначаються пасивними параметрами схеми заміщення ЕС;

$Y_{bb}$  - квадратна підматриця  $[(b-a) \times (b-a)]$ , елементи якої визначаються пасивними параметрами схеми заміщення АОН;

$Y_{ab}$  і  $Y_{ba}$  - взаємотранспоновані прямокутні підматриці  $[a \times (b-a)]$  і  $[(b-a) \times a]$ , елементи яких визначаються пасивними параметрами схеми заміщення АОН, що з'єднують АОН і ЕС;

$\vec{I}_a$  - вектор-стовпець вузлових струмів  $[a \times 1]$ , який визначається за активними елементами схеми заміщення ЕС;

$\vec{I}_b$  - вектор-стовпець вузлових струмів  $[(b-a) \times 1]$ , який визначається за активними елементами схеми заміщення АОН;

$\vec{\Phi}_a$  і  $\vec{\Phi}_b$  - вектора-стовпці вузлових потенціалів ЕС і АОН.

Розв'язання матричного рівняння (3) відносно підматриці  $\vec{\Phi}_a$  дає нам наступний результат

$$\vec{\Phi}_a = (Y_{aa} + Y_{ekv})^{-1} \cdot (\vec{I}_a + \vec{I}_{ekv}), \quad (4)$$

У рівняння (4) входять дві матриці  $Y_{ekv}$  й  $\vec{I}_{ekv}$ , які характеризують еквівалентну схему заміщення АОН окремо за пасивними та активними елементами

$$Y_{ekv} = -Y_{ab} Y_{bb}^{-1} Y_{ba}; \quad (5)$$

$$\vec{I}_{ekv} = -Y_{ab} Y_{bb}^{-1} \vec{I}_b. \quad (6)$$

У зв'язку з тим, що ЕС має зв'язок з АОН тільки через чотири загальні вузли ("a-3", "a-2", "a-1" і "a") матриці  $Y_{ekv}$  й  $\vec{I}_{ekv}$  будуть мати наступні структури

$$Y_{ekv} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Y'_{ekv} \end{pmatrix}; \quad \vec{I}_{ekv} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{I}'_{ekv} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Ненульовими елементами цих матриць є підматриці  $Y'_{ekv}$   $[4 \times 4]$  і  $\vec{I}'_{ekv}$   $[4 \times 1]$ . Із цього випливає, що структура еквівалентної схеми заміщення АОН у випадку трифазної чотирьохпровідної мережі повинна мати чотири незалежні вузли й шість гілок з пасивними й активними елементами (рис. 4).

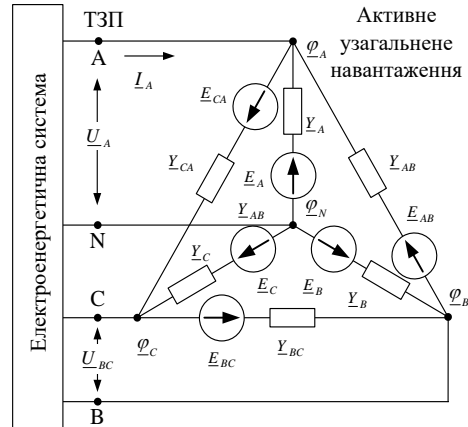


Рисунок 4 - Еквівалентна схема заміщення АОН

**Параметрична ідентифікація.** Розглянемо питання параметричної ідентифікації еквівалентної схеми заміщення АОН (рис. 4). Вихідними даними для розв'язку даного завдання є значення фазних і лінійних напруг, а також фазних струмів основної частоти, які вимірюються для кожного приєднання в ТЗП. Тривалість основного  $i$ -го інтервалу виміру становить 10 періодів основної частоти. У рамках цього інтервалу вважаємо, що стани ЕС і АОН відносно ТЗП є сталими й відмінними від попереднього ( $i-1$ ) і наступного ( $i+1$ ) інтервалів виміру. При цьому допускається одночасна зміна станів ЕС і АОН при переході від  $i$ -го до ( $i+1$ )-го інтервалів виміру. Інформація про факт і місце, де відбуваються зміни стану ЕС та АОН спостерігачеві невідома.

У трифазній чотирьохпровідній мережі для приєднань ТЗП як правило вимірюються три фазні напруги ( $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$  і  $\underline{U}_C$ ) і три фазні струми ( $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$  і

$I_C$ ). Ці дані з параметрами еквівалентної схеми заміщення пов'язані наступним матричним рівнянням:

$$I = \begin{bmatrix} U^Y & U^A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y^Y \\ Y^A \end{bmatrix} + J. \quad (8)$$

У виразі (8) матриця струмів  $I$ , і матриця напруг з підматрицями  $U^Y$  (фазних напруг) й  $U^A$  (лінійних напруг) визначаються струмами й напругами, які вимірюються, і є відомими величинами. Невідомими у цьому рівнянні є матриця вузлових провідностей з підматрицями  $Y^Y$  (провідності промінів зірки схеми заміщення) й  $Y^A$  (провідностей ребер трикутника схеми заміщення), а також матриця вузлових струмів  $J$ . Таким чином ми маємо матричне рівняння із двома невідомими. За таких умов воно не має розв'язку. Отже, визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення АОН (рис. ) за результатами вимірів струмів і напруг в ТЗП у рамках методики виміру ПЯЕ виконати неможливо. Вихідом з даної ситуації є визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення АОН шляхом еквівалентування її вихідної (повної) схеми заміщення за (5) і (6). Для цього необхідно знати конфігурацію АОН і каталожні дані усіх її елементів. Крім цього необхідно мати інформацію про модулі й фази ЕРС джерел активної енергії, синхронізовані з даними вимірів в ТЗП. Одержання цих даних є технічно складним завданням, тому її розв'язок без використання технологій і підходів Smart Grid [8],[9] виконати неможливо.

**Висновки.** У ході проведених досліджень визначена схема заміщення узагальнених навантажень з відновлювальними джерелами енергії для розв'язку завдання про оцінку впливу лінійних ДВ напруг на якість електричної енергії в ТЗП. Еквівалентна схема заміщення узагальненого навантаження з відновлювальними джерелами енергії визначається чотирма вузлами й шістьма гілками, що містять як пасивні, так і активні елементи. Визначення параметрів схеми заміщення за результатами виміру струмів і напруг в ТЗП у загальному випадку виконати неможливо. Для розв'язку завдання параметричної ідентифікації узагальненого навантаження з відновлювальними джерелами енергії необхідно використовувати матричний метод еквівалентування електричних кіл з орієнтацією на дані системи SmartGrid.

#### Список використаних джерел

1. Sayenko Yu. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages / Yu. Sayenko, D. Kalyuzhniy // Przegląd elektrotechniczny. – 2015. – Vol. 15. – P. 81–85.
2. Майер В. Я. Методика определения долевых вкладов потребителя и энергоснабжающей организации в ухудшении качества электроэнергии / В. Я. Майер, Зения. // Электричество. – 1994. – № 49. – С. 19–24.

3. Sun, Y.; Li, P.; Li, S.; Zhang, L. Contribution determination for multiple unbalanced sources at the point of common coupling. Energies 2017, 10, 171.

4. IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods.

5. Sayenko Yu. Assessment of Contributions of Disturbing Sources to Power Quality Level at a Point of Common Coupling / Yu. Sayenko, M. Sukhonos, D. Kalyuzhniy, V. Bolgov // Mathematical Model for Real-Time. 10th International Electric Power Quality and Supply Reliability Conference Tallinn, 29-31 August, 2016. pp. 29-35.

6. Саенко, Ю. Л. Идентификация линейной обобщенной нагрузки в трехфазной трехпроводной сети в задаче распределения фактических вкладов в точке общего присоединения / Ю. Л. Саенко, Д.Н. Калюжный // Электротехника и электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 65–69.

7. Саенко, Ю. Л. Идентификация линейной обобщенной нагрузки в задаче распределения фактических вкладов в искажения напряжений в трехфазных четырехпроводных сетях / Ю. Л. Саенко, Д.М. Калюжный, С.В. Свергуненко // Технічна електродинаміка. – № 2. – 2018. – С. 67–74.

8. S. D. Grigorescu, O. M. Ghita, C. Cepisca, A. S. Vintea. Power quality monitoring systems for smart grid networks. The 8 th international symposium on advanced topics in electrical engineering May 23-25, 2013 Bucharest, Romania.

9. Khadem, Md Shafiuazzaman K. Mr; Basu, Malabika; and Conlon, Michael F. (2012) "UPQC for Power Quality Improvement in DG Integrated Smart Grid Network – A Review," International Journal of Emerging Electric Power Systems: Vol. 13: Iss. 1, Article 3.

#### Аннотация

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБОБЩЕННОЙ НАГРУЗКИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Саенко Ю. Л., Калюжный Д. М., Свергуненко С. В.

*Предложена структура схемы замещения обобщенной нагрузки с возобновляемыми источниками энергии и рассмотрены пути определения ее параметров.*

#### Abstract

### IDENTIFICATION OF MIXED LOAD WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE TASK OF ASSESSMENT OF VOLTAGE DISTORTION AT THE POINT OF COMMON COUPLING

Yu. Sayenko, D. Kalyuzhniy, S. Svergunenko

*The structure of the equivalent load scheme with renewable energy sources is proposed and ways to determine its parameters are considered.*