УДК 621.31 DOI 10.33042/2522-1809-2021-1-161-157-162

**Д.М. Калюжний**

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна*

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ Й ОЦІНКА ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Несинусоїдальність напруги в системах електропостачання приводе до економічних збитків, які потрібно розподіляти та компенсувати. Це завдання вирішується на основі задачі ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення напруги. На сьогоднішній день існуючи методи ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги мають суттєві обмеження практичної реалізації. Це обумовлено їх базовою математичною моделлю та локальним підходом щодо виміру параметрів режиму роботи мережі. В наведеному досліджені представлено нову математичну модель ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдаоьності напруги, яка орієнтована на розподілену вимірювальну систему. Критерієм ідентифікації джерел спотворення напруги виступає спотворюючий вузловий струм. Для його адекватного визначення необхідно не тілки виконувати виміри параметрів режиму роботи мережі в базисних вузлах за струмами вищих гармонійних складових, але й контролювати структуру та параметри схеми заміщення всієї системи електропостачання. Для досягненя даної мети запропоновано використовувати розподілену вимірювальну систему, яка будується на основі систем векторних вимірювань та систем диспетчерського управління. Оцінка впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги прямо пропорційна спотворюючому вузловому струму, де коефіцієнтом пропорційності є або взаємний, або власний опір системи електропостачання, що зв'язує місце розташування джерела спотворення й місце для якого проводиться оцінка його впливу. З мето контролю впливу похибок виміру та визначення параметрів схем заміщення елементів системи електтропостачання методику та алгоритм ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдаоьності напруги доцільно розробляти виходячи з принципу виключення одного з джерел спотворення напруги.*

***Ключові слова:*** *якість електричної енергії, несинусоїдальність напруги; джерело спотворення напруги, ідентифікація; оцінка впливу, точка загального приєднання.*

## Постановка проблеми

Несинусоїдальність напруги відноситься до однієї із властивостей електричної енергії за якою визначається її якість [1]. Головними джерелами спотворення синусоїдальності напруги в системах електропостачання (СЕП) є вентильні перетворювачі, силове електроустаткування з тиристорним керуванням, перетворювачі частоти й інше нелінійне навантаження. Негативні наслідки передачі й споживання електроенергії неналежної якості проявляються в зниженні ефективності роботи встаткування, порушенні технологічного процесу, пошкодженні продукції, що приводять, в остаточному підсумку, до фінансових збитків [2]. Для світової економіки ці втрати обчислюються сотнями мільярдів доларів у рік [3]. Їхній розподіл і компенсація є актуальною проблемою, розв'язок якої ґрунтується на задачі ідентифікації й оцінки впливу джерел спотворення напруг у СЕП [4].

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існуючі методи ідентифікації й оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги у СЕП у своїх базових математичних моделях орієнтовані на використання схем заміщення Нортону або Тевеніна [5–6]. У комбінації з локальним підхід організації вимірів і одержання вихідних даних про параметри режиму роботи мережі в точці загального приєднання (ТЗП) це приводить до невизначеності розв'язку задачі яка розглядається, яке обумовлене перевищення кількості невідомих над кількістю незалежних рівнянь. Виключенням із цього можна вважати випадки, при яких у СЕП існує тільки одне джерело спотворення напруги, що в умовах експлуатації практично не зустрічається.

## Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка підходу ідентифікації й оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги, орієнтованого на розподілену вимірювальну систему.

## Виклад основного матеріалу

**Математична модель ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги.** При розробці математичної моделі ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги використовується частотна

© Калюжний Д.М. 

область, у рамках якої режим роботи електричної мережі (ЕМ) по окремим гармонійним складовим описується лінійними рівняннями. Джерела спотворення синусоїдальності напруги приймаються незалежними від прикладеної напруги й представляються у вигляді ідеальних джерел струму. При зазначених припущеннях параметри режиму роботи ЕМ по вищим гармонійним складовим можуть бути описані наступним рівнянням:

$$\vec{\mathbf{\Phi}}_v = \left(\mathbf{Y}_v^{неспотв}\right)^{-1} \cdot \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{J}}_v^{спотв_l}, \qquad (1)$$

де $v$ – порядковий номер вищої гармонійної складової; $\vec{\mathbf{\Phi}}_v$ – матриця-стовпець вузлових потенціалів; $\mathbf{Y}_v^{неспотв}$ – матриця вузлових провідностей, яка складена по неспотворюючим синусоїдальність напругу пасивним параметрам схеми заміщення СЕП; $\vec{\mathbf{J}}_v^{спотв_l}$ – матриця-стовпець вузлових струмів, яка сформована по спотворюючим активним елементам схеми заміщення $l$-го джерела спотворення СЕП; $N$ – загальна кількість джерел спотворення синусоїдальності напруги в СЕП.

Використовуючи принцип накладення можна розкласти спотворені потенціали вузлів СЕП на окремі складові, викликані дією кожного джерела спотворення, у такий спосіб:

$$\sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{\Phi}}_v^{спотв_l} = \left(\mathbf{Y}_v^{неспотв}\right)^{-1} \cdot \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{J}}_v^{спотв_l}. \qquad (2)$$

Для визначення спотворених напруг в зазначених ТЗП необхідно скористатися матрицею D, яка аналогічна $I$-й матриці інциденцій, але яка містить інформацію про різниці тільки потрібних потенціалів вузлів ЕМ:

$$\sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{U}}_v^{ТЗП_{спотв_l}} = \mathbf{D}^{\mathrm{T}} \cdot \left(\mathbf{Y}_v^{неспотв}\right)^{-1} \cdot \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{J}}_v^{спотв_l}. \qquad (3)$$

У просторі симетричних складових рівняння (3) буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{U}}_{v(n)}^{ТЗП_{спотв_l}} &= \mathbf{S}^c \mathbf{D}^{\mathrm{T}} \left(\mathbf{Y}_v^{неспотв}\right)^{-1} \mathbf{T}^c \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{J}}_{v(n)}^{спотв_l} \\ &= \mathbf{Z}_{сим_v}^{неспотв} \cdot \sum_{l=1}^{N} \vec{\mathbf{J}}_{(n)}^{спотв_l}, \end{aligned} \qquad (4)$$

де n = 0, 1 або 2 залежно від послідовності.

У вираженні (4) $\mathbf{S}^c$ і $\mathbf{T}^c$ являє собою блочно-діагональні матриці виду:

$$\mathbf{S}^c = \begin{pmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{S} & \dots & \mathbf{O} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{S} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}^c = \begin{pmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{T} & \dots & \mathbf{O} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{T} \end{pmatrix}, \qquad (5)$$

у яких S є матрицею Фортеск'ю:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix}, \qquad (6)$$

а матриця T, залежно від виду ЕМ, може приймати наступні два значення:

- для трифазної трьохпровідної ЕМ:

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}^{-1}; \qquad (7)$$

- для трифазної четирьохпровідної ЕМ:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 0 \\ 1 & a & a^2 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \qquad (8)$$

де $a = e^{j120}$.

Враховуючи, що оцінку несинусоїдальності напруги виконують по прямій послідовності, спотворена напруга в $p$-й ТЗП, яка викликана дією $l$-го джерела спотворення по $v$-й гармоніці, яке перебуває в $t$-й ТЗП, визначається наступним співвідношенням:

$$\underline{U}_{v(1)}^{ТЗП_{спотв_l}^{p,t}} = \underline{J}_{v(1)}^{ТЗП_{спотв_l}^{t}} \cdot \underline{Z}_{t,p_{v(1)}}^{ТЗП}, \qquad (9)$$

де $\underline{J}_{v(1)}^{ТЗП_{спотв_l}^{t}}$ – це спотворюючий вузловий струм прямої послідовності $l$-го джерела спотворення по $v$-й гармоніці, яке перебуває в $t$-й ТЗП; $\underline{Z}_{t,p_{v(1)}}^{ТЗП}$ – це або взаємний опір між $t$-ю і $p$-ю ТЗП у СЕП (t ≠ p), або власний опір $m$-ї ТЗП ($t = p = m$) по прямій послідовності та $v$-й гармоніці.

Враховуючи прямо пропорційну залежність між спотвореною напругою і спотворюючим вузловим струмом (9) представляється можливим запропонувати параметр $\underline{J}_{v(1)}^{ТЗП_{спотв_l}^{t}}$ використовувати як критерій ідентифікації джерел спотворення синусоїдальності напруги:

$$\underline{J}_{v(1)}^{ТЗП_{спотв_l}^{t}} \begin{cases} = 0 \; неспотворююче \; приєднання; \\ \neq 0 \; джерело \; спотворення \; напруги. \end{cases} \qquad (10)$$

Представлення джерел спотворення синусоїдальності напруги в схемах заміщення СЕП. З урахуванням прийнятого допущення про представлення джерел спотворення синусоїдальності напруги у вигляді ідеальних джерел струмів будемо вводити їх у схеми заміщення різних елементів СЕП паралельно з'єднаними з пасивними неспотворюючими елементами (рис. 1).

Для трифазного споживача електроенергії (СЕ), який представляє собою змішане навантаження,

схема заміщення щодо ТЗП буде мати вигляд, представлений на рис. 2 [7], де для випадку четирьохпровідної ЕМ використане еквівалентне представлення джерел струму у вигляді ЕРС.

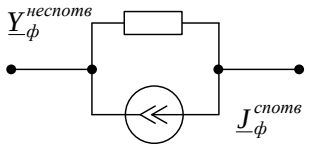


Рис. 1. Представлення в схемах заміщення джерел спотворення синусоїдальності напруги

**Параметрична ідентифікація схеми заміщення споживачів електроенергії.** Параметри схеми заміщення СЕ та вимірювані параметри режиму роботи мережі в ТЗП зв'язані наступним співвідношенням:

$$\vec{\mathbf{Y}}_{\text{CE}} = \mathbf{U}_{\text{CE}}^{-1} \cdot \mathbf{M}_{\text{CE}}^{\text{T}} \cdot \left(\vec{\mathbf{J}}_{\text{CE}} + \vec{\mathbf{I}}_{\text{CE}}\right). \qquad (11)$$

У вираженні (11) $\mathbf{U}_{\text{CE}}$ це матриця вимірюваних у ТЗП напруг; $\mathbf{M}_{\text{CE}}$ - І-а матриця інциденцій для схеми заміщення СЕ; $\vec{\mathbf{J}}_{\text{CE}}$ - матриця вузлових струмів, яка обумовлена активними елементами схеми заміщення СЕ; $\vec{\mathbf{I}}_{\text{CE}}$ - матриця вимірюваних струмів у ТЗП.

Аналіз вираження (11) показує, що воно містить дві невідомі величини $\vec{\mathbf{Y}}_{\text{CE}}$ й $\vec{\mathbf{J}}_{\text{CE}}$, які приводять до виродження розв'язку даного рівняння. Із цього витікає, що параметрична ідентифікація схеми заміщення СЕ й, відповідно, ідентифікація джерел спотворення синусоїдальності напруги за результатами локальних вимірів неможливі. Для розкриття даної невизначеності необхідно використовувати розподілений підхід організації вимірювальної системи з метою контролю внутрішньої структури СЕ. Ця задача може бути здійснена на основі концепції Smartgrid з використанням технологій векторних вимірів WAMS і систем диспетчерського керування SCADA [8].

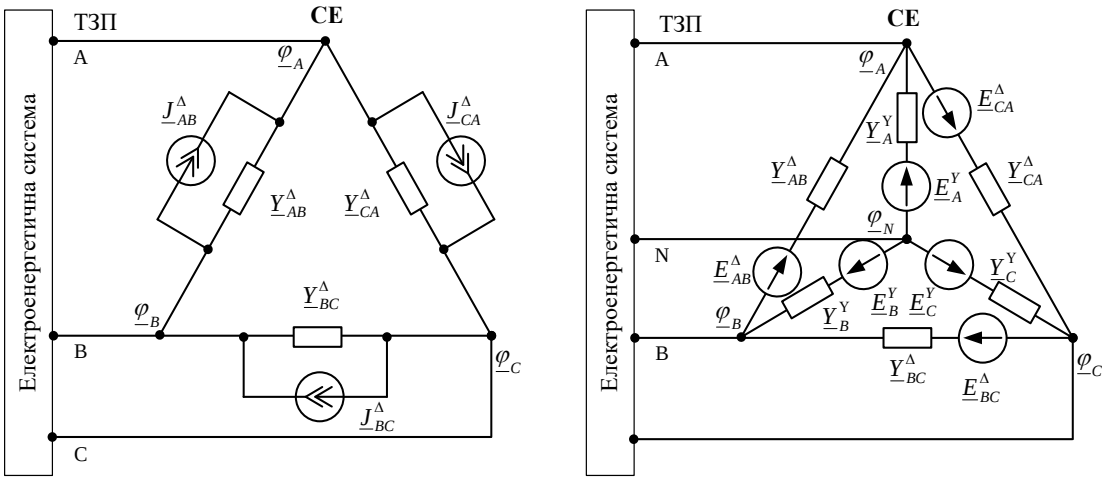


Рис. 2. Схема заміщення трифазного СЕ:
а) для трьохпровідної ЕМ; б) для чотирьохпровідної ЕМ

**Методика ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги.** Для реалізації розв'язку завдання ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги будемо використовувати розподілену вимірювальну систему, структурна схема якої наведена на рис. 3.

Розподілена вимірювальна система повинна виконувати виміри струмів і напруг у різних вузлах СЕП, а також контролювати її конфігурацію в реальному часі. Основним завданням SCADA системи є контроль конфігурації СЕП і зберігання каталожних даних її елементів. Призначення WAMS системи – виконання синхронізованих векторних вимірів струмів і напруг у ТЗП і базисних вузлах СЕП. Безпосередньо векторні виміри повинні проводитися пристроями PMU [9], які синхронізовані між собою за допомогою супутникових систем глобального позиціонування, таких як GPS; GLONAS; Galileo або Beidou [10].

Для розглянутої організації вимірювальної системи алгоритм методики рішення задачі ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги наведена на рис. 4. Його вихідними даними виступають:

- спектральний склад вимірюваних напруг у всіх ТЗП і базисних вузлах;
- спектральний склад вимірюваних струмів кожного приєднання всіх ТЗП і базисних вузлів;
- конфігурація СЕП і параметри схеми заміщення кожного з її елементів.

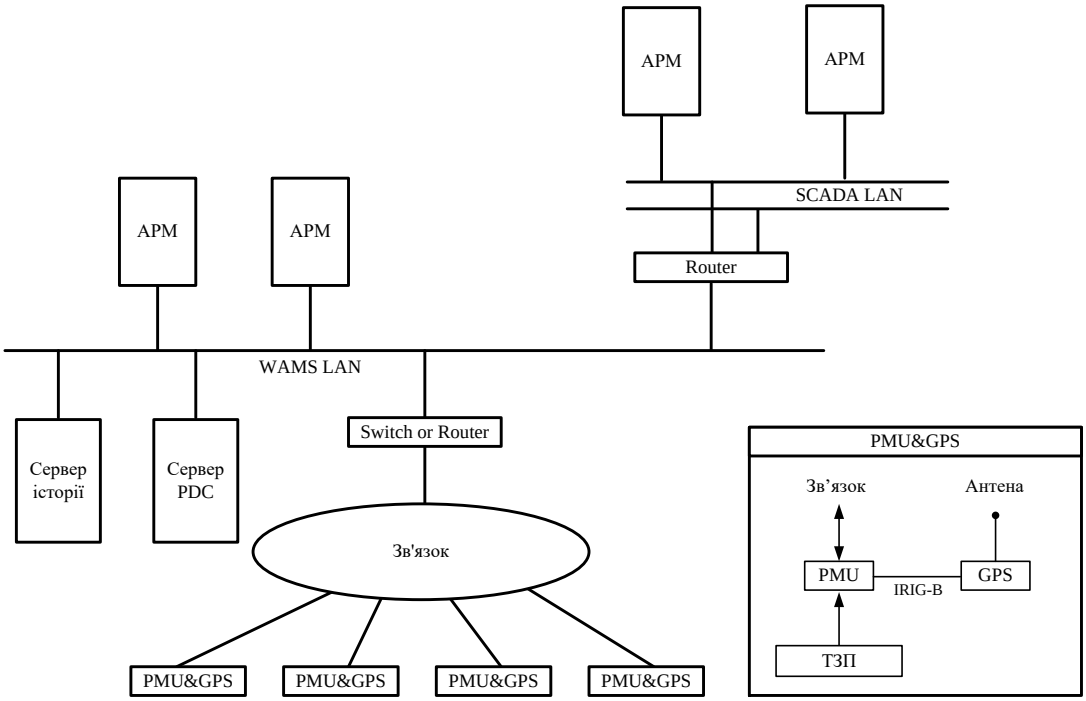


Рис. 3. Структура розподіленої вимірювальної системи

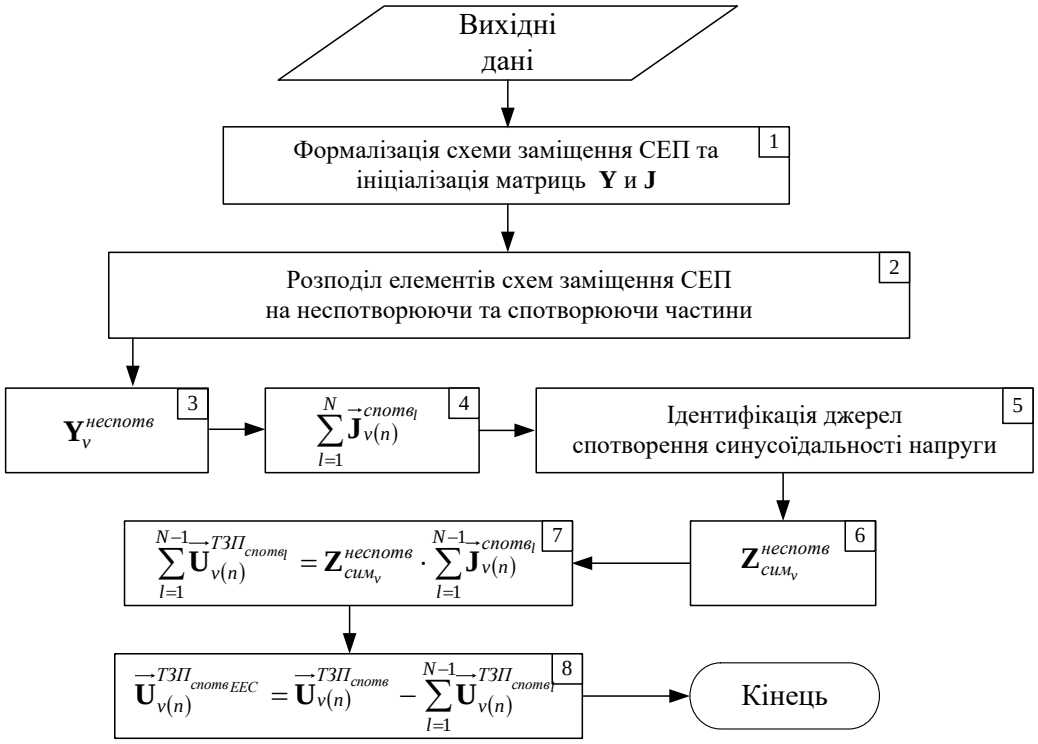


Рис. 4. Блок-схема алгоритму ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги

Враховуючи неминучу присутність похибок, викликаних або неточним завданням параметрів схем заміщення елементів СЕП, або інструментальною погрішністю вимірювальних засобів, алгоритм методики ідентифікації й оцінки впливу джерел спотворення напруг, доцільно будувати за принципом виключення для одного з них. У якості джерела спотворення напруг, який виключається, приймається електроенергетична система (ЕЕС).

В результаті алгоритм ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги можна представити у вигляді виконання наступних кроків.

1 крок. На основі стану СЕП у теперішній момент часу формалізується її схема заміщення в просторі фазних складових і ініціалізуються структури матриць вузлових провідностей і вузлових струмів.

2 крок. На основ даних про параметри схем заміщення окремих елементів СЕП й параметри

режиму роботи базисних вузлів проводиться розподіл усіх елементі схем заміщення СЕП на спотворюючі та неспотворюючі частини.

3 крок. На основі неспотворюючих частин схеми заміщення СЕП заповнюється відповідна матриця вузлових провідностей.

4 крок. Заповнюється фазна матриця спотворених вузлових струмів з наступним її переведенням у простір симетричних складових.

5 крок. Ідентифікуються джерела спотворення напруг по кожній *v*-й гармоніці.

6 крок. Визначається матриця неспотворюючих опорів СЕП в просторі симетричних складових.

7. На основі спотворюючих вузлових струмів та матриці неспотворюючих опорів визначаються часткові внески усіх джерел спотворення напруги.

8. Шляхом виключення визначається частковий внески ЕЕС.

## Висновки

Визначено критерій ідентифікації джерел спотворення синусоїдальності напруг, у якості якого виступає спотворюючий вузловий струм. Оцінка впливу джерел спотворення прямо пропорційна спотворюючому струму, де коефіцієнтом пропорційності є або взаємний, або власний опір СЕП, що зв'язує місце розташування джерела спотворення й місце для якого проводиться оцінка його впливу. Реалізація методики рішення задачі ідентифікації та оцінки впливу джерел спотворення синусоїдальності напруги можлива тільки при використанні розподіленої вимірювальної системи з використанням технологій векторних вимірів і систем диспетчерського керування. Для контролю впливу похибок виміру параметрів режиму роботи мережі й визначення параметрів схем заміщення СЕП доцільно алгоритм ідентифікації та оцінки впливу будувати на основі принципу виключення для одного із джерел спотворення напруги.

### Література


1. *ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160 2010, IDT). [Чинний від 2014-10-01]. К.: Мінекономрозвитку України, 2014. – 27 с.*
2. *Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66–69.*
3. *Baggini, A. Handbook of Power Quality // A Baggin. – West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2008. – 642 p.*
4. *Spelko A. CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of Common Methods for Assessment of Harmonic Contribution from Customer Installation / A. Spelko, B. Blazic, I. Papic, M. Pourarab, J. Meyer, X. Xu, S. Djokic // IEEE Manchester PowerTech 18-22 June 2017. – Manchester, 2017. – P. 1-6.*
5. *Supriya, P. Review of Harmonic Source Identification Techniques / P. Supriya, T. N. P. Nambiar // Int. Rev. Electr. Eng. – 2012. – Vol. 7( № 3). – P. 4525–4531.*
6. *Bazina, M. Comparison of Various Methods for Determining Direction of Harmonic Distortion by Measuring in Point of Common Coupling / M. Bazina, T. Tomiša // IEEE Int. Energy Conf 13-16 May 2014. – Cavtat, Croatia, 2014. – P. 392–399.*
7. *Калюжний, Д.М. Ідентифікація параметрів схем заміщення приєднань електричних мереж в задачі розподілу їх фактичних внесків / Д.М. Калюжний // Світлотехніка та електроенергетика. – 2020. – Вип. 1 (№ 57). С. 33–38.*
8. *Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.*
9. *Phadke, A.G.; Bi, T. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems / A.G. Phadk, T. Bi // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2018 – Vol. 6, Iss. 4, .2018. – P. 619–629.*
10. *Справочник. Спутниковая передача и распространение сигналов времени и частоты. ITU, 2010. – 242 с.*


### References


1. DSTU EN 50160:2014. Harakteristiki naprugi elektropostachannya v elektrichnih merezhah zagalnoYi priznachenostI (EN 50160 2010, IDT). *MInekonomrozvitku UkraYini, 2014. 27 s.*
2. D. Chepmen. (2008). Tsena nizkogo kachestva elektroenergii. *Energosberezhenie*, 1. 66–69.
3. *Baggini, A. Handbook of Power Quality // A Baggin. – West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2008. – 642 p.*
4. A. Spelko, B. Blazic, I. Papic, M. Pourarab, J. Meyer, X. Xu, S. Djokic. (2017). CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of Common Methods for Assessment of Harmonic Contribution from Customer Installation. *IEEE Manchester PowerTech 18-22 June 2017*. 1-6.
5. P. Supriya, T. N. P. Nambiar. (2012). Review of Harmonic Source Identification Techniques. *Int. Rev. Electr. Eng. 7(3). 4525–4531.*
6. M. Bazina, T. Tomiša. (2014). Comparison of Various Methods for Determining Direction of Harmonic Distortion by Measuring in Point of Common Coupling. *IEEE Int. Energy Conf 13-16 May 2014.* 392–399.
7. D.M. Kalyuzhniy. (2020). IdentifIkatsIya parametrIv shem zamIschennya priEdnan elektrichnih merezh v zadachI rozpodIlu Yih faktichnih vneskIv. *SvItlotehnIka ta elektroenergetika*. 1(57). 33–38.
8. B.B. Kobets, I.O. Volkova. (2010). Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid. *IATs Energiya*. 208 s.
9. A.G. Phadk, T. Bi. (2018). Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 6(4). 619–629.
10. Spravochnik. Sputnikovaya peredacha i rasprostranenie signalov vremeni i chastotyi. *ITU*, 2010. 242 s.


**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Ф. Харченко, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

**Автор:** КАЛЮЖНИЙ Дмитро Миколайович
*кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова*
*E-mail – Dmitro.Kalyuzhniy@kname.edu.ua*
*ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7374-073*

**IDENTIFICATION AND EVALUATION OF HARMONIC VOLTAGE SOURCES IN POWER SUPPLY SYSTEMS**

D. Kalyuzhniy
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*Non-sinusoidal voltage in power supply systems leads to economic losses that need to be distributed and compensated. This problem is solved on the basis of the problem of identification and evaluation of the influence of voltage distortion sources. To date, existing methods for identifying and assessing the impact of harmonic voltage sources have significant limitations of practical implementation. This is due to their basic mathematical model and local approach to measuring the parameters of the network. In the given research the new mathematical model of identification and an estimation of harmonic voltage sources that is focused on the distributed measuring system is presented. The criterion for identifying harmonic voltage sources is the distorting nodal current. To adequately determine it, it is necessary not only to measure the parameters of the network mode in the base nodes by the currents of the higher harmonic components, but also to control the structure and parameters of the replacement circuit of the entire power supply system. To achieve this goal, it is proposed to use a distributed measuring system, which is based on vector measurement systems and control systems. The estimation of the influence of harmonic voltage sources is directly proportional to the distorting nodal current, where the coefficient of proportionality is either mutual or intrinsic resistance of power supply systems, that connects the location of the distortion source and the place for which its influence is estimated. In order to control the influence of measurement errors and determine the parameters of circuits for replacing elements of the power supply system, the method and algorithm for identifying and assessing the impact of harmonic voltage sources should be developed based on the principle of excluding one of the voltage distortion sources.*

***Keywords:*** *power quality, non-sinusoidal voltage; voltage distortion source, identification; influence assessment, point of common coupling*.