

Ю. Л. Саєнко<sup>1</sup>  
Д. М. Калюжний<sup>2</sup>

## ЗАГАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ У СПОТВОРЕННЯ СИМЕТРИЇ Й ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ У ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

<sup>1</sup>Приазовський державний технічний університет;

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

Запропоновано загальну математичну модель розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у несиметрію й відхилення напруги у точці загального приєднання. Модель розроблена у просторі фазних складових з урахуванням розподіленого характеру джерел спотворення в системі електропостачання. Пошук розподілу фактичних внесків у вигляді суми, кожний доданок якої визначається дією окремого джерела спотворень, привів до двох розв'язань цієї задачі. Перше з них відображає принцип суперпозиції, а друге — виключення. З практичної точки зору обидва розв'язання виявилися практично еквівалентними і такими, що потребують побудови розподіленої у просторі й синхронізованої у часі вимірювальної системи.

**Ключові слова:** фактичний внесок, якість електричної енергії, точка загального приєднання.

### Вступ

Передача й споживання електричної енергії (ЕЕ) зниженої якості [1] спричиняє додаткові економічні збитки як у постачальників, так і споживачів ЕЕ [2]. Найвагоміша складова цих збитків визначається фінансовими втратами через пошкодження вартісного устаткування, розладу технологічного процесу і врешті — браком продукції. Так, за даними [3] економічні втрати споживачів за разове порушення норм якості ЕЕ (ЯЕ) можуть досягати 3 800 000 євро. У державному масштабі для розвинених країн вони становлять 10...20 млрд дол. США на рік [2]. При цьому питання розподілу фінансової компенсації економічних збитків вирішується на основі визначення фактичних внесків (ФВ) усіх суб'єктів ринку ЕЕ у зниження ЯЕ в точці загального приєднання (ТЗП).

Існуючі на сьогодні методи визначення ФВ суб'єктів ринку ЕЕ у зниження ЯЕ в ТЗП поділяються на чотири групи (табл. 1) [4—6]. У рамках лінійних спотворень напруги усі методи визначення ФВ, за винятком методу «включення/відключення» споживача, ґрунтуються на математичних моделях, розроблених у просторі симетричних складових. Використання цього прийому в комбінації з локальним підходом вимірювання показників ЯЕ (тільки в одній ТЗП) приводять до невизначеності в завданні структури й визначенні параметрів схем заміщення несиметричного змішаного навантаження й еквівалентної електроенергетичної системи (ЕЕС). Крім цього, невизначеним залишається врахування взаємного впливу різних джерел спотворення (DS — *disturbing source*). Як наслідок, використання розроблених на сьогоднішній день методів визначення ФВ обмежується випадками ТЗП з одним явно вираженим і домінуючим DS.

Таблиця 1

Класифікація методів визначення фактичних внесків

Група	Величина, що використовується для визначення ФВ	Вчені, що займалися розробками методів визначення ФВ
I	Показник ЯЕ	Ю. С. Железко, Е. De Jaeger, Н. Renner
II	Потужності спотворення	Ф. А. Зикін, С. С. Смирнов, Л. І. Коверникова, Т. Tanaka, Н. Akagi, Н. Schau, А. Novitskiy, Т. Е. Seiphetlho, А. Р. J. Rens, М. Aiello, А. Cataliotti
III	Напруга спотворення	В. Я. Майер, С. І. Гамазін, В. Н. Тульський, Г. А. Сендерович, Y. H. Geng, W. Xu, Y. Liu, M. Farhoodnea, S. Perera, V. J. Gosbell, B. Sneddon
IV	Провідність спотворення	Г. А. Сендерович, О. Г. Гриб, П. Г. Щербакова

Враховуючи основні недоліки математичних моделей існуючих методів визначення ФВ, ставиться така *мета досліджень*: розробити математичну модель розподілу ФВ лінійних DS у спотворення напруги в ТЗП у просторі фазних складових з урахуванням розподіленого характеру DS в системі електропостачання (СЕП).

### Результати дослідження

У рамках цього дослідження під лінійним DS будемо розуміти будь-який елемент СЕП або його складову частину, яка спричиняє несиметрію й відхилення напруги без зміни синусоїдальної форми кривої напруги. До основних DS симетрії напруги віднесемо: несиметричне навантаження споживачів ЕЕ й несиметричну напругу джерела живлення (ДЖ) СЕП. До основних DS, що зумовлюють відхилення напруги, віднесемо: частину електричного навантаження споживачів ЕЕ, яка перевищує проектну або договірну величину; електричну мережу (ЕМ) у цілому або окремі її елементи, у тому випадку, якщо їх пропускна здатність не відповідає потужності що передається; ДЖ СЕП за незадовільного рівня регулювання напруги на ньому. Припускаючи, що усі DS відомі, визначимо спосіб їх представлення в загальній схемі заміщення СЕП. Умовимося схему заміщення поздовжнього пасивного елемента (лінії електропередачі або силового трансформатора), за наявності в ньому DS, представляти у вигляді послідовного з'єднання двох опорів (рис. 1а), а схему заміщення поперечного пасивного елемента (провідності лінії електропередачі, силового трансформатора або споживачів ЕЕ), за наявності в ньому DS — у вигляді паралельного з'єднання двох провідностей (рис. 1б). При цьому  $\underline{Z}_{ph_i}^{nondis}$  та  $\underline{Y}_{ph_i}^{nondis}$  відповідають фазним (*phase*) частинам схем заміщення елементів СЕП та споживачів ЕЕ, які не спотворюють (*nondisturbing*) напругу,  $\underline{Z}_{ph_i}^{dis}$  та  $\underline{Y}_{ph_i}^{dis}$  — частинам, що спотворюють (*disturbing*) напругу. Схему заміщення поздовжнього активно-го елемента СЕП (ДЖ) за наявності в ньому DS подамо так, як це показано на рис. 1в, де  $\underline{E}_{ph_i}^{nondis}$  та  $\underline{E}_{ph_i}^{dis}$  — ЕРС, які відповідають частинам, що не спотворюють та спотворюють напругу.

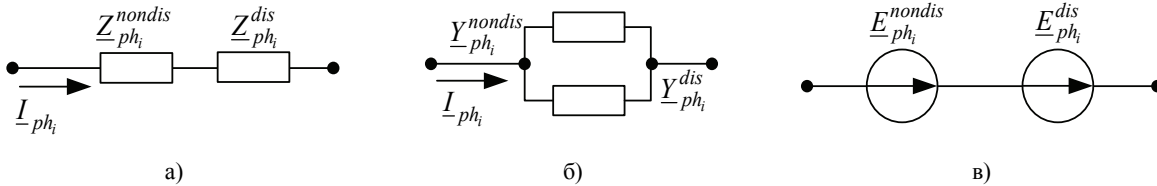


Рис. 1. Схеми заміщення електричних кіл з виділеними частинами, що не спотворюють та спотворюють напругу

Незалежно від способу визначення частин лінійних DS, що спотворюють та не спотворюють напругу, за базову математичну модель СЕП візьмемо рівняння вузлових потенціалів

$$\vec{\Phi} = \left( \mathbf{Y}_{nondis} + \sum_{i=1}^n \mathbf{Y}_{dis}^{DS_i} \right)^{-1} \cdot \left( \vec{\mathbf{I}}_{nondis} + \sum_{l=1}^m \vec{\mathbf{I}}_{dis}^{DS_l} \right), \quad (1)$$

де  $\mathbf{Y}_{nondis}$  та  $\mathbf{Y}_{dis}^{DS}$  — матриці взаємних та вузлових провідностей, які визначаються за пасивними елементами схеми заміщення СЕП, що не спотворюють та спотворюють напругу;  $\vec{\mathbf{I}}_{nondis}$  та  $\vec{\mathbf{I}}_{dis}^{DS_l}$  — вектори вузлових струмів, які визначаються за активними елементами схеми заміщення СЕП, що не спотворюють та спотворюють напругу;  $n$  та  $m$  — кількість DS в СЕП, які визначені в схемі заміщення СЕП пасивними та активними елементами.

Наявність доданку  $\sum_{i=1}^n \mathbf{Y}_{dis}^{DS_i}$  у складі зворотної матриці рівняння (1) не дозволяє математично коректно у векторі  $\vec{\Phi}$  виділити вектори спотворених потенціалів  $\vec{\Phi}_{dis}^{DS_j}$ , кожний з яких залежить від впливу окремого DS. Застосуємо принцип компенсації до пасивних елементів схеми заміщення СЕП, які спотворюють напругу. Як наслідок, отримаємо розподіл ФВ у вигляді суми, кожний доданок якого визначається дією окремого DS

$$\sum_{j=1}^{n+m} \overline{\Phi}_{dis}^{DS_j} = \mathbf{Y}_{nondis}^{-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^n \overline{\mathbf{J}}_{dis}^{DS_i} + \sum_{l=1}^m \overline{\mathbf{I}}_{dis}^{DS_l} \right), \quad (2)$$

де  $\overline{\mathbf{J}}_{dis}^{DS_i}$  — вектор вузлових струмів, отриманий після застосування принципу компенсації до пасивних частин схеми заміщення  $i$ -DS, що спотворюють напругу.

В результаті отриманий розподіл ФВ (2) відображає загальновідомий принцип суперпозиції і є наближеним.

Розглянемо інший підхід визначення ФВ, оснований на принципі математичного виключення. Його суть полягає у визначенні різниці між спотвореними потенціалами з усіма DS  $\overline{\Phi}_{dis}$  та потенціалами  $\overline{\Phi}_{dis}^{excluded DS_j}$  з виключеною частиною схеми заміщення  $j$ -го DS, що спотворює напругу

$$\overline{\Phi}_{dis}^{DS_j} = \overline{\Phi}_{dis} - \overline{\Phi}_{dis}^{excluded DS_j}. \quad (3)$$

Зазначимо, що визначення ФВ за (3) відповідає підходу «включення/відключення» споживача, але тільки тій його частині, що спотворює напругу.

Для переходу від вузлових потенціалів (2) і (3) до спотворених напруг, які підлягають розподілу між усіма DS, скористаємося транспонованою матрицею інцидентів  $\mathbf{A}^T$

$$\sum_{j=1}^{n+m} \overline{\mathbf{U}}_{dis_j} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{Y}_{nondis}^{-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^n \overline{\mathbf{J}}_{dis}^{DS_i} + \sum_{l=1}^m \overline{\mathbf{I}}_{dis}^{DS_l} \right); \quad (4)$$

$$\overline{\mathbf{U}}_{dis}^{DS_j} = \mathbf{A}^T \cdot \left( \overline{\Phi}_{dis} - \overline{\Phi}_{dis}^{excluded DS_j} \right). \quad (5)$$

Таким чином (4) і (5) є двома матмоделями, на основі яких доцільна розробка методів і засобів визначення ФВ лінійних DS у спотворення напруг у ТЗП. Для перевірки адекватності й порівняння отриманих матмоделей проведено їхній аналіз на основі імітаційного моделювання сталих режимів роботи СЕП (рис. 2). При цьому вважалося, що для визначення ФВ доступна інформація про параметри режиму роботи ЕМ в точках 1...6. З практичної точки зору це вимагає наявності розподіленої у просторі та синхронізованої у часі виміральної системи.

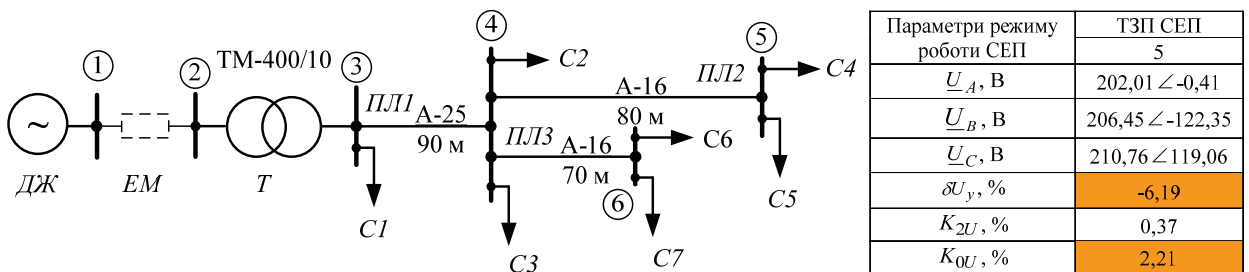


Рис. 2. Тестова СЕП з сімома споживачами ЕЕ

Графічне зображення розподілу ФВ за несиметрією та відхиленням напруг для ТЗП № 5, у якій показники ЯЕ не відповідають нормально допустимим значенням, показано на рис. 3а та рис. 3б, відповідно. Чисельні значення цих ФВ наведені в табл. 2.

Зазначимо, що отриманий розподіл ФВ, який є векторною (двовірною) величиною, у такому вигляді не може бути використаний для розподілу фінансових компенсацій (ФК) економічних збитків і тому необхідним є розробка відповідного одномірного критерію. На основі скалярного добутку векторів пропонується такий одномірний критерій розподілу ФК:

$$\alpha_j = \underline{U}_{dis}^{FB DS_j} \bullet \underline{U}_{dis}^{TЗП}; \quad \Phi K_{DS_j} = \left[ \frac{|\alpha_j|}{\sum_{j=1}^{n+m} |\alpha_j|} \right] \cdot 100 \%. \quad (6)$$

В результаті неточного визначення частин окремих DS, що спотворюють напругу, можлива нев'язка ФВ ( $\underline{U}_{\delta U_y}^{\Delta}$  на рис. 3б) між усіма DS. Для її усунення досить згрупувати невідомі або

неточно визначені DS, що належать одному суб'єктові ринку ЕЕ, наприклад СЕП, і визначити їхній сумарний ФВ шляхом виключення із загального вектора спотворення напруг у ТЗП.

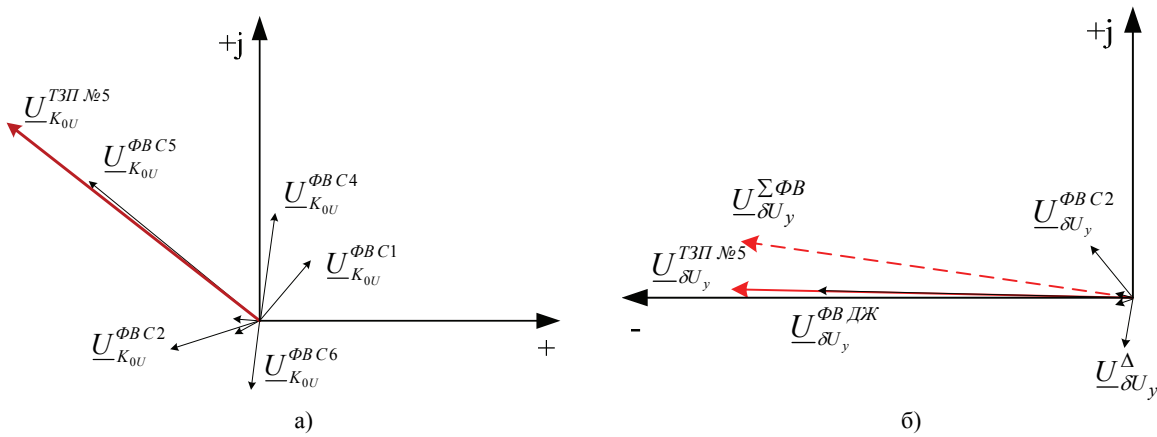


Рис. 3. Графічне зображення розподілу ФВ

Таблиця 2

Чисельні значення розподілу ФВ

Джерело спотворень напруги	ФВ у спотворення напруги, В		ФК у спотворення напруги, %	
	нульової послідовності	стале відхилення	нульової послідовності	стале відхилення
ЕМ	$4,9 \cdot 10^{-7} \cdot e^{j2,68}$	$2,051 \cdot e^{j178,68}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	80,64
С1	$1,125 \cdot e^{j49,42}$	$0,12 \cdot e^{j166,26}$	1,0	4,46
С2	$1,336 \cdot e^{-j162,52}$	$0,423 \cdot e^{j129,12}$	13,43	10,56
С3	$0,363 \cdot e^{j175,32}$	0	5,36	0
С4	$1,522 \cdot e^{j82,07}$	$0,122 \cdot e^{-j161,52}$	13,31	4,34
С5	$3,138 \cdot e^{j141,12}$	0	55,24	0
С6	$0,982 \cdot e^{-j97,23}$	0	8,77	0
С7	$0,402 \cdot e^{-j151,89}$	0	2,9	0

Такий підхід означає, що ФК оцінюється за проєкціями  $U_{dis}^{ФВ DS_j}$  на сумарний вектор спотворення напруги у ТЗП  $U_{dis}^{ТЗП}$ . Для розглянутого випадку чисельний розподіл ФК згідно з (6) наведено в табл. 2. Також відмітимо, якщо не використовувати абсолютне значення  $\alpha_j$  в чисельнику рівняння (6), то можна додатково врахувати ефект компенсації частин напруг спотворення, які вносяться окремими DS. У розглянутому випадку цей ефект найнаочніше демонструють вектори  $U_{K0U}^{ФВ C4}$  й  $U_{K0U}^{ФВ C6}$  (рис. 3а), які відповідають фактичному внеску у спотворення напруг у ТЗП № 5 соживачів ЕЕ С4 та С6.

Зазначимо, що відносне середньоквадратичне відхилення результатів розрахунків за математичними моделями (4) і (5) не перевищило 0,1%. Це дозволило зробити висновок про їхню практичну еквівалентність. З точки зору практичної реалізації обидві математичні моделі рівноправні й вимагають побудови розподіленої у просторі та синхронізованої у часі виміральної системи. З погляду фізичного змісту математична модель (6) прийнятніша, тому що відображає загальновідомий принцип суперпозиції.

### Висновки

Отримано дві узагальнені математичні моделі розподілу ФВ лінійних DS у спотворення напруги у ТЗП, які відображають принцип суперпозиції та виключення. Їхніми характерними особливостями є використання простору фазних складових та врахування розподіленого характеру DS напруги в СЕП. Для практичної реалізації обох матмоделей потрібна побудова

розподіленої у просторі та синхронізованої у часі вимірювальної системи. Результати математичного моделювання розподілу ФВ за цими двома моделями дозволили зробити висновок про їх практичну еквівалентність.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах / [В. Г. Кузнецов, О. Г. Шполянський, Н. А. Яремчук] // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 3. — С. 46—52.
2. Electromagnetic compatibility in electric power supply systems / [I. V. Zhezhelanko, A. K. Shidlovskiy, G. G. Pivnyak, Yu. L. Sayenko]. — 2nd edition. — D. : National Mining University, 2013. — 239 p.
3. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. — 2004. — № 1. — С. 66—69.
4. 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. Kalyuzhnyi // Przegląd elektrotechniczny. — 2015. — Vol. 15. — P. 81—85.
5. CIGRE report 468, "Review of Disturbance Emission Assessment Techniques" / CIGRE/CIREC working group. — 2011. — С. 4—109. — ISBN: 978-2-85873-158-9.
6. Сендерович Г. А. Определение действительного вклада потребителя в создание несимметрии на сборных шинах / Г. А. Сендерович // Вісник Національного технічного університету «Харківський Політехнічний інститут». — 2004. — № 47. — С. 136—139.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.12.2017

**Сайенко Юрій Леонідович** — д-р техн. наук, професор, декан енергетичного факультету, e-mail: yls62@i.ua .

Приазовський державний технічний університет, Маріуполь;

**Калюжний Дмитро Миколайович** — канд техн. наук, доцент, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, e-mail: KalyuzhnyiDN@gmail.com .

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків

**Yu. L. Saienko<sup>1</sup>**  
**D. M. Kaliuzhnyi<sup>2</sup>**

## The Generalized Mathematical Model of Factual Contribution Distribution in Voltage Symmetry Distortion and Voltage Deviation at the Point of Common Coupling

<sup>1</sup>Pryazovskyi State Technical University;

<sup>2</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

*There has been introduced the generalized mathematical model of factual contribution distribution of linear sources of distortion in the voltage unbalance and the voltage deviation at the point of common coupling developed in the phase component space with account for distributed nature of sources of distortion in the power supply system. The search for the factual contribution distribution as the sum of each term is determined by the action of a single distortion source, leads to two solutions, reflecting the principle of superposition and exclusion. From a practical point of view both solutions turned out to be equivalent and require the construction of a distributed in space and time-synchronized measurement system.*

**Keywords:** factual contribution, power quality, point of common coupling.

**Saienko Yuri L.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Dean of the Department of Power Engineering, e-mail: yls62@i.ua ;

**Kaliuzhnyi Dmytro M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Chair of Urban Power Supply and Electricity, e-mail: KalyuzhnyiDN@gmail.com

Ю. Л. Саенко<sup>1</sup>  
Д. Н. Калюжный<sup>2</sup>

## Обобщенная математическая модель распределения фактических вкладов в искажение симметрии и отклонение напряжений в точке общего присоединения

<sup>1</sup>Приазовский государственный технический университет;

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова

*Предложена обобщенная матмодель распределения фактических вкладов линейных источников искажений в несимметрию и отклонение напряжений в точке общего присоединения, разработанная в пространстве фазных составляющих с учетом распределенного характера источников искажения в системе электроснабжения. Поиск распределения фактических вкладов в виде суммы, каждое слагаемое которой определяется действием отдельного источника искажений, привел к двум решениям, отображающим принцип наложения и исключения. С практической точки зрения оба решения оказались эквивалентными и требующими построения распределенной в пространстве и синхронизированной во времени измерительной системы.*

**Ключевые слова:** фактический вклад, качество электрической энергии, точка общего присоединения.

**Саенко Юрий Леонидович** — д-р техн. наук, профессор, декан энергетического факультета, e-mail: yls62@i.ua ;

**Калюжный Дмитрий Николаевич** — канд техн. наук, доцент, заведующий кафедрой систем электроснабжения и электропотребления городов, e-mail: KalyuzhniyDN@gmail.com