

Ю. Л. САЕНКО (ДНУЖТ) Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ (ХНУГХ ИМ. А. Н. БЕКЕТОВА)

Приазовский государственный технический университет, кафедра электрификации промышленных предприятий, Украина, 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629)-44-65-51, эл. почта: [yurisa-yenko@mail.ru](mailto:yurisa-yenko@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700)

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, кафедра систем электроснабжения и электропотребления городов, Украина, 61002, г. Харьков, ул. Революции, 12, тел.: 050-560-68-35, эл. почта: [KalyuzhnyyDN@mail.ru](mailto:KalyuzhnyyDN@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-7374-0734](http://orcid.org/0000-0002-7374-0734)

## ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ ЛИНЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

### Постановка проблемы

Искажения напряжений в системах электро-снабжения (СЭС), выраженные через соответствующие коэффициенты, определяют качество эклектической энергии (КЭ) [1, 2]. В электрических сетях (ЭС) СЭС низкого и среднего напряжения КЭ в большинстве случаев не соответствует нормированным значениям [3]. В первую очередь это касается несимметрии и отклонения напряжений, возникающих в основном вследствие действия линейных источников искажений (ИИ).

Потребление и передача электрической энергии (ЭЭ) пониженного качества является причиной многих негативных последствий [4], которые в конечном счете приводят к экономическим убыткам потребителей и поставщиков ЭЭ. По данным, опубликованным в [5], финансовые потери от пониженного КЭ для различных секторов экономики могут находиться в пределах от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов евро за одно событие.

Очевидно, что при возникновении вопроса компенсации экономических убытков потерпевшей стороне следует решить задачу о фактическом вкладе (ФВ) каждого ИИ в искажение напряжений в точке общего присоединения (ТОП).

### Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день насчитывается достаточно большое количество методов определения ФВ в понижение КЭ [6, 7]. Основная часть из них разработана в пространстве симметричных составляющих [8] и базируется на использовании соответствующих параметров режима работы и схем замещения элементов СЭС. Именно этот прием является главной причиной недостатков существующих методов определе-

ния ФВ, которые заключаются в следующем: не учитывается взаимное влияние ИИ друг на друга; определение схем замещения ИП и обобщенной нагрузки по обратной и нулевой последовательностям вызывают затруднения как методологического, так и технического характера. Поэтому практическое использование разработанных методов ограничивается случаями ТОП с одним явно выраженным доминирующим ИИ.

### Цель статьи

Разработать математическую модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в СЭС в пространстве фазных составляющих с учетом их распределенного характера.

### Основные материалы исследования

В рамках данного исследования под линейным ИИ будем понимать любой элемент СЭС или его составную часть, который вызывает в ней такие изменения напряжений, которые приводят к несимметрии и отклонению напряжений без искажения их синусоидальной формы. Основными ИИ по несимметрии напряжений будем считать несимметричную нагрузку потребителей ЭЭ и несимметричное напряжение источника питания (ИП) СЭС. К основным ИИ по отклонению напряжения отнесем: часть электрической нагрузки потребителей ЭЭ, которая превышает проектную или договорную величину; ЭС, в том случае если ее пропускная способность не соответствует передаваемой мощности; ИП СЭС при неудовлетворительном уровне регулирования напряжения в ЭС.

Рассмотрим СЭС (рис.1), питающую двух потребителей ЭЭ (П1 и П2), которая состоит из ИП, обобщенной ЭС, линии электропередачи (ЛЭП) и силового трансформатора (Т). Режим работы СЭС считаем установившимся.



Рис. 1. Система электроснабжения

При составлении схемы замещения СЭС все ИИ выделим отдельными элементами. Условимся схему замещения продольного пассивного элемента (ЛЭП, Т или ЭС) при наличии в нем ИИ представлять в виде последовательного соединения двух элементов (рис. 2, а). Схему замещения поперечного пассивного элемента (проводимости ЛЭП или силового трансформатора, а также потребителей ЭЭ) при наличии в нем ИИ – в виде параллельного соединения двух проводимостей (рис. 2, б). При этом  $Z_{\phi i}^{неиск}$  и  $Y_{\phi i}^{неиск}$  будут соответствовать фазным неискажающим частям элементов СЭС и потребителей ЭЭ, а  $Z_{\phi i}^{иск}$  и  $Y_{\phi i}^{иск}$  – их искажающим частям.

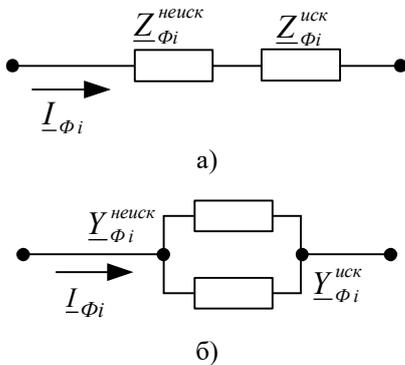


Рис. 2. Схемы замещения пассивных элементов СЭС и потребителей ЭЭ:  
а) продольного; б) поперечного

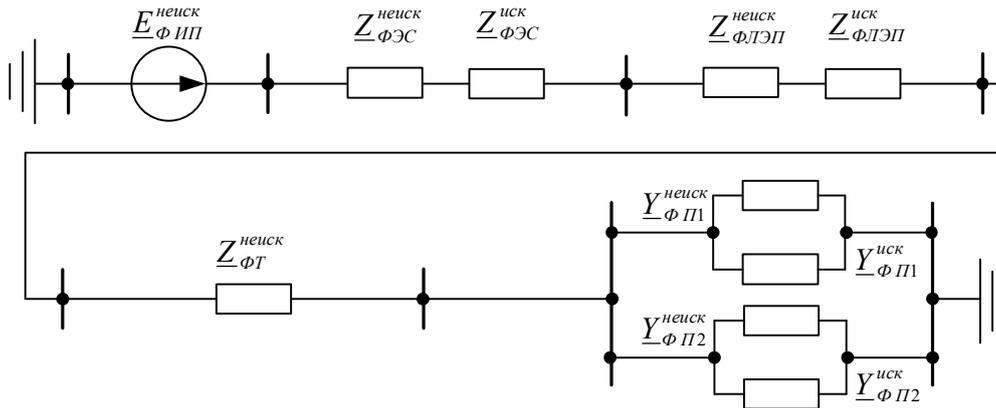


Рис. 4. Схема замещения СЭС двух потребителей ЭЭ

С учетом выделенных в схеме замещения СЭС ее неискажающих и искажающих частей выражение (1) запишем в следующем виде:

$$(Y_{неиск} + Y_{иск}) \times (\Phi_{неиск} + \Phi_{иск}) = I_{неиск} \quad (2)$$

Схему замещения продольного активного элемента СЭС (ИП) при наличии в нем ИИ будем представлять в виде, изображенном на рис. 3, где  $E_{\phi i}^{неиск}$  и  $E_{\phi i}^{иск}$  – ЭДС соответствующие фазной неискажающей и искажающей частям.

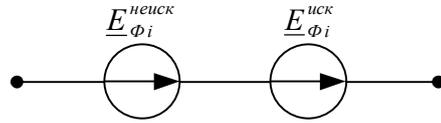


Рис. 3. Схема замещения активного элемента СЭС

Предположим, что ИИ находятся в ЭС, ЛЭП и у потребителей ЭЭ, а максимальное напряжение СЭС  $U_{ном} \leq 35$  кВ. Тогда схема замещения СЭС (рис. 1), составленная для одной фазы, будет иметь вид, изображенный на рис. 4. Отметим, что способ представления элементов СЭС и потребителей ЭЭ для решения конкретного вида задачи может отличаться от условно принятого, но будет находиться в рамках последовательного или параллельного соединения пассивных элементов.

Согласно методу узловых потенциалов [8], математическая модель трехфазной СЭС питающая потребителей ЭЭ (рис. 1), схема замещения которой приведена на рис. 4, будет иметь вид:

$$Y \times \Phi = I \quad (1)$$

где  $Y$  – квадратная матрица узловых проводимостей;  $I$  – матрица-столбец узловых токов;  $\Phi$  – матрица-столбец неизвестных узловых потенциалов.

где  $Y$  и  $\Phi$  записаны в виде суммы аналогичных матриц ( $Y_{неиск} + Y_{иск}$  и  $\Phi_{неиск} + \Phi_{иск}$ ), но в соответствии с разделением элементов в схеме замещения на неискажающие и искажающие части (рис. 4).

Решение уравнения (2) относительно  $\Phi_{иск}$  имеет вид:

$$\Phi_{иск} = (Y_{неиск} + Y_{иск})^{-1} \times I_{неиск} - \Phi_{неиск} \quad (3)$$

Узловые потенциалы матрицы  $\Phi_{иск}$  определяют ФВ ИИ, вносимый в искажение потенциалов каждого узла. Как видно из выражения (3), узловые потенциалы искажений каждого узла невозможно представить в виде суммы узловых потенциалов, каждое слагаемое которой зависит от отдельного ИИ:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{иск}^{IIIi} \neq f\left(\sum_{i=1}^n Y_{иск}^{IIIi}\right) \quad (4)$$

где  $n$  – общее количество ИИ в СЭС и со стороны потребителей ЭЭ.

Сделаем допущение, что все пассивные элементы, характеризующие ИИ, замененные на соответствующие активные элементы (рис. 5) в соответствии с принципом компенсации [8], являются независимыми друг от друга. Тогда уравнение (2) запишется следующим образом:

$$Y_{неиск} \times \left( \Phi_{неиск} + \sum_{i=1}^n \Phi_{иски} \right) = I_{неиск} + \sum_{i=1}^n I_{иски} \quad (5)$$

где  $\Phi_{иски}$  – матрица искажающих узловых потенциалов, характеризующая отдельный ФВ  $i$ -го ИИ в общее искажение потенциалов элект-

рической сети;  $I_{иски}$  – матрица узловых токов, отдельно характеризующая  $i$ -й ИИ.

Решение уравнения (5) относительно  $\sum_{i=1}^n \Phi_{иски}$ :

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{иски} = Y_{неиск}^{-1} \times \sum_{i=1}^n I_{иски} \quad (6)$$

позволяет приближенно определить ФВ  $i$ -го ИИ в общее искажение узловых потенциалов от отдельного действия каждого ИИ:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{иск}^{IIIi} \approx f\left(\sum_{i=1}^n Y_{иск}^{IIIi}\right) \quad (7)$$

Используя матрицу инцидентий ( $A$ ) ФВ  $i$ -го ИИ в общее искажение напряжений СЭС будет определяться как:

$$\sum_{i=1}^n U_{иски} = A^T \times \sum_{i=1}^n \Phi_{иски} \quad (8)$$

Из выражений (6), (8) следует что, напряженные искажения  $U_{иски}$ , определяющее ФВ  $i$ -го ИИ в общее искажение напряжений в СЭС, выражаются от отдельного действия каждого ИИ  $I_{иски}$  и, по своей сути, отображает решение рассматриваемой задачи на основе принципа наложения.

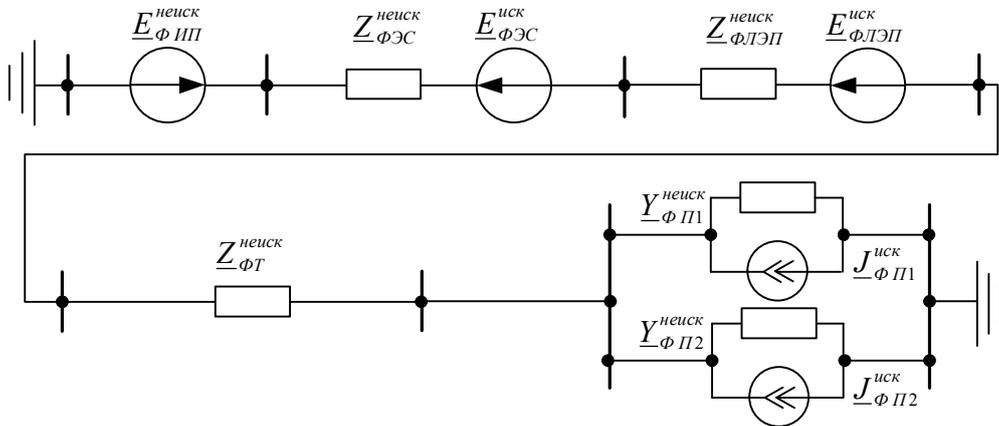


Рис. 5. Схема замещения СЭС двух потребителей ЭЭ после применения принципа компенсации

### Выводы

Разработана математическая модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в СЭС, основанная на принципе наложения. Представление искажающих частей ИИ в виде активных элементов схем замещения позволяет приближенно определить ФВ  $i$ -го ИИ в

общее искажение напряжений в СЭС отдельно от действия каждого ИИ. Отличительной особенностью предлагаемой математической модели является ее разработка в пространстве фазных составляющих с учетом распределенного характера ИИ в СЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
2. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: учеб. пособие / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, Д. Н. Калюжный и др. – Харьков: Харьк. нац. акад. город. хоз-ва, 2006. – 272 с.
3. Карташев, И. И. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов, Г. К. Масленников, В. В. Васильев // Промышленная энергетика. - 2002. – № 8. – С. 42-47.
4. Шидловский, А. К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. – К., 1981. – 49 с. Препринт / 253 ИЭД АН УССР
5. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66–69.
6. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 123–133.
7. Y. Sayenko. 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 / Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi // IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'. - 2015. S. 84-88.
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – 6 – е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Гриб О. Г.*

Потребление и передача электрической энергии пониженного качества является причиной многих негативных последствий, которые в конечном счете выражаются экономическими убытками потребителей и поставщиков электрической энергии. На сегодняшний день насчитывается достаточно большое количество методов определения фактического вклада в понижение качества электрической энергии. Основная часть из них разработана в пространстве симметричных составляющих и базируется на использовании соответствующих параметров режима работы и схем замещения элементов систем электроснабжения. Именно этот прием является главной причиной недостатков существующих методов определения фактических вкладов. Разработка новых математических моделей является ключом к созданию новых, более совершенных методов распределения фактических вкладов. В статье приведены результаты по разработке новой математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажения в искажении напряжений в системе электроснабжения, которая базируется на пространстве фазных составляющих и учитывает распределенный характер источников искажений. Основной идеей разработанной модели является выделение у всех источников искажения искажающих частей и определение их фактического вклада в общее искажение напряжений.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. *Kachestvo elektroenergii na promushlennukh predpriatiakh* [Power quality in industrial plants.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
2. Grib O. G., Senderovich G. A., Kaliuzhnyy D. N. and act. *Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniia* [The quality of electrical energy in power systems.]. Kharkov: Khark. nats. akad. gorod. khoz-va Publ., 2006. 272 p.
3. I. I. Kartashev, I. S. Ponomarenko, V. N. Tulskiy, R. G. Shamonov, G. K. Maslennikov, V. V. Vasiliev. *Kachestvo elektricheskoy energii v munitsipalnyih setyah Moskovskoy oblasti* [The power quality of electricity networks in the municipalities of the Moscow region]. *Promyshlennaya energetika - Industrial Power Engineering*, 2002, no 8, pp. 42-47.
4. Shidlovskiy A. K. , Kuznetsov V. G. , Nikolaenko V. G . *Ekonomicheskaiia otsenka posledstviy s nizheniia kachestva elektricheskoy energii v sovremennukh sistemakh elektrosnabzheniia* [Economic evaluation of the effects of reducing the quality of electricity in modern power supply systems.]. Kiev, IED AN USSR Publ., 1981. 49 p.
5. Chepman D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii [Price low power quality]. *Energoberezhnie - Energy Saving*, 2004, no.1, pp. 66–69.
6. Saenko, Yu. L., Kalyuzhnyy, D. N. Analiz metodov opredeleniya fakticheskikh vkladov v ponizhenie kachestva elektricheskoy energii po nesimmetrii i nesinusoidalnosti [The analysis of methods for determining the factual contribution to lowering the power quality through asymmetry and non-sinusoidal voltage]. *Elektrifikatsiya transporta - Electrification of transport*, 2015, no 9. pp. 123–133.
7. Y.Sayenko, D.Kalyuzhnyi. 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. - IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'2015. S. 84-88.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovu elektrotekhniki* [Theory of electrical engineering.]. – Moscow, «Vussh. shkola» Publ., 1973. 752 p.

**Ключевые слова:** Качество электрической энергии, точка общего присоединения, фактический вклад, несимметрия напряжений, отклонение напряжения.

## УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ПДТУ), Д. М. КАЛЮЖНИЙ (ХНУМГ ІМ. О. М. БЕКЕТОВА)

Приазовський державний технічний університет, кафедра електрифікації промислових підприємств, Україна, 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629)-44-65-51, ел. пошта: [YuriSayenko@mail.ru](mailto:YuriSayenko@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](https://orcid.org/0000-0001-9729-4700)

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст, Україна, 61002, м. Харків, вул. Революції, 12, тел.: 050-560-68-35, ел. пошта: [KalyuzhniyDN@mail.ru](mailto:KalyuzhniyDN@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-7374-0734](https://orcid.org/0000-0002-7374-0734)

## ПРИНЦИП НАКЛАДЕННЯ В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ ЛІНІЙНИХ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ У СПОТВОРЕННЯ НАПРУГ У ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

Споживання й передача електричної енергії зниженої якості є причиною багатьох негативних наслідків, які в остаточному підсумку виражаються економічними збитками споживачів і постачальників електричної енергії. На сьогоднішній день налічується досить велика кількість методів визначення фактичного внеску в зниження якості електричної енергії. Основна частина з них розроблена в просторі симетричних складових і базується на використанні відповідних параметрів режиму роботи й схем заміщення елементів систем електропостачання. Саме цей прийом є головною причиною недоліків існуючих методів визначення фактичних внесків. Розробка нових математичних моделей є ключем до створення нових, більш досконалих методів розподілу фактичних внесків. У статті наведені результати по розробці нової математичної моделі розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворення у спотворення напруг у системі електропостачання, яка базується на просторі фазних складових і враховує розподілений характер джерел спотворень. Основною ідеєю розробленої моделі є виділення в усіх джерелах спотворень спотворюючих частин і визначення їх фактичного внеску в загальне спотворення напруг.

**Ключові слова:** Якість електричної енергії, точка загального приєднання, фактичний внесок, несиметрія напруг, відхилення напруги.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Гриб О. Г.*

## UDC 621.31

Y. L. SAYENKO (PSTU), D. N. KALYUZHNIY (O.M. BEKETOV NUUE)

Pryazovskyi State Technical University, Department of Industrial Electrical Power Supply, Ukraine, 87500, Mariupol, 7 Universytets'ka, tel.: (0629)-44-65-51, e-mail: [YuriSayenko@mail.ru](mailto:YuriSayenko@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](https://orcid.org/0000-0001-9729-4700)

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Department of electrical supply and energy consumption systems of cities, Ukraine, 61002, Kharkiv, 12 Revolutsii, tel.: 050-560-68-35, e-mail: [KalyuzhniyDN@mail.ru](mailto:KalyuzhniyDN@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-7374-0734](https://orcid.org/0000-0002-7374-0734)

## SUPERPOSITION PRINCIPLE IN MATHEMATICAL MODELS OF THE FACTUAL CONTRIBUTION DISTRIBUTION OF LINEAR SOURCES OF DISTORTION IN VOLTAGE DISTORTION AT THE POINT OF COMMON COUPLING

The consumption and transmission of electric energy of reduced quality is the cause of many negative consequences that lead to economic losses of consumers and suppliers of electric power. Nowadays there are quite a great number of methods for the determination of the factual contribution in the quality power reduction. The main part of them is designed in the space of symmetrical components and is based on the usage of the relevant parameters of the operating regime and equivalent circuits of power systems elements. This technique is a major cause of disadvantages of existing methods for the determination of factual contributions. The development of new mathematical models is the key to the creation of new and better methods of factual contributions distribution. The results on the development of a new mathematical model of factual contributions distribution of linear sources of distortion in voltage distortion in the power supply system, which is based on the phase components space and accounts for the distributed nature of sources of distortion, are presented in the article. The main idea of the designed model is generation of distorting parts in all sources of distortion and determination of their factual contribution to the overall voltage distortion.

**Keywords:** Power quality, factual contribution, point of common coupling, voltage asymmetry, voltage deviation.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Grib O. G.*

© Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. Н., 2015