

УДК 621.31

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»), Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ (ХНУГХ)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@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 электро-снабжения 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)

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ В ПониЖЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

### Постановка проблемы

Потребление и передача электрической энергии (ЭЭ) пониженного качества приводит к значительным экономическим ущербам [1], вызванных сбоями работы и повреждением оборудования, расстройством технологических процессов, браком продукции, дополнительными потерями мощности и т. п. [1-3]. Рассматривая современный уровень отраслей экономики, видим, что наиболее подвержены таким негативным последствиям: банковский сектор, информационная сфера, высокотехнологические отрасли производства и др. Так, по данным, опубликованным в [4], финансовые потери некоторых потребителей могут достигать 6 000 000 евро/час за одно событие понижения КЭ. Если рассматривать ежегодные убытки, то по данным [2] для отдельных стран, они составляют порядка 10-20 млрд дол. США. Очевидно, что при возникновении вопроса о компенсации экономических убытков возникает задача определения виновников понижения качества ЭЭ (КЭ) и распределения между ними финансовой компенсации ущерба потерпевшей стороне. Эта задача решается на основе определения фактического (долевого) вклада (ФВ) присоединений в понижение КЭ в точке общего присоединения (ТОП), под которым понимается истинное значение доли показателя качества электроэнергии (ПКЭ), вносимой каждой из сторон на границе раздела, в процессе потребления ЭЭ [5].

### Анализ последних исследований и публикаций

Первые публикации по данной проблематике появились после вступления в силу государственного стандарта по КЭ ГОСТ 13109-87. Началу дискуссий и толчком к дальнейшему развитию методов определения ФВ в понижение КЭ присоединений в ТОП послужил метод включения/отключения потребителя, разработанный во

ВНИИЭ под руководством Ю. С. Железко [6]. Принципиально другой подход решения рассматриваемой задачи, который известен под методом баланса вторичных мощностей, был предложен Ф. А. Зыкиным [7]. Его идея использования элементов метода симметричных составляющих и теории линейных цепей с источниками несинусоидального тока была использована другими авторами. В результате наиболее обобщенным методом определения ФВ можно считать метод, предложенный В. Я. Майером и Зения [8]. Следующим принципиальным этапом в развитии методов определения ФВ является работа Yang Hong Geng [5, 9]. Ее отличительной особенностью является использование нескольких следующих друг за другом измерений параметров режима работы сети для определения ФВ. Устранению недостатков последнего метода посвящены работы С. И. Гамазина, в которых для определения ФВ предлагается прибегать к использованию активного эксперимента [9, 10]. Последние исследования данной проблематики проведены Г. А. Сендеровичем, который предлагает определять ФВ по проводимостям искажений [11].

Кроме указанных выше авторов, значительный вклад в решение рассматриваемой проблематики внесли такие ученые как О. Г. Гриб, И. И. Карташев, С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова, В. Н. Тульский, В. А. Петрович, Е. И. Васильев, Д. М. Подольский, П. Г. Щербакова и др.

### Цель статьи

Провести анализ, классифицировать и определить область использования существующих методов определения ФВ присоединений в понижение КЭ в ТОП по несимметрии и несинусоидальности напряжений.

### Основные материалы исследования

Все существующие методы определения ФВ в понижение КЭ направлены на решение этой

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

задачи относительно ТОП, в которой предполагается измерение ПКЭ и параметров режима работы сети отходящих присоединений. Такие условия задачи предопределили классификацию данных методов, которые можно разделить на четыре большие группы (табл. 1). Первая группа методов характеризуется использованием для определения ФВ непосредственно самих ПКЭ. Вторая, третья и четвертая группы используют либо непосредственно токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей, а так же их высших гармонических составляющих, либо соотношения между ними.

Таблица 1

**Классификация методов определения ФВ**

Группа методов	Величина, используемая для определения ФВ
I	ПКЭ
II	Мощность искажений
III	Напряжения искажений
IV	Проводимости искажений

Рассмотрим методы каждой группы с учетом возможностей их технической реализации

в соответствии с методикой измерений ПКЭ (табл. 2) и использованием дополнительной информации.

**Метод включения/отключения потребителя**

Согласно данному методу [6] ФВ потребителя ( $\Phi V_{\Pi}$ ) в понижение КЭ определяется как разность значений ПКЭ при включенном ( $ПКЭ_B$ ) и отключенном ( $ПКЭ_0$ ) его состояниях относительно ТОП:

$$\Phi V_{\Pi} = ПКЭ_B - ПКЭ_0.$$

Очевидно, что этот метод оценивает ПКЭ в два различных момента времени, для которых состояния присоединений и источников искажений (ИИ) оказываются независимыми и несвязанными друг с другом. Кроме этого, метод не может быть реализован в рамках методики измерения ПКЭ (табл. 2), поэтому его использование ограничивается случаями предварительного анализа влияния на КЭ нового присоединения [5].

Таблица 2

**Интервалы измерений и усреднения результатов измерений основных нормируемых ПКЭ**

ПКЭ	Интервал измерения <i>i</i> -го значения ПКЭ, с	Интервал усреднения, с
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U, \%$ .	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент <i>n</i> -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}, \%$ .	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}, \%$ .	Не более 0,33 (3/9)	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U}, \%$ .	Не более 0,33 (3/9)	3

**Метод построения зависимости  $ПКЭ = f(S_{нагр})$**

В основу данного метода [5] положено использование статистической, предположительно линейной, зависимости ПКЭ от мощности включенного оборудования потребителя  $S_{нагр}$  (рис. 1).

Полученная по результатам длительных измерений в ТОП зависимость  $ПКЭ = f(S_{нагр})$  позволяет оценить ФВ электроэнергетической системы  $ПКЭ_C$  как некоторую постоянную величину (фон системы), определяемую следующим образом:  $ПКЭ_C = ПКЭ(0)$ . В результате ФВ потребителя в понижение КЭ составит:

$$\Phi V_{\Pi} = ПКЭ_{тек} - ПКЭ_C,$$

где  $ПКЭ_{тек}$  – текущее значение ПКЭ в ТОП.

Учитывая, что КЭ в ТОП определяется взаимным влиянием всех присоединений, то адекватность  $ПКЭ = f(S_{нагр})$  как характеристики влияния одного конкретного присоединения на ПКЭ будет зависеть от уровня вносимых помех каждого присоединения. В связи с этим, применение данного метода ограничивается теми случаями, когда другие ИИ и резонансные явления в системе электроснабжения не оказывают значительного влияния на анализируемый процесс, а рассматриваемый потребитель оказывает доминирующее влияние на КЭ в ТОП [5].

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

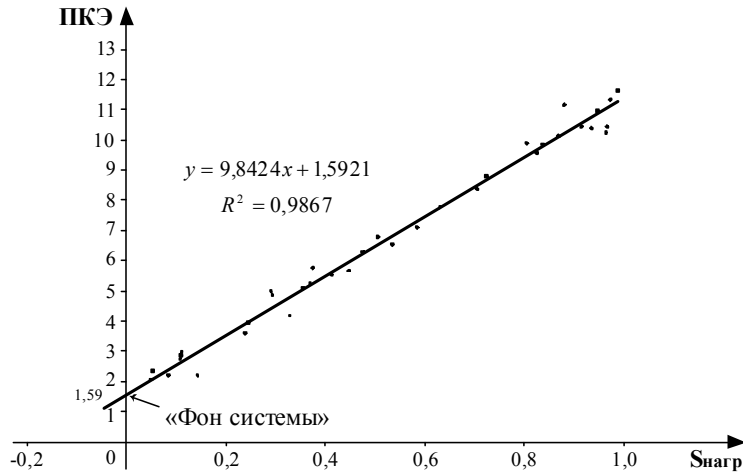


Рис. 1. Пример нахождения функциональной зависимости между мощностью нагрузки и значением ПКЭ [5]

**Метод баланса вторичных мощностей**

В основе данного метода [7] лежит следующее представление физики происходящих процессов: искажающая КЭ нагрузка часть своей потребляемой мощности не расходует на технологический процесс, а преобразует в виде искажений генерирует обратно в электрическую сеть (рис. 2). Отрицательное значение вторичной мощности определяет источник (генератор) искажений ЭЭ в электрической сети относительно ТОП.

Таким образом, отбрасывая положительные вторичные мощности как по активной, так и по реактивной составляющим, долевой вклад *m*-го присоединения в понижение КЭ относительно ТОП составит:

$$d_m = \frac{P_{em}^{-(m)} \cdot \sum_{i=1}^k P_{em}^{-(i)} + Q_{em}^{-(m)} \cdot \sum_{i=1}^k Q_{em}^{-(i)}}{\left[ \sum_{i=1}^k P_{em}^{-(i)} \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^k Q_{em}^{-(i)} \right]^2},$$

где  $P_{em}^{-(i)}$  и  $Q_{em}^{-(i)}$  – отрицательные активные и реактивные составляющие вторичных мощностей *i*-го присоединения.

Следует отметить, что основная идея данного метода используется в подходах определения ФВ, ИИ и долевого участия других авторов [5, 12, 13] как основополагающая.

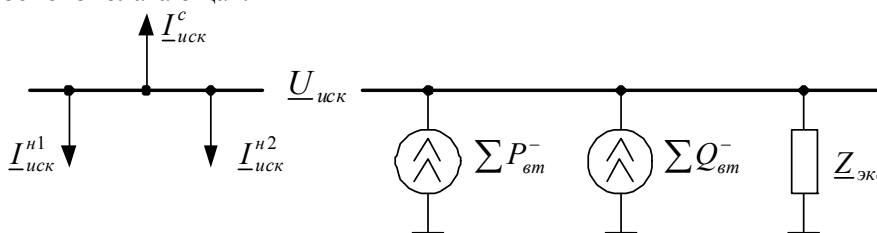


Рис. 2. Схемы замещения электрической сети по методу баланса вторичных мощностей

Так, в работе [12], предлагается оценивать вклад в уровни напряжений высших гармоник в узлах электрической сети, исходя из баланса искажающих мощностей:

$$\underline{D}_{ni}^{ГC} + \underline{D}_{ni}^{ГН} = \frac{U_{ni}}{U_{pn}} \cdot \left[ \underline{D}_{ni}^{ПC} + \underline{D}_{ni}^{ПН} \right], \quad (1)$$

где  $\underline{D}_{ni}^{ГC} = \underline{I}_{ni}^{ГC} \cdot U_1$  и  $\underline{D}_{ni}^{ГН} = \underline{I}_{ni}^{ГН} \cdot U_1$  – генерация искажающей мощности в узле сетью

$$\left( \underline{I}_{ni}^{ГC} = \sum_{j=1}^m \underline{A}_{nij} \cdot I_{nj} \right), \text{ где } \underline{I}_{nj} \text{ – эквивалентный}$$

источник тока узла *j*, отражающий нелинейность нагрузки, подключенной к узлу *j*;  $\underline{A}_{nij}$  – коэффициент передачи тока *n*-й гармоники от источника тока, находящегося в узле *j*, в узел *i* (определяется методом активного двухполюсника из режима КЗ в узле *j*); *m* – количество узлов сети и нагрузкой ( $\underline{I}_{ni}^{ГН}$ ) при номинальном напряжении  $U_1$ );

$\underline{D}_{ni}^{ПC} = \underline{Y}_{ni}^{ПC} U_1 / U_{pn}$  и  $\underline{D}_{ni}^{ПН} = \underline{Y}_{ni}^{ПН} U_1 / U_{pn}$  – поглощаемые искажающие мощности при расчетном напряжении *n*-й гармонической составляющей ( $U_{pn}$ ), которая связана с соответствующими проводимостями  $\underline{Y}_{ni}^H = G_{ni}^H - jB_{ni}^H$  и  $\underline{Y}_{ni}^C = G_{ni}^C - jB_{ni}^C$  (рис. 3).

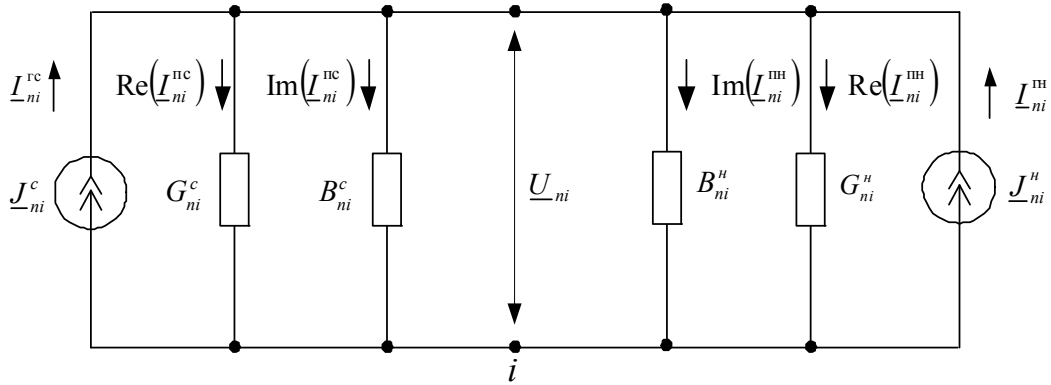


Рис. 3. Схема замещения электрической сети, использованная С. С. Смирновым и Л. И. Коверниковой

На основе выражения (1) предлагается определять вклад нелинейной нагрузки, расположенной в узле  $j$ , в напряжение  $n$ -й гармоники узла  $i$  следующим образом:

$$U_{nij} = U_{pn} \cdot \frac{|D_{nij}^r|}{|D_{ni}^{pc} + D_{ni}^{nh}|}$$

В [5] рассмотрен способ определения долевого вклада в понижение КЭ на основе анализа только активных составляющих вторичных мощностей. Так, по результатам измерений, по отрицательному знаку активной вторичной мощности среди присоединений в ТОП, выявляют ИИ и для них производится векторное суммирование токов с тем, чтобы определить значение тока  $I_{\Sigma}$  эквивалентного источника. Остальные параметры схемы замещения представляются эквивалентными пассивными сопротивлениями, модуль которого определяется по формуле:

$$Z_{BX} = U_{иск} / I_{\Sigma},$$

где  $U_{иск}$  – напряжение искажения.

Зная эквивалентное входное сопротивление, находят ФВ каждого  $k$ -го ИИ по выражению:

$$U_{иск k}^{\Phi B} = I_{иск k} \cdot Z_{BX},$$

где  $I_{иск k}$  – ток искажения  $k$ -го искажающего присоединения.

В [13] рассматривается подход определения ИИ относительно ТОП, в котором полную мощность  $n$ -й гармонической составляющей представляют в виде трех слагаемых:

$$\underline{S}_n = \underline{S}_n^{(1)} + \underline{S}_n^{(2)} + \underline{S}_n^{(3)},$$

где  $\underline{S}_n^{(1)}$  – мощность, генерируемая источниками тока  $n$ -й гармонической составляющей, расположенными в энергосистеме;

$\underline{S}_n^{(2)}$  – мощность, генерируемая источниками тока  $n$ -й гармонической составляющей, расположенными в нагрузке;

$\underline{S}_n^{(3)}$  – взаимная мощность, существующая при наличии источников тока  $n$ -й гармонической составляющей как в системе, так и в нагрузке.

Для указанных составляющих вторичных мощностей выявлены следующие закономерности. При наличии одного ИИ существует одно из трех слагаемых ( $\underline{S}_n^{(1)}$  или  $\underline{S}_n^{(2)}$ ), для которого направление вторичной мощности по каждой  $n$ -й гармонической составляющей всегда соответствует ее генерации. При наличии двух и более ИИ существуют все три слагаемых, анализ которых не позволяет однозначно определить ИИ и соответственно долевого вклада каждого присоединения.

Подводя итог анализа методов определения ФВ данной группы, можно выделить главный их недостаток: при наличии более одного искажающего присоединения относительно ТОП вторичные мощности являются следствием взаимного действия всех ИИ, которые по своему направлению не позволяют однозначно определить виновную сторону. В связи с этим использование данных методов ограничено случаями, когда в ТОП подключен единственный или доминирующий ИИ [5, 10].

### Метод определения ФВ по напряжениям искажений

Основоположниками данного способа определения ФВ (В. Я. Майером и Зения) было использовано приближенное представление реальной электрической сети, в соответствии с которым пассивные нелинейные элементы были заменены активными ИИ [8]. Этот прием представления соответствует классическому случаю линейных электрических цепей с нели-

нейними источниками тока [14], в рамках которого расчет и анализ параметров режима работы сети представляется возможным вести по отдельным гармоникам и последовательностям.

Применяя принцип наложения к схемам замещения по отдельным гармоникам и последовательностям (рис. 4), соответствующие им напряжения в ТОП могут быть разложены на составляющие, отдельно зависящие от искажений каждого присоединения, и, соответственно, характеризующие долевые вклады каждого присоединения. В случае двух присоединений (энергосистемы и нагрузки) имеем:

$$\underline{U}_{nq} = \underline{U}_{nq}^c + \underline{U}_{nq}^h, \quad (2)$$

где  $\underline{U}_{nq}$  – напряжение  $n$ -й гармоники  $q$ -й последовательности.

Следует отметить, что авторы данного метода обращают внимание на то, что часть данных ( $\underline{Z}_{nq}^c$  и  $\underline{Z}_{nq}^h$  – эквивалентные сопротивления искажающего источника питания системы и нагрузки току  $n$ -й гармоники  $q$ -й последовательности), относящиеся к параметрам схем замещения, необходимых для определения  $\underline{U}_{nq}^c$  и  $\underline{U}_{nq}^h$ , следует определять расчетным путем с учетом основных допущений при расчетах токов короткого замыкания (КЗ), принятых в [15].

На основе (2) ФВ в искажение КЭ по таким ПКЭ, как  $K_{2U}$ ,  $K_{0U}$ ,  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  определяются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{2U}^h = \frac{U_{(1)2}^h}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \\ K_{2U}^c = \frac{U_{(1)2}^c}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} K_{0U}^h = \frac{U_{(1)0}^h}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \\ K_{0U}^c = \frac{U_{(1)0}^c}{U_{(1)1}} \cdot 100\%; \end{array} \right.$$

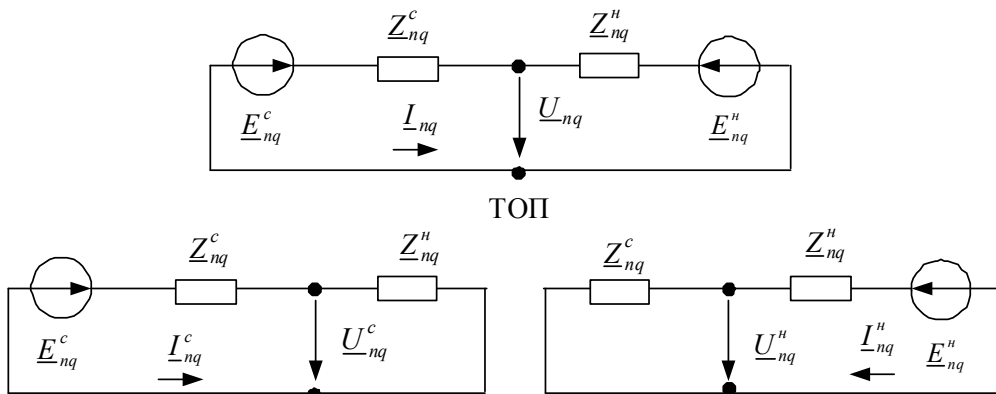


Рис. 4. Схемы замещения электрической сети, поясняющие принцип участия энергосистемы и потребителя в формировании общего искажения ЭЭ в ТОП

$$\left\{ \begin{array}{l} K_U^h = \frac{100\%}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} [U_{(n)}^h]^2}; \\ K_U^c = \frac{100\%}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} [U_{(n)}^c]^2}; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} K_{U(n)}^h = \frac{U_{(n)}^h}{U_{(1)}} 100\%; \\ K_{U(n)}^c = \frac{U_{(n)}^c}{U_{(1)}} 100\%. \end{array} \right.$$

К основному недостатку данного метода следует отнести получение достоверной информации об  $\underline{Z}_{nq}^c$  и  $\underline{Z}_{nq}^h$ , которую представляется возможным получить для обратной последовательности, исходя из обобщенных представлений нагрузки и системы [14]. Для нулевой последовательности эта информация может быть определена только путем вычисления и эквивалентирования сопротивлений нулевой последовательности всех элементов, которые относятся к нагрузке и системе, что в рамках методики измерения ПКЭ (см. табл. 2) технически не реализуемо.

Устранение данного недостатка возможно путем использования решения, предложенного Yang Hong Geng [5, 9]. Его отличительной особенностью является способ определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих сопротивления ИИ токам  $n$ -й гармоники  $q$ -й последовательности (рис. 5).

В данной модификации метода определения ФВ по напряжениям искажений предлагается определять сопротивления  $\underline{Z}_{nq}^c$  и  $\underline{Z}_{nq}^h$  по результатам двух следующих друг за другом измерений параметров режима работы сети, исходя из следующих соображений. Если изменится источник тока искажений со стороны системы  $\underline{J}_{nq}^c$  на величину  $\Delta \underline{J}_{nq}^c = \underline{J}_{nq}^c(t_1) - \underline{J}_{nq}^c(t_2)$ , то произойдет изменение тока  $\underline{I}_{nq}$  и напряжения  $\underline{U}_{nq}$  в ТОП на величины  $\Delta \underline{I}_{nq} = \underline{I}_{nq}^c(t_1) - \underline{I}_{nq}^c(t_2)$  и  $\Delta \underline{U}_{nq} = \underline{U}_{nq}^c(t_1) - \underline{U}_{nq}^c(t_2)$  соответственно.



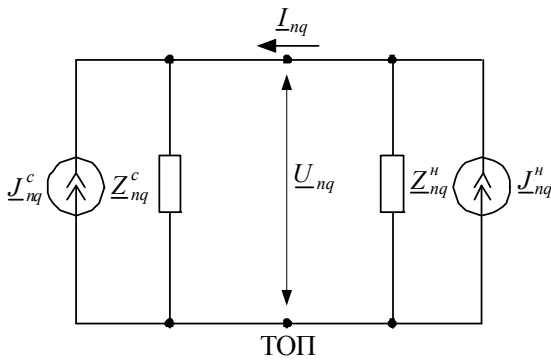


Рис. 5. Схема замещения электрической сети, использованная Yang Hong Geng

При изменении  $J_{nq}^h$  будут иметь место аналогичные приращения тока  $\Delta I_{nq}$  и напряжения  $\Delta U_{nq}$ . В том случае, если  $\text{Re}(\Delta U_{nq} / \Delta I_{nq}) < 0$ , то отношение  $\Delta U_{nq} / \Delta I_{nq}$  определяет сопротивление  $Z_{nq}^h$ , в случае, когда  $\text{Re}(\Delta U_{nq} / \Delta I_{nq}) > 0$  – сопротивление  $Z_{nq}^c$ .

Очевидно, что такой способ вычисления двух неизвестных величин  $Z_{nq}^c$  и  $Z_{nq}^h$  в два различных момента времени возможен только при условии:  $Z_{nq}^c = \text{const}$ ,  $Z_{nq}^h = \text{const}$ ,  $J_{nq}^c = \text{const}$  и  $J_{nq}^h = \text{var}$  или  $J_{nq}^h = \text{const}$  и  $J_{nq}^c = \text{var}$ . Это условие является маловероятным в электроэнергетической системе и поэтому оно определяет главный недостаток рассмотренного метода определения ФВ.

В работе [9] проведен анализ решения, предложенного Yang Hong Geng, в результате которого выявлено, что погрешность расчетов  $Z_{nq}^c$  и  $Z_{nq}^h$  находится в допустимых пределах только тогда, когда приращения тока гармонической составляющей одного из ИИ в сотни раз превышает приращение тока другого. Кроме этого, выделен еще один недостаток, который касается возможного изменения линейной (неискажающей) части сопротивлений  $Z_{nq}^c$  и  $Z_{nq}^h$  независимо от токов  $J_{nq}^c$  и  $J_{nq}^h$  ИИ. Устранение указанных недостатков предлагается осуществлять путем принудительного изменения линейной части сопротивлений  $Z_{nq}^c$  или  $Z_{nq}^h$  в ходе активного эксперимента (рис. 6) путем использования коммутируемой батареи конденсаторов (БК). В этом случае методика измерений и расчетов, проводимых в рамках данной модификации метода определения ФВ по напряжениям искажений, состоит в следующем.

1. Измеряются токи  $I_{nq}^{h1} = I_{nq}^{c1} = I_{nq}^1$  и напряжения  $U_{nq}^1$  при выключенной БК. 2. Осуществляется измерения токов  $I_{nq}^{h2}$ ,  $I_{nq}^{c2}$  и напряжения  $U_{nq}^2$  в момент (или после) включения БК. 3. По отношению изменений напряжения  $\Delta U_{nq} = U_{nq}^1 - U_{nq}^2$  к изменению тока  $\Delta I_{nq}^h = I_{nq}^{h2} - I_{nq}^{h1}$  вычисляется сопротивление  $Z_{nq}^c$ . 4. По отношению изменения

напряжения  $\Delta U_{nq}$  к изменению тока  $\Delta I_{nq}^c = I_{nq}^{c2} - I_{nq}^{c1}$  вычисляется сопротивление  $Z_{nq}^h$ . 5. По выражениям

$$U_{nq}^c = \frac{(U_{nq} + I_{nq} \cdot Z_{nq}^h) \cdot Z_{nq}^c}{Z_{nq}^h + Z_{nq}^c} \quad \text{и}$$

$$U_{nq}^h = \frac{(U_{nq} + I_{nq} \cdot Z_{nq}^c) \cdot Z_{nq}^h}{Z_{nq}^h + Z_{nq}^c} \quad \text{определяются со-}$$

ставляющие напряжения  $U_{nq}$ , характеризующие долевое участие энергосистемы и потребителя в искажении КЭ в ТОП.

Адекватность модификации метода определения ФВ по искажениям напряжений, предложенная С. И. Гамазиным, аналогично модификации Yang Hong Geng, будет зависеть от следующих условий:  $J_{nq}^c = \text{const}$ ,  $J_{nq}^h = \text{const}$ ,  $Z_{nq}^c = \text{const}$  и  $Z_{nq}^h = \text{var}$  или  $Z_{nq}^h = \text{const}$  и  $Z_{nq}^c = \text{var}$ , что, в общем случае, так же является маловероятным событием в электроэнергетической системе.

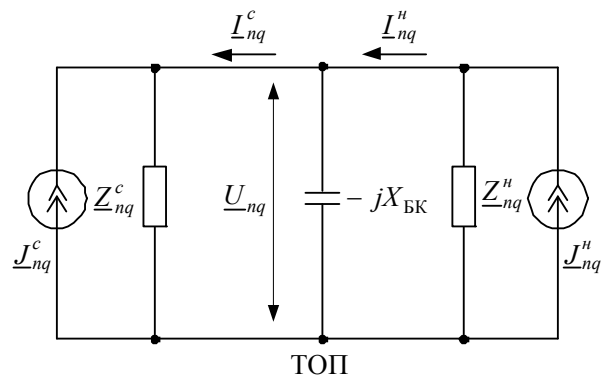


Рис. 6. Схема замещения электрической сети, использованная С. И. Гамазиным

Таким образом, область использования метода определения ФВ по искажениям напряжений ограничивается случаями, когда к ТОП подключено несколько ИИ с одним явно выраженным доминирующим присоединением по

его мощности и частоте изменения искажений. С точки зрения возможности технической реализации трудность возникает для модифицированного метода, предложенного С. И. Гамазиным, который требует постоянной коммутации БК в интервалах времени, указанных в табл. 2.

**Метод определения ФВ по проводимостям искажений**

Согласно данному методу для определения ФВ в понижении КЭ по несимметрии напряжений [13, 16] предлагается использовать следующие проводимости искажений:

$$\begin{cases} \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} = \frac{1}{3}(\underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}); \\ \underline{Y}_0^{H \text{ экв}} = \frac{1}{3}(\underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}), \end{cases}$$

которые получаются из нижеприведенной математической модели электрической сети (рис. 7) при допущении симметрии напряжений в ТОП:

$$\begin{cases} \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_1; \\ \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \underline{U}_B \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_2; \\ \frac{(\underline{U}_A \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_B \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_C \underline{Y}_C^{H \text{ экв}})}{3} = I_0. \end{cases} \quad (3)$$

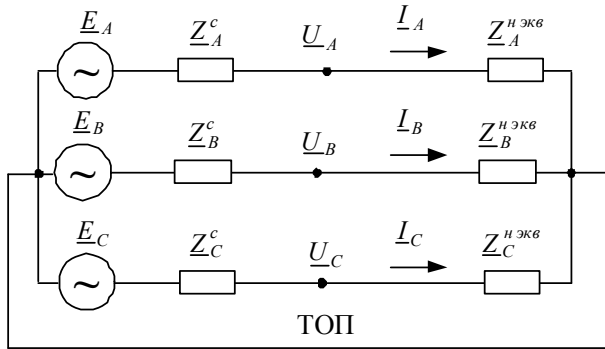


Рис. 7. Схема замещения электрической сети для анализа КЭ по несимметрии напряжений

Предполагая, что несимметричное воздействие потребителя на сеть определяется несимметрией фазных проводимостей ( $\underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$  и  $\underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$ ), долевое участие  $i$ -го потребителя в создание несимметрии напряжений по отдельным последовательностям может быть определено следующим образом:

$$d_2^i = \underline{Y}_2^i / \sum_{i=1}^n |Y_2^i|, \quad d_0^i = |Y_0^i| / \sum_{i=1}^n |Y_0^i|.$$

Для определения ФВ в искажение КЭ по несимметрии напряжений с учетом влияния энер-

госистемы сумму долевых частей энергосистемы ( $d_{2Yч}^c$ ) и эквивалентной нагрузки ( $d_2^{H \text{ экв}} = \sum_{i=1}^n d_2^i$ ) следует принять равной единице:

$$\sum_{i=1}^n d_2^i + d_2^c = 1 \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^n d_0^i + d_0^c = 1.$$

Рассмотрим влияние, принятого в данном методе допущения о симметрии напряжений в ТОП. Допустим, что напряжение в ТОП принимается равным напряжению прямой последовательности  $\underline{U}_1$  и несимметричные составляющие рассматриваются отдельно. Выделим в (3) ту часть выражения, которая подлежит пренебрежению:

$$\begin{cases} \frac{1}{3}[\underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] + \\ + \frac{1}{3}[\underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] = I_2; \\ \frac{1}{3}[\underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + a^2 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + a \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] + \\ + \frac{1}{3}[\underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_A^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_B^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_C^{H \text{ экв}}] = I_0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} + \underline{U}_2 \cdot \underline{Y}_1^{H \text{ экв}} = I_2; \\ \underline{U}_1 \cdot \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} + \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_1^{H \text{ экв}} = I_0. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, пренебрежение вторым слагаемым в (4) даст погрешность определения проводимостей искажения  $\underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$  и  $\underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$ , которая в именованных единицах будет определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta \underline{Y}_2^{H \text{ экв}} = -\frac{K_{2U}}{100\%} \cdot e^{j\phi_{U_2}} \cdot \frac{(\underline{S}_1^{H \text{ экв}})^*}{(U_1)^2}; \\ \Delta \underline{Y}_0^{H \text{ экв}} = -\frac{K_{0U}}{100\%} \cdot e^{j\phi_{U_0}} \cdot \frac{(\underline{S}_1^{H \text{ экв}})^*}{(U_1)^2}. \end{cases}$$

Как следует из последнего выражения,  $\Delta \underline{Y}_2^{H \text{ экв}}$  и  $\Delta \underline{Y}_0^{H \text{ экв}}$  и, соответственно, погрешности определения  $d_2$  и  $d_0$  прямо пропорциональны коэффициентам  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ , а также мощности нагрузки  $\underline{S}_1^{H \text{ экв}}$ . Исходя из этого, область использования данного метода целесообразно ограничить случаями ТОП с маломощными присоединениями.

В результате проведенного анализа вышерассмотренных методов определения ФВ присоединений в искажение КЭ в ТОП определены их недостатки, возможность технической реализации и область использования, которые сведены в табл. 3.

Таблиця 3

Результаты анализа методов определения ФВ присоединений в понижении КЭ в ТОП

Метод	Параметр, используемый для определения ФВ	Недостатки математической модели	Возможность технической реализации	Область использования
1. Метод включения/отключения потребителя	Непосредственно ПКЭ	Определение ПКЭ в два различных момента времени измерений, соответствующие несвязанным друг с другом состояниям присоединений в ТОП	Отсутствует	Для предварительного анализа влияния на КЭ нового подключения в ТОП
2. Метод построения зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$	Непосредственно ПКЭ	Получение достоверной зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$ возможно в ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ	Возможно при наличии зависимости $ПКЭ = f(S_{нагр})$	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ
3. Методы баланса вторичных мощностей	Вторичная мощность	Не учет взаимного влияния искажающих присоединений друг на друга	Возможно	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности искажения КЭ
4. Метод определения ФВ по напряжениям искажений	Напряжение искажений	Определение сопротивлений обратной и нулевой последовательностей обобщенной нагрузки и энергосистемы расчетным путем (для решения предложенного В. Я. Майером и Зения)	Отсутствует	Без ограничений
5. Метод определения ФВ по проводимостям искажений	Проводимость искажений	Адекватность математических моделей определяется вероятностью изменения состояния ИИ только по одному присоединению за минимальный интервал времени измерения ПКЭ (для модификаций метода, предложенных Yang Hong Geng и С. И. Гамазиным).	Возможно	В ТОП с одним явно выраженным доминирующим присоединением по мощности и частоте искажения КЭ
		Наличие погрешности определения долевых вкладов, которая прямо пропорционально зависит от коэффициентов $K_{2U}$ и $K_{0U}$ , а также мощности присоединений	Возможно	В ТОП с маломощными присоединениями, которые вызывают незначительную несимметрию напряжений

© Саенко Ю. Л., Каложный Д. Н., 2015



## Выводы

1. Большинство методов определения ФВ присоединений в понижение КЭ в ТОП основаны на использовании в своих математических моделях линейного разложения схем замещения электрической сети на отдельные гармонические и симметричные составляющие. Это определяет главный их недостаток – пренебрежение взаимным влиянием ИИ друг на друга.

2. Получение для данных методов дополнительной информации о параметрах схем замещения электрической сети в координатах, отличных от фазных, вызывают затруднения как методологического, так и технического характера.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шидловский, А. К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. - Препринт – 253 ИЭД АН УССР. – К., 1981. – 49 с.
2. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. 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.
4. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66–69.
5. Тульский, В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения : дис... канд. техн. наук : 05.14.02 / Тульский Владимир Николаевич; Московский энергетический институт. – Москва, 2004. – 134 с.
6. Железко, Ю. С. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии / Ю. С. Железко, Е. И. Кордюков, В. Г. Курбацкий и др. // Промышленная энергетика. – 1990. – №11. – С. 52–55.
7. Зыкин, Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии / Ф. А. Зыкин // Электричество. – 1992. – №11. – С. 13–19.
8. 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.
9. Гамазин, С. И. Определение фактического вклада потребителя в искажении параметров качества электрической энергии / С. И. Гамазин, В. А. Петрович // Промышленная энергетика. – 2003. – №1. – С. 32–38.
10. Васильев Е. И. Определение фактического

3. Способы определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих ИИ по результатам измерения параметров режима работы сети, разработаны для одного из крайних случаев, когда изменение состояний ИИ относительно ТОП происходит только в одном из них.

4. Существующие недостатки рассмотренных методов, не имеющих трудностей с технической реализацией, значительно ограничивают их область использования, которая сводится к случаям ТОП с явно выраженным одним доминирующим ИИ.

## REFERENCES

1. Shidlovskiy A. K., Kuznetsov V. G., Nikolaenko V. G. Ekonomicheskaya 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.
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. Kachestvo elektroenergii na promushlennukh predpriatiiakh. [Power quality in industrial plants.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
3. Grib O. G., Senderovich G. A., Kaliuzhnuy 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.
4. Chepmen D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii. [Price low power quality]. Energoberezhnie - Energy Saving, 2004, no.1, pp. 66–69.
5. Tulskiy V. N. Razvitie metodiki opredeleniia fakticheskogo vklada pri otsenke kachestva elektricheskoy energii v tochke obshchego prisoedineniia. Dokt. Diss. [Development of methodology for determining the actual contribution in assessing the quality of electric energy at the point of common coupling. Doct, Diss.]. Moscow, 2004, 134 p.
6. Zhelezko Yu. S., Kordiukov E. I., Kurbatskiy V. G. and act. Pravila primeneniia skidok i nadbavok k tarifam za kachestvo elektroenergii. [Rules for the application of discounts and allowances to tariffs for power quality.]. Promushlennaia energetika – Industrial power, 1990, no.11, pp. 52–55.
7. Zukin F. A. Opredelenie stepeni uchastiia nagruzok v snizhenii kachestva elektricheskoy energii. [Determining the degree of participation in reducing the load of electric power quality.]. Elektrichestvo – Electricity, 1992, no.11, pp. 13–19.
8. Mayer V. Ya., Zeniia Metodika opredeleniia dolevukh vkladov potrebitelia i energos nabzhaiushchey organizatsii v ukhudshenii kachestva elektroenergii. [Equity method of determining the contribution of the consumer and supply organization in the deterioration of the quality of electricity.]. Elektrichestvo – Electricity, 1994, no. 49, pp. 19–24.
9. Gamazin S. I., Petrovich V. A. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitelia v iskazhenii parametrov kachest-

© Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н., 2015

вклада потребителей и системы в несинусоидальность напряжения на основе активных экспериментов : дис.... канд. техн. наук : 05.09.03 / Васильев Евгений Игоревич; Московский энергетический институт. – Москва, 2008. – 178 с.

11. Сендерович, Г.А. Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії : автореф. дис.... д-ра. техн. наук : 05.14.02 / Сендерович Геннадій Аркадійович; Донецький нац. тех. нн-т. – Донецьк, 2012. – 36 с.

12. Смирнов, С. С. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова // Электричество. – 1996. – №1. – С. 32–38.

13. Гриб, О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербак и др. – Харьков: Харьк. нац. унив. радиоэлектр., 2010. – 444 с.

14. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – 6-изд. перераб. и доп. – М.: «Высш. школа», 1973. – 752 с.

15. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970 – 752 с.

16. Сендерович, Г. А. Определение действительного вклада потребителя в создание несимметрии на сборных шинах / Г. А. Сендерович // Вісник Національного технічного університету „Харківський Політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХНІ”. – 2004. - №47. – С.136–139.

Поступила в печать 21.05.2015.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии; фактический вклад; несимметрия напряжений; несинусоидальность напряжений.

va elektricheskoy energii. [Determination of the actual contribution of the consumer in the distortion of electric power quality parameters.]. Promushlennaya energetika – Industrial power, 2003, no.1, pp. 32–38.

10. Vasilev E. I. Opredelenie fakticheskogo vklada potrebitel'ey i sistemu v nesinusoidalnost napriazheniya na osnove aktivnykh eksperimentov. Doct Diss. [Determination of the actual contribution of the consumers and the system voltage based on nonsinusoidality active experiments. Doct. Diss.]. Moskow, 2008, 178 p.

11. Senderovich G.A. Vznachiennia chastkovoї uchasti subiektiv u porushienni yakosti ielektrichnoi ieniergii.Avtoreferat Diss. [Defining equity subjects in violation of the quality of electric energy. Autor's abstract.]. Donet'sk, 2012. 36 p.

12. Smimov S. S., Kovernikova L. I. Vklad potrebitelia v urovni napriazheniya vusshikh garmonik v uzлах elektricheskoy seti. [Contribution consumer voltage levels higher harmonics in an electric network nodes.] Elektrichestvo – Electricity, 1996, no.1, pp. 32–38.

13. Grib O. G., Senderovich G. A., Shcherbakova P. G. and act. Kontrol potrebleniia elektroenergii s uchetom ee kachestva [Control of energy consumption, taking into account the quality.]. Kharkov: Khark. nats. univ. radioelektr. Publ., 2010. 444 p.

14. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovu elektrotekhniki. [Theory of electrical engineering.]. – Moscow, «Vussh. shkola» Publ., 1973. 752 p.

15. Ulianov S. A. Elektromagnitnue perekhodnue protsessu v elektricheskikh sistemakh. [Electromagnetic transients in power systems.]. Moscow, Energiia Publ., 1970. 752 p.

16. Senderovich G. A. Opredelenie deystvitelnogo vklada potrebitelia v sozdanie nesimmetrii na sbornukh shinakh [Determination of the actual contribution of the consumer in the creation of asymmetry of the busbar.]. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu „Kharkivskiy Politekhnicniy institut” [Bulletin of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”.]. Kharkiv: NTU „KhPI” Publ., 2004, no.47, pp.136–139.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

Потребление и передача электрической энергии пониженного качества является причиной значительных экономических убытков как у ее потребителей, так и поставщиков. При возникновении такой ситуации ставится задача распределения финансовой компенсации убытков потерпевшей стороне между всеми участниками, виновными в понижении качества электроэнергии.

Решение данной задачи основывается на определении фактических вкладов присоединений в понижение качества электроэнергии в точке общего присоединения. На сегодняшний день существует большое количество методов различных как по методологии, так и по техническим особенностям реализации. В ходе проведенного анализа этих методов дана их классификация и определена область использования каждого из них. В результате определено, что большинство методов определения фактического вклада присоединений в понижение качества электрической энергии в точке общего присоединения основаны на использовании в своих математических моделях линейного разложения схем замещения электрической сети на отдельные гармонические и симметричные составляющие. Это определяет главный их недостаток – пренебрежение взаимным влиянием источников искажений друг на друга. Получение для этих методов дополнительной информации о параметрах схем замещения электрической сети в координатах, отличных от фазных, вызывают затруднения как методологического, так и технического характера.

Способы определения параметров схем замещения электрической сети, характеризующих источники искажения по результатам измерения параметров режима работы сети, разработаны для одного из крайних случаев, когда изменение состояний источников искажения происходит только в одном из них. Существующие недостатки рассмотренных методов, не имеющих трудностей с технической реализацией, значительно ограничивают область их использования, которая сводится к случаям точек общего присоединения с явно выраженным одним доминирующим источником искажения.

## УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ДВНЗ «ПДТУ»), Д. М. КАЛЮЖНИЙ (ХНУМГ)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська 7, м. Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700)

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, кафедра електропостачання 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](http://orcid.org/0000-0002-7374-0734)

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ У ЗНИЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПО НЕСИМЕТРІЇ Й НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГ

Споживання і передача електричної енергії зниженої якості є причиною значних економічних збитків як у її споживачів, так і постачальників. У разі виникнення такої ситуації ставиться завдання розподілу фінансової компенсації збитків потерпілій стороні між усіма учасниками, винними в зниженні якості електроенергії.

Вирішення цього завдання ґрунтується на визначенні фактичних внесків приєднань у пониження якості електроенергії в точці загального приєднання. На сьогоднішній день існує велика кількість методів різних як за методологією, так і технічними особливостями реалізації. У ході проведеного аналізу цих методів надана їх класифікація та визначено сферу використання кожного з них. У результаті виявлено, що більшість методів визначення фактичного вкладу приєднань у пониження якості електричної енергії в точці загального приєднання засновані на використанні у своїх математичних моделях лінійного розкладання схем заміщення електричної мережі на окремі гармонійні і симетричні складові. Усе це визначає головний їхній недолік – зневага взаємним впливом джерел спотворень один на одного. Отримання для цих методів додаткової інформації про параметри схем заміщення електричної мережі в координатах, відмінних від фазних, викликають труднощі як методологічного, так і технічного характеру.

Способи визначення параметрів схем заміщення електричної мережі, що характеризують джерела спотворення за результатами вимірювання параметрів режиму роботи мережі, розроблені для одного з крайніх випадків, коли зміна станів джерел спотворення відбувається тільки в одному з них. Існуючі недоліки розглянутих методів, що не мають труднощів з технічною реалізацією, значно обмежують сферу їхнього використання, яка зводиться до випадків точок загального приєднання з явно вираженим одним домінуючим джерелом спотворення.

**Ключові слова:** якість електричної енергії; фактичний внесок; несиметрія напруг; несинусоїдальність напруг.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

## UDC 621.31

YU. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), D. M. KALYUZHNIY (NUUE)

State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universytetska Str. 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel: (0629) 44-65-51, e-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700)

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Department of Cities Electrical Power Supply, Ukraine, 61002, Kharkiv, 12 Revolutsii Str., tel.: (050)560-68-35, e-mail: [KalyuzhniyDN@mail.ru](mailto:KalyuzhniyDN@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-7374-0734](http://orcid.org/0000-0002-7374-0734)

## THE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE ACTUAL CONTRIBUTION TO LOWERING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER THROUGH ASYMMETRY AND NON-SINUSOIDAL VOLTAGE

The consumption and transmission of electric energy of lower quality cause the significant economic losses both at its customers and suppliers. In the event of such situation, the task of distributing the financial compensation for damages to the injured party between all parties that are guilty of lowering the quality of electricity is taken place.

The solution to this problem is based on the determination of the actual contributions of connections in the reduction of power quality at the point of common coupling. So far, there are many methods that are different both in the methodology and the technical implementation details. Due to the analysis of these methods that is being held, their classification is given, and the field of their application is defined. As a result, it is determined that the majority of the methods for determining the actual contribution to the reduction of interconnection of electric power quality at the point of common coupling is based on the use of their mathematical models of linear expansion equivalent circuits of the electrical network into individual harmonic and symmetrical components. This fact determines their main disadvantage; it is the ignorance of the mutual influence of sources of distortion on each other. The obtaining of additional information for these methods about the parameters of equivalent circuits of the electrical network in the coordinates different from phase ones cause the difficulties both of methodological and technical nature.

Methods for determining the parameters of the equivalent circuits that characterize the sources of distortion on results of measurement of the network parameters of the operating mode are designed for one of the extreme cases when the change of source state distortion takes place only in one of them. The current disadvantages of the examined methods that don't have difficulties in its technical implementation, significantly limit their field of application that reduces to the point of common coupling with one implied dominant source of distortion.

**Keywords:** power quality; the actual contribution; voltage asymmetry; voltage nonsinusoidality.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. Н., 2015