

УДК 621.311

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ГАРМОНИК НА ПРИМЕРЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Волошко Анатолий Васильевич,

д-р техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский Политехнический Институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Филянин Даниил Владимирович,

аспирант кафедры электроснабжения Института энергосбережения и энергоменеджмента Национального технического университета Украины «Киевский Политехнический Институт», Украина, 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115. E-mail: dany@nm.ru

Актуальность работы обусловлена изменившейся структурой электропотребления, связанной с ростом доли нелинейных нагрузок и необходимостью достоверного определения источников гармоник в распределительной сети для эффективного функционирования системы штрафов и санкций.

Цель работы: исследования по определению виновников искажения кривой напряжения в точке общего подключения на примере упрощенной модели системы электроснабжения.

Методы исследования. Режимы работы модели рассчитываются с помощью приложения Simulink, входящего в пакет программ Matlab 2014a. Для моделирования использовалась библиотека SimPowerSystem, в состав которой входят математические модели отдельных элементов электроэнергетического оборудования. При выборе параметров модели распределительной сети использовались активные сопротивления, моделирующие кабельные линии и нагрузки, для упрощения расчетов. Для определения величины и знака мощности гармоник применялось преобразование Фурье.

Результаты исследования. Проведен обзор существующих методов определения виновников нарушения синусоидальности кривой напряжения в точке общего подключения распределительной сети, определены их достоинства и недостатки. На примере упрощенной модели системы электроснабжения проведены измерения знака и величины мощности гармоник в точке общего подключения и на клеммах потребителей для искажающих и неискажающих нагрузок. По результатам измерений определены отличия в значениях измеренных мощностей гармоник в точке общего подключения и на клеммах потребителей. Определены некоторые признаки наличия источников высших гармоник в нагрузке потребителей. Предложен новый подход к определению источников гармоник в распределительной сети по методу, основанному на измерении знака и величины искажающей мощности, согласно которому рекомендуется перенести точку измерения мощности гармоник из точки общего подключения на клеммы потребителя.

Ключевые слова:

Качество электроэнергии, гармоники, мощность искажения, коэффициент гармоник, источник искажения.

Введение

Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения (СЭС), то есть к появлению гармоник тока и напряжения. При этом энергосистема обязана поставлять электроэнергию только основной частоты 50 Гц с постоянной амплитудой.

Проблема гармоник в СЭС не нова. Еще в 30-х гг. XX в. в генераторах наблюдались искажения кривых тока и напряжения. Воздействие гармоник чревато нарушением работы энергетического оборудования и вредным воздействием на электроприемники потребителя. Некоторые последствия воздействия гармоник включают в себя [1, 2]:

1. Выход из строя батарей конденсаторов. При превышении гармониками тока допустимых уровней конденсаторные батареи не меняют своих характеристик, но быстро выходят из строя.

2. Влияние на системы передачи данных по силовым сетям. Гармоники представляют собой помеху несущей частоте аппаратуры передачи данных по силовым сетям, что вызывает потерю данных и некорректную работу удаленного оборудования, использующего такой тип связи.
3. Большие потери и перегрев синхронных и асинхронных машин.
4. Увеличение напряжений и токов гармоник в сети из-за последовательного или параллельного резонансов.
5. Пробой изоляции кабельных линий в результате перенапряжений, вызванных гармониками.
6. Помехи, создаваемые телекоммуникационным системам.
7. Влияние на точность приборов учета электроэнергии [3].
8. Нарушение работы устройств защиты или ухудшение их характеристик. Особенно чувствительны к гармоникам полупроводниковые и микропроцессорные системы.

9. Влияние на частотно-регулируемые приводы и системы возбуждения генераторов электростанций.
10. Вибрации вала асинхронных и синхронных машин.
11. Нестабильная работа цифровых реле, использующих в своей работе алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или определении точки пересечения нуля сигналами напряжения или тока.

Последствия воздействия гармоник также зависят от источника гармоник, его расположения в СЭС и характеристик сети [1]. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их фазового угла по отношению к основной гармонике [2].

По оценке европейских научно-исследовательских учреждений, в результате низкого качества электрической энергии в промышленности происходит потеря более 150 млрд евро в год. Из них на долю гармоник приходится 1,3 млрд евро [4]. Но если взять во внимание воздействие гармоник на аппаратуру релейной защиты и связанные с этим возможные отключения потребителей, то ущерб может составить суммы большего порядка – до 100 млрд евро [4].

Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей [2]. Эти документы не учитывают состав оборудования СЭС и, соответственно, ущерб, который могут нанести гармоники сетевому оборудованию и оборудованию потребителя.

Убытки, которые несут субъекты процесса распределения электрической энергии от ухудшения ее качества сверх допустимых норм [5, 6], должны оплачиваться виновниками нарушения качества. Для этого необходимо определить источники гармоник и оценить степень участия каждого в нарушении синусоидальности, чтобы с помощью системы штрафов и санкций стимулировать потребителя, искажающего параметры качества электроэнергии, устанавливать у себя компенсирующее оборудование.

Анализ литературных источников

На сегодняшний день нет общепринятого метода для обнаружения виновников нарушения синусоидальности напряжения [7].

В литературных источниках [8–12] можно выделить две группы подходов к определению источников искажений кривой напряжения в точке общего подключения (ТОП) [13]:

1. Группа, основанная на измерениях в ТОП с известным или неизвестным сопротивлением сети и потребителя.
2. Группа, основанная на измерениях, взятых в различных точках системы электроснабжения, с использованием методик оценки состояния системы [14].

Вторая группа подходов по определению источника гармоник используется для системообразующих сетей и предполагает сложные алгоритмы оптимизации размещения датчиков по всей системе энергоснабжения для оценки источников искажений (например, [15]).

Нас же интересует распределительная сеть, древовидная структура которой с единственным источником питания отличает их от сложноманкнутых системообразующих сетей и предопределяет направление потока мощности первой гармоники [16]. Вопрос об оптимизации размещения точек контроля не стоит, так как надо контролировать каждого субъекта СЭС (по аналогии с учетом потребления электроэнергии).

Рассмотрим методы определения источника искажения, относящиеся к первой группе:

1. Методы, основанные на определении знака и значения мощности гармоники, генерируемой источником высших гармоник [17]:

$$P_i = \frac{U_{ic} I_{ic} + U_{is} I_{is}}{2}; \quad Q_i = \frac{U_{ic} I_{is} - U_{is} I_{ic}}{2},$$

где P_i , Q_i – активная и реактивная мощности i -й гармоники; U_{ic} , U_{is} – косинусная и синусная составляющая амплитуды напряжения i -й гармоники; I_{ic} , I_{is} – косинусная и синусная составляющая амплитуды тока i -й гармоники.

2. Метод деформирующей и не деформирующей нагрузки (deforming and non-deforming load) [18], согласно которому измеренный ток $i(t)$ является суммой не деформирующего $i_n(t)$ и деформирующего $i_d(t)$ токов:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \theta_k + k(\varphi_1 - \theta_1)),$$

$$i_d(t) = i(t) - i_n(t),$$

где U_1 , I_1 – действующие значения напряжения и тока первой гармоники; θ_1 , φ_1 – фазы тока и напряжения первой гармоники; θ_k – фаза k -й гармоники напряжения.

3. Метод искажающего и не искажающего тока (distorted and non-distorted current) [19]. Нагрузка представляется в виде эквивалентного линейного сопротивления первой гармонике:

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1},$$

где U_1 , I_1 – действующие значения напряжения и тока первой гармоники, измеренные в ТОП.

Тогда

$$R = |Z_1| \cos \varphi_1, \quad X_1 = |Z_1| \sin \varphi_1, \quad L = \frac{X_1}{2\pi f_1},$$

где R – активная составляющая сопротивления нагрузки; X_1 – реактивное сопротивление нагрузки первой гармонике; φ_1 – разность фаз между векторами напряжения и тока первой гармоники; f_1 – частота сети (50 Гц); L – расчетная индуктивность нагрузки.

Расчетное сопротивление нагрузки гармоникам:

$$X_k = 2\pi k f_1 L,$$

где k – порядок гармоники.

Предполагая, что R не зависит от частоты и без учета поверхностного эффекта:

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X_k^2},$$

$$\varphi_k = tg^{-1} \frac{X_k}{R}.$$

Ток, потребляемый идеальной линейной нагрузкой:

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{|Z_k|} \sqrt{2} \sin(2\pi k f_1 t + (\theta_k - \varphi_k)),$$

где θ_k – фаза вектора напряжения k -й гармоники; φ_k – разность фаз между векторами напряжения и тока k -й гармоники.

Разница между измеренным током и расчетным идеальным током называется нелинейным током:

$$i_{nL}(t) = i(t) - i_L(t),$$

где $i(t)$ – измеренный ток.

Сравнительный анализ этих методов определения источника искажения приведен в [13].

В вышеописанных методах определения источника гармоник все измерения проводятся в точке общего подключения. Второй и третий из перечисленных методов определения виновника искажения кривой напряжения в ТОП исходят из предположения линейности сопротивления нагрузки на всех частотах, что является не совсем корректным. Например, наличие фильтров высших гармоник сводит на нет это предположение. Более универсальным представляется метод определения знака и значения мощности гармоники, генерируемой источником гармоник, поскольку там используются только измеренные величины без каких-либо предположений. Недостатком метода определения источника искажения по знаку и величине мощности гармоники является отсутствие учета взаимных потоков искажающей мощности, возникающих при наличии нескольких источников искажения в СЭС [20]. В самом деле, ЭДС источников гармоник может иметь разную величину и внутреннее сопротивление. При измерении коэффициентов гармоник напряжения в ТОП мы получаем какую-то суммарную величину – результирующее значение всех источников искажения в сети.

По анализу литературных источников можно сделать вывод, что ни один из методов определения источников гармоник в СЭС не позволяет достоверно определить всех участников искажения кривой напряжения в ТОП. Следовательно, для полноценного функционирования системы штрафов и санкций за нарушение показателей качества электроэнергии остается актуальной проблема достоверного определения источников гармоник в СЭС.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы являются исследования по определению виновников искажения кривой напряжения в точке общего подключения.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- создать упрощенную схему СЭС с несколькими источниками гармоник;
- провести измерения величины и знака мощности гармоник, в ТОП и на клеммах потребителя;
- по результатам измерений сделать выводы.

Определение источников гармоник на примере упрощенной модели системы электроснабжения

Рассмотрим упрощенную схему распределительной сети с исключительно активными сопротивлениями линии и нагрузки (рис. 1).

ЭДС E_1 , E_2 и сопротивления нагрузки R_1 , R_2 образуют источник искажения, в котором R_1 и R_2 играют роль внутреннего сопротивления. Для примера взята 3-я гармоника, как наиболее распространенная и значимая по величине.

Было проведено два цикла измерений величины и знака мощности 3-й гармоники и коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения. В обоих случаях ЭДС искажения E_1 зафиксирована на уровне 3кВ с фазой 0° (совпадает с фазой ЭДС первой гармоники). В первом цикле ЭДС искажения E_2 изменяется от нуля до 3кВ с фазой 0° (E_1 и E_2 синфазны). Во втором – ЭДС искажения E_2 также изменяется от нуля до 3кВ, но с фазой 180° (E_1 и E_2 противофазны). Измерения проводились в ТОП (точки 1, 2, p) и на клеммах потребителя (точки 1', 2', p'). Результаты первого цикла приведены на рис. 2 и в табл. 1. Результаты второго – на рис. 3 и в табл. 2.

Таблица 1. Зависимость коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения от величины E_2 при синфазных E_1 и E_2

Table 1. Dependence of the coefficients of the third current and voltage harmonic on the value E_2 at in-phase E_1 and E_2

E2 В	$K_{3U_{\text{ном}}}$	K_{3U_1}	K_{3I}	K_{3U_2}	K_{3I}	K_{3U_p}	K_{3I_p}
	%						
3000	1,76	2,42	30,88	2,42	30,88	1,76	1,76
2000	1,47	2,12	31,18	1,91	20,29	1,47	1,47
1500	1,32	1,98	31,32	1,65	15,00	1,32	1,32
1000	1,18	1,83	31,47	1,39	9,71	1,18	1,18
750	1,10	1,76	31,54	1,27	7,06	1,10	1,10
500	1,03	1,68	31,62	1,14	4,41	1,03	1,03
250	0,96	1,61	31,69	1,01	1,76	0,96	0,96
200	0,94	1,59	31,71	0,98	1,24	0,94	0,94
150	0,93	1,58	31,72	0,96	0,71	0,93	0,93
100	0,91	1,56	31,74	0,93	0,18	0,91	0,91
75	0,90	1,56	31,74	0,92	0,09	0,90	0,90
50	0,90	1,55	31,75	0,91	0,35	0,90	0,90
0	0,88	1,54	31,76	0,88	0,88	0,88	0,88

По результатам первого цикла измерений можно заметить существенную разницу в величинах вто-

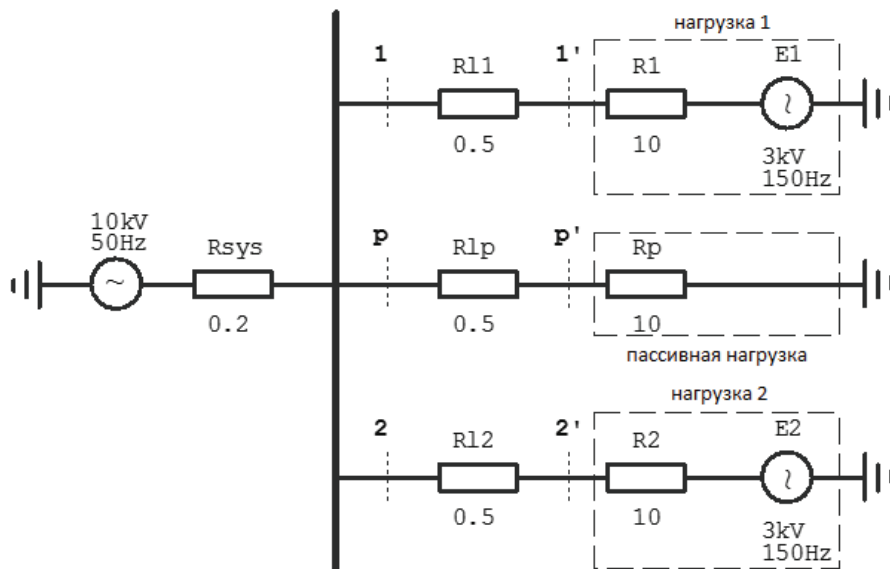


Рис. 1. Упрощенная схема распределительной сети с двумя источниками искажения $E1$ и $E2$, где R_{sys} – сопротивление системы; $R1$, $R2$, R_p – сопротивления нагрузки 1, нагрузки 2 и пассивной нагрузки; $Rl1$, $Rl2$, Rlp – сопротивление линий, питающих нагрузку 1, нагрузку 2 и пассивную нагрузку; $E1$, $E2$ – ЭДС 3-й гармоники, генерируемой в нагрузке 1 и нагрузке 2, соответственно

Fig. 1. Simplified diagram of a distribution network with two distortion sources $E1$ and $E2$, where R_{sys} is the system resistance; $R1$, $R2$, R_p are the resistances of the load 1, load 2 and passive load; $Rl1$, $Rl2$, Rlp are the resistances of the line supplying the load 1, load 2 and passive load; $E1$, $E2$ are the EMF of the third harmonic generated in the load 1 and the load 2, respectively

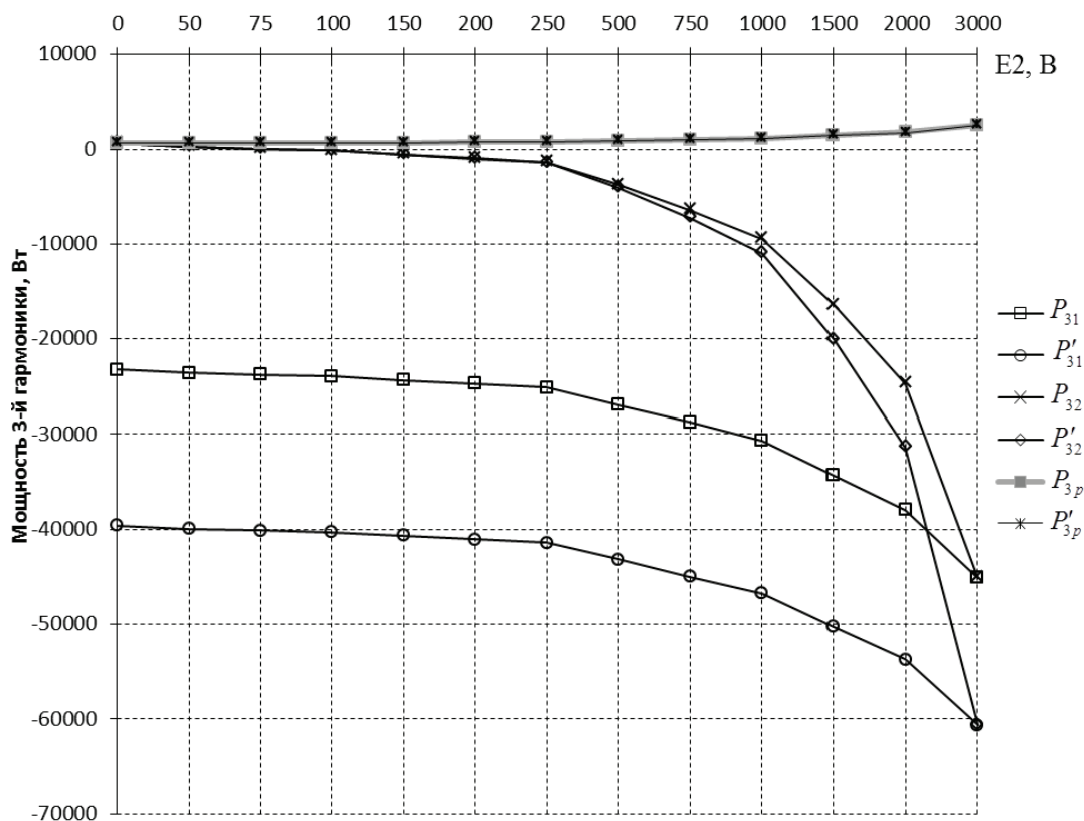


Рис. 2. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины $E2$ при синфазных $E1$ и $E2$, где P_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2'; P_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p; P'_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p'

Fig. 2. Dependence of the third harmonic power on value $E2$ at in-phase $E1$ and $E2$, where P_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1; P'_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1'; P_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2; P'_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2'; P_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p; P'_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p'

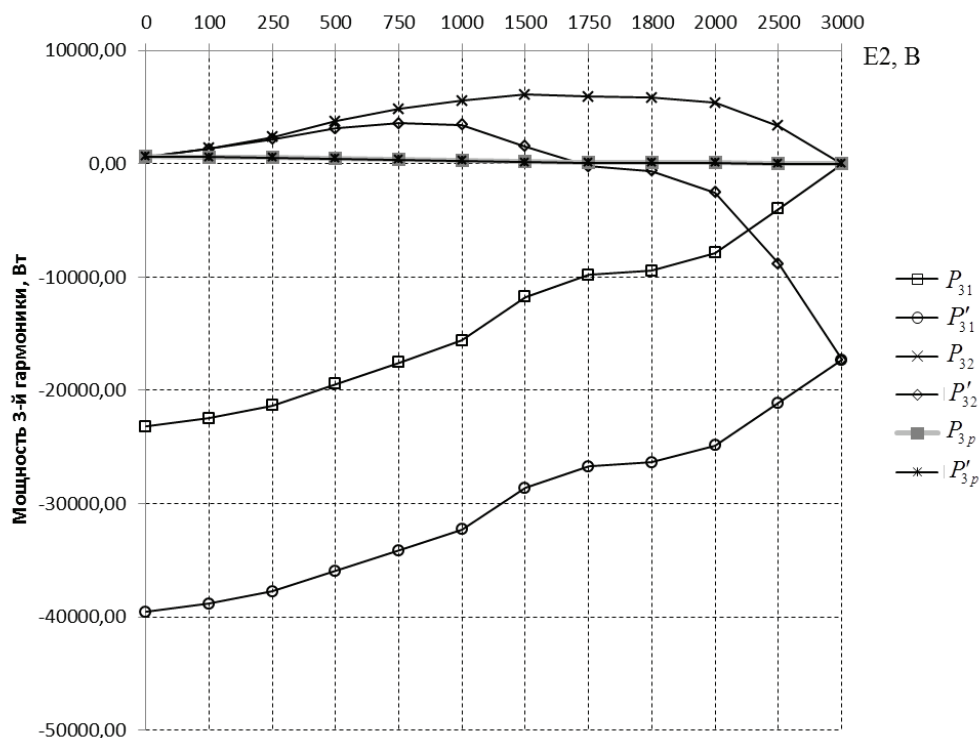


Рис. 3. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины E2 при противофазных E1 и E2, где P_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2'; P_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p; P'_{3p} – мощность 3-й гармоники, измеренная в точке p'

Fig. 3. Dependence of the third harmonic power on the value E2 at antiphase E1 and E2, where P_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1; P'_{31} is the power of the third harmonic measured in the point 1'; P_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2; P'_{32} is the power of the third harmonic measured in the point 2'; P_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p; P'_{3p} is the power of the third harmonic measured in the point p'

ричных мощностей 3-й гармоники, измеренных в ТОП и на клеммах потребителя. Это связано с потерями на сопротивлениях питающих линий. Также стоит обратить внимание на соотношения P_{31}/P_{32} и P'_{31}/P'_{32} . Из графика видно, с уменьшением величины искажающей ЭДС E2 долевое участие искажающей нагрузки 1 по результатам измерений на клеммах потребителя (точки 1' и 2') существенно выше, чем по измерениям в ТОП (точки 1 и 2). В случае синфазных искажающих ЭДС коэффициенты 3-й гармоники напряжения на клеммах искажающих потребителей K_{3U_1} и K_{3U_2} будут всегда выше коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициенты 3-й гармоники тока и напряжения на клеммах пассивной нагрузки (K_{3I_p} , K_{3U_p}) равны коэффициенту 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. По данным табл. 1 можно сделать вывод, что в случае синфазных искажающих ЭДС E1 и E2 признаком наличия источника искажения в нагрузке является превышение коэффициентами 3-й гармоники напряжения на клеммах потребителя K_{3U_1} и K_{3U_2} , значение коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициент 3-й гармоники тока на клеммах искажающего потребителя для случая синфазных искажающих ЭДС E1 и E2 может быть ниже коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП (выделенный фрагмент в табл. 1).

Таблица 2. Зависимость коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения от величины E2 при противофазных E1 и E2

Table 2. Dependence of the coefficients of the third current and voltage harmonic on the value E2 at antiphase E1 and E2

E2 В	$K_{3I_{\text{кон}}}$	K_{3U_1}	K_{3I_1}	K_{3U_2}	K_{3I_2}	K_{3U_p}	K_{3I_p}
	%						
3000	0,00	0,65	32,65	0,65	32,65	0,00	0,00
2500	0,15	0,80	32,50	0,40	27,35	0,15	0,15
2000	0,29	0,95	32,35	0,14	22,06	0,29	0,29
1800	0,35	1,01	32,29	0,04	19,94	0,35	0,35
1750	0,37	1,02	32,28	0,01	19,41	0,37	0,37
1500	0,44	1,09	32,21	0,11	16,76	0,44	0,44
1000	0,59	1,24	32,06	0,37	11,47	0,59	0,59
750	0,66	1,31	31,99	0,50	8,82	0,66	0,66
500	0,74	1,39	31,91	0,63	6,18	0,74	0,74
250	0,81	1,46	31,84	0,75	3,53	0,81	0,81
100	0,85	1,51	31,79	0,83	1,94	0,85	0,85
0	0,88	1,54	31,76	0,88	0,88	0,88	0,88

Случай с противофазными искажающими ЭДС E1 и E2 представляется более интересным. При их равенстве коэффициент 3-й гармоники напряжения в ТОП равен нулю. Соответственно, мощность искажения потребителей при измерениях в ТОП тоже равна нулю. То есть искажающие токи текут от од-

ного искажающего источника к другому, а искажающая мощность отсутствует. Также интересно заметить, что при незначительном уменьшении ЭДС Е2, искажающая нагрузка 2, судя по измерениям в ТОП, превращается в потребителя, притом более «страдающего» от искажения, чем просто пассивная нагрузка. В случае противофазных искажающих ЭДС коэффициенты 3-й гармоники тока искажающих потребителей K_{3I_1} и K_{3I_2} будут выше коэффициента гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициенты 3-й гармоники тока и напряжения на клеммах пассивной нагрузки (K_{3I_p} , K_{3U_p}) равны коэффициенту 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. По данным табл. 2 можно сделать вывод, что в случае противофазных искажающих ЭДС Е1 и Е2 признаком наличия источника искажения в нагрузке является превышение коэффициентами 3-й гармоники тока на клеммах потребителя K_{3I_1} и K_{3I_2} , значение коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП $K_{3U_{\text{ТОП}}}$. Коэффициент 3-й гармоники напряжения для случая противофазных искажающих ЭДС Е1 и Е2 на клеммах искажающего потребителя может

быть ниже коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП (выделенный фрагмент в табл. 2).

Выводы

1. Для определения виновника искажения кривой напряжения в ТОП наиболее универсальным является метод на основе измерения величины и знака искажающей мощности.
2. Измерения искажающей мощности в ТОП не позволяют достоверно определить всех виновников искажения из-за одинакового значения напряжения соответствующей гармонической составляющей для всех потребителей.
3. При определении виновника искажения кривой напряжения в ТОП измерение вторичной мощности гармоник необходимо проводить не в точке общего подключения, а в точке передачи энергии, то есть на клеммах потребителя.
4. Требуется подготовка технико-экономического обоснования для установки дополнительного измерительного оборудования в точке передачи электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / ed. by Prof. G. Romero. InTech. 2011. 290 p. URL: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurements-data> (дата обращения: 05.02.2015).
2. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
3. Волошко А.В., Филянин Д.В. Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований // Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вып. 4/2014 (87). – С. 38–43.
4. Manson J., Targosz R. European Power Quality Survey Report. November 2008. URL: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSurvey.pdf> (дата обращения: 12.11.2014).
5. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 18.06.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 30 с.
6. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2013. – М: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
7. IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. March 2010. IEEE Standard 1459. – 40 p.
8. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems // European Transactions on Electric Power. – 1996. – V. 6. – № 6. – P. 401–406.
9. Czarnecki L.S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement // IEEE Trans. Instrum. Measur. – 1990. – V. 39. – № 2. – P. 340–345.
10. Emanuel A. E.: On the Assessment of Harmonic Pollution // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1995. – V. 10. – № 3. – P. 1693–1698.
11. Rens P.J., Swart P.H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification // ETEP. – 2001. – V. 11. – № 5. – P. 317–322.
12. Swart P.H., Case M.J., Van Wyk J.D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks // ETEP. – 1994. – V. 4. – № 6. – P. 485–490.
13. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems / R.S. Herrera, A. Pérez, P. Salmerón, J.R. Vázquez, S.P. Litrán. URL: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (дата обращения: 13.11.2014).
14. Heydt G.T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique // IEEE Trans. On Power Delivery. – 1989. – V. 4. – № 1. – P. 569–576.
15. Beites L.F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). – Cordoba, Spain, 8–10 April, 2014. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (дата обращения: 13.11.2014).
16. Степанов А.С., Маругин В.И. О наблюдаемости распределительных электрических сетей // Энергетика, экология, надежность, безопасность: матер. докладов XVI Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск, 8–10 декабря 2010. – Томск, Изд-во ТПУ, 2010. – С. 46–48.
17. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии // Электричество. – 1992. – № 11. – С. 13–19.
18. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1996. – V. 11. – № 2. – P. 1003–1012.
19. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions / A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V.G. Monopoli, P. Zanchetta // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – № 3. – P. 1284–1290.
20. Сендерович Г.А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений. // Наукові праці Донецького Національного Технічного Університету. – 2011. – № 11 (186). – С. 330–335.

Поступила 10.02.2015 г.

UDC 621.311

ON THE ISSUE OF DISTORTION SOURCE IDENTIFICATION ON THE EXAMPLE OF A SIMPLIFIED MODEL OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Anatoly V. Voloshko,

Institute of Energy Saving and Energy Management within National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», 115, Boorshchagovskaya street, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: a-voloshko@yandex.ua

Daniel V. Filyanin,

Institute of Energy Saving and Energy Management within National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», 115, Boorshchagovskaya street, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: dany@nm.ru

The relevance of the research is caused the changed structure of energy consumption associated with the increase in the proportion of non-linear loads and the need to reliable determination of distortion sources in the distribution network for the effective functioning of the system of penalties and sanctions.

The main aim of the study is to determine the sources of stress curve distortion in the point of common coupling on the example of a simplified model of electric power system.

The methods used in the study. The operating modes of the model are calculated using the Simulink application, included in the software package Matlab 2014a. To build the model the authors used a simulation library SimPowerSystem, which includes mathematical models of individual elements of power equipment. When selecting the model parameters of the distribution network the active resistances that simulate cable line and load, were used to simplify the calculations. To determine the magnitude and sign of harmonic power flux the Fourier transform was applied.

The results. The authors carried out the review of the existing methods for identification of distortion sources in the point of common coupling of the distribution network; their advantages and disadvantages were defined. On the example of a simplified model of electric power system the authors measured the sign and magnitude of the power of distortion sources in the point of common coupling and at the terminals of consumers with non-distortion and distortion loads. According to the results of the measurements the differences in the values of secondary harmonic power in the point of common coupling and at the terminals of consumers were defined. The authors identified some features of the distortion sources presence in the load and proposed a new approach to identify the sources of harmonics by using a harmonic power flux sense method, according to which it is recommended to move the point of measuring of the secondary harmonic power from the point of common coupling to terminals of consumers.

Key words:

Power quality, harmonics, distortion power, total harmonic distortion, distortion source.

REFERENCES

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data. Ed. by Prof. G. Romero. *InTech*. 2011. 290 p. Available at: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurements-data> (accessed 05 February 2015).
2. Kharlov N.N. *Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in power industry]. Tomsk, TPU Publ. House, 2007. 207 p.
3. Voloshko A.V., Filyanin D.V. Vliyanie kachestva elektroenergii na tochnost pokazaniy elektroschetchnikov: obzor issledovaniy [The impact of power quality on the accuracy of meter reading: a review of study]. *Transactions of Kremenchuk Mikhailo Ostrohradskiy National University*, 2014, vol. 4 (87), pp. 38–43.
4. Manson J., Targosz R. *European Power Quality Survey Report*. November 2008. Available at: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSsurvey.pdf> (accessed 12 November 2014).
5. GOST 13109–97. *Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh ekektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109–97. Quality standards of electrical energy in power systems for general use]. Minsk, 1999. 30 p.
6. GOST R 54149–2010. *Elektricheskaya energiya. Sovместimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh ekektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109–97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2012. 16 p.
7. *IEEE Std 1459–2010. Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions*. March 2010. IEEE Standard 1459. 40 p.
8. Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R. Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems. *European Transactions on Electric Power*, 1996, vol. 6, no. 6, pp. 401–406.
9. Czarnecki L.S., Świetlicki T. Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement. *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, 1990, vol. 39, no. 2, pp. 340–345.
10. Emanuel A. E.: On the Assessment of Harmonic Pollution. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 1693–1698.
11. Rens P.J., Swart P.H. On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification. *ETEP*, 2001, vol. 11, no. 5, pp. 317–322.
12. Swart P.H., Case M.J., Van Wyk J.D. On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks. *ETEP*, 1994, vol. 4, no. 6, pp. 485–490.
13. Herrera R.S., Pérez A., Salmerón P., Vázquez J.R., Litrán S.P. Distortion Sources Identification in Electric Power Systems. Available at: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (accessed 13 November 2014).
14. Heydt G.T. Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1989, vol. 4, no. 1, pp. 569–576.
15. Beites L.F., Alvarez M., Díaz A. Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical net-

- works. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*. Cordoba, Spain, 8–10 April, 2014. Available at: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (accessed 13 November 2014).
16. Stepanov A.S., Marugin V.I. O nablyudaemosti raspredelitelnykh elektricheskikh setey [On the observability of electricity distribution networks]. *Energetika, ekologiya, nadezhnost, bezopasnost: materialy XVI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering, ecology, reliability, safety: Proc. of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 2010. pp. 46–48.
 17. Zykin F.A. Opredelenie stepeni uchastiya nagruzok v snizhenii kachestva elektricheskoy energii [Determining of impact consumers in the power quality distortion]. *Electrichestvo*, 1992, vol. 11, pp. 13–19.
 18. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 2, pp. 1003–1012.
 19. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V.G., Zanchetta P. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, vol. 19, no. 3, pp. 1284–1290.
 20. Senderovich G.A. Opredelenie dolevogo uchastiya subektov v otvetstvennosti za narushenie simmetrii napryazheniy [Determination of share participation of subjects in responsible in making unbalanced condition]. *Naukovi pratsi Donetskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu*, 2011, vol. 11 (186), pp. 330–335.

Received: 10 February 2015.