

УДК 519.6:536

Б.С. Сорока, д-р техн. наук, профессор; Н.В. Воробьев, канд. техн. наук, науч. сотр.

Институт газа НАН Украины

С.А.Хавин канд. техн. наук, доцент; Ю.А. Довбня

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ВТОРИЧНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

В работе представлены результаты сопоставительных экспериментальных исследований теплообмена и аэродинамики в высокотемпературных рекуператорах авторской и альтернативных конструкций. Исследования проводились на огневом стенде с целью сравнения характеристик опытных секций ВД гладкотрубных петлевых рекуператоров и образцов с интенсификаторами теплообмена различной геометрии: 1) конструкций SP со спиральными вставками, установленными по всей длине теплообменных труб (относительный шаг спиралей $\sigma = s/d = 4,0$). Такие рекуператоры соответствуют существующим зарубежным аналогам; 2) конструкции MD авторской разработки с гибкими крестообразными вставками – вторичными излучателями, установленными по всей длине теплообменных труб. Определены теплотехнические и теплогидравлические преимущества предложенных рекуператоров типа MD по сравнению с зарубежными конструкциями со спиральными вставками – турбулизаторами и традиционными отечественными гладкотрубными рекуператорами.

Ключевые слова: адиабатные вставки, вторичный излучатель, высокотемпературный рекуператор, интенсификация теплообмена, спиральный турбулизатор, теплогидравлическая эффективность.

Надійшла 25.02.2015

Received 25.02.2015

УДК 621.311

А. В. Волошко, д-р техн. наук, доцент, Д. В. Филянин

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Актуальность работы обусловлена необходимостью достоверного определения источников гармоник в распределительной сети для эффективного функционирования системы штрафов и санкций. В статье проведен обзор существующих методов определения виновников нарушения синусоидальности кривой напряжения в точке общего подключения распределительной сети. На примере упрощенной модели предложен новый подход к определению источников гармоник в распределительной сети по методу, основанному на измерении знака и величины искажающей мощности.

Ключевые слова: качество электроэнергии, гармоники, мощность искажения, коэффициент гармоник, источник искажения.

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

Проблема гармоник в СЭС не нова. Еще в 30-х годах XX-го века 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.

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 индукционных и синхронных машин.

11. Нестабильная работа цифровых реле, использующих в своей работе алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или определении точки пересечения нуля.

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 миллиардов евро в год. Из них на долю гармоник приходится 1.3 миллиарда евро [3]. 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 миллиардов евро [3].

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 [4], 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 [5].

В литературных источниках можно выделить две группы подходов к определению источников искажений кривой напряжения в точке общего подключения (ТОП) [6]:

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.

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 [7]).

Нас же интересуют распределительная сеть, древовидная структура которой с единственным источником питания отличает их от сложнотамкнутых системообразующих сетей и предопределяет направление потока мощности первой гармоники [8]. 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 [9]:

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

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) [10], согласно которому измеренный ток $i(t)$ является суммой не деформирующего $i_n(t)$ и деформирующего $i_d(t)$ токов:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_1}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1))$$

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

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) [11]. Нагрузка представляется в виде эквивалентного линейного сопротивления первой гармоники:

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

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

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

где R - активная составляющая сопротивления нагрузки; X_1 - реактивное сопротивление нагрузки первой гармоники; φ_1 - разность фаз между векторами напряжения и тока первой гармоники; f_1 - частота сети (50Гц); 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:

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

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

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 [6].

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 [12]. 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 (ТОП).

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.

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

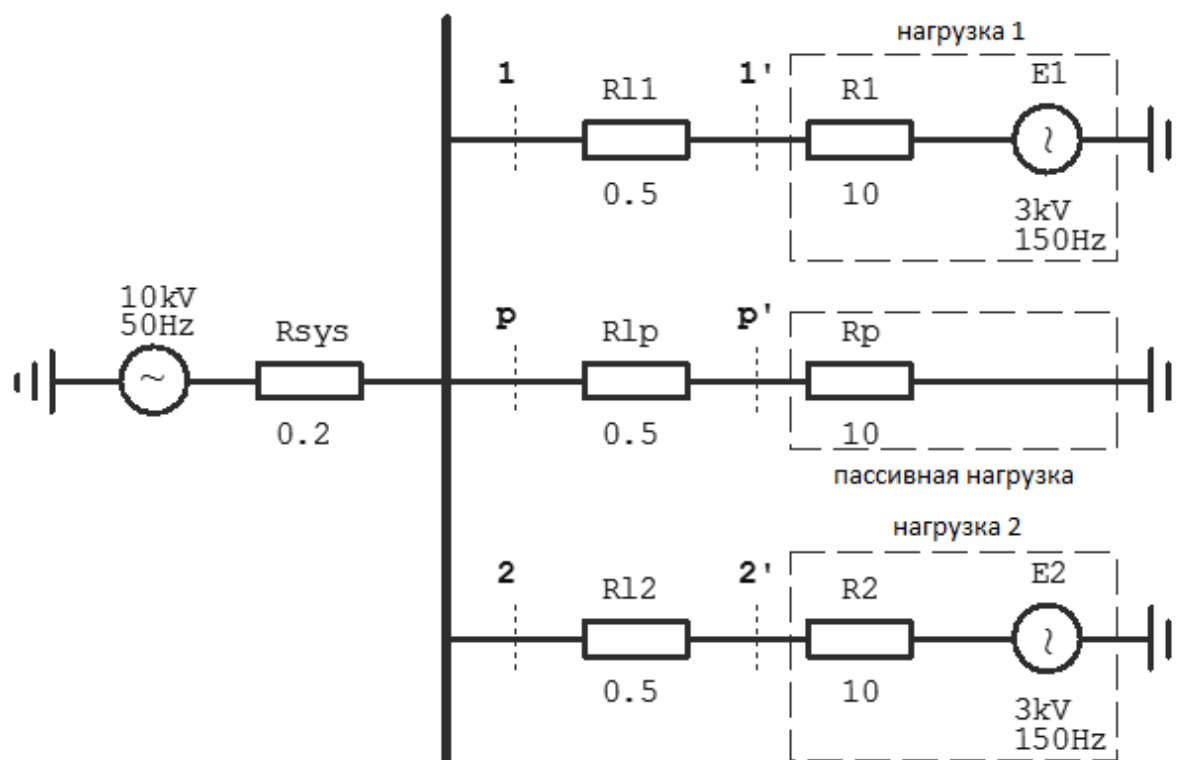


Рис.1. Упрощенная схема распределительной сети с двумя источниками искажения E1 и E2, где Rsys – сопротивление системы; R1, R2, Rp – сопротивления нагрузки 1, нагрузки 2 и пассивной нагрузки; R11, R12, R1p – сопротивление линий, питающих нагрузку 1, нагрузку 2 и пассивную нагрузку; E1, E2 – ЭДС 3-й гармоники, генерируемой в нагрузке 1 и нагрузке 2, соответственно.

ЭДС E1, E2 и сопротивления нагрузки R1, R2 образуют источник искажения, в котором R1 и R2 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 E1 зафиксирована на уровне 3кВ с фазой 0° (совпадает с фазой ЭДС первой гармоники). В первом цикле ЭДС искажения E2 изменяется от нуля до 3кВ с фазой 0° (E1 и E2 синфазны). Во втором – ЭДС искажения E2 также изменяется от нуля до 3кВ, но с фазой 180° (E1 и E2 противофазны). Измерения проводились в ТОП (точки 1, 2, p) и на клеммах потребителя (точки 1', 2', p'). Результаты первого цикла приведены на рисунке 2 и в таблице 1. Результаты второго – на рисунке 3 и в таблице 2.

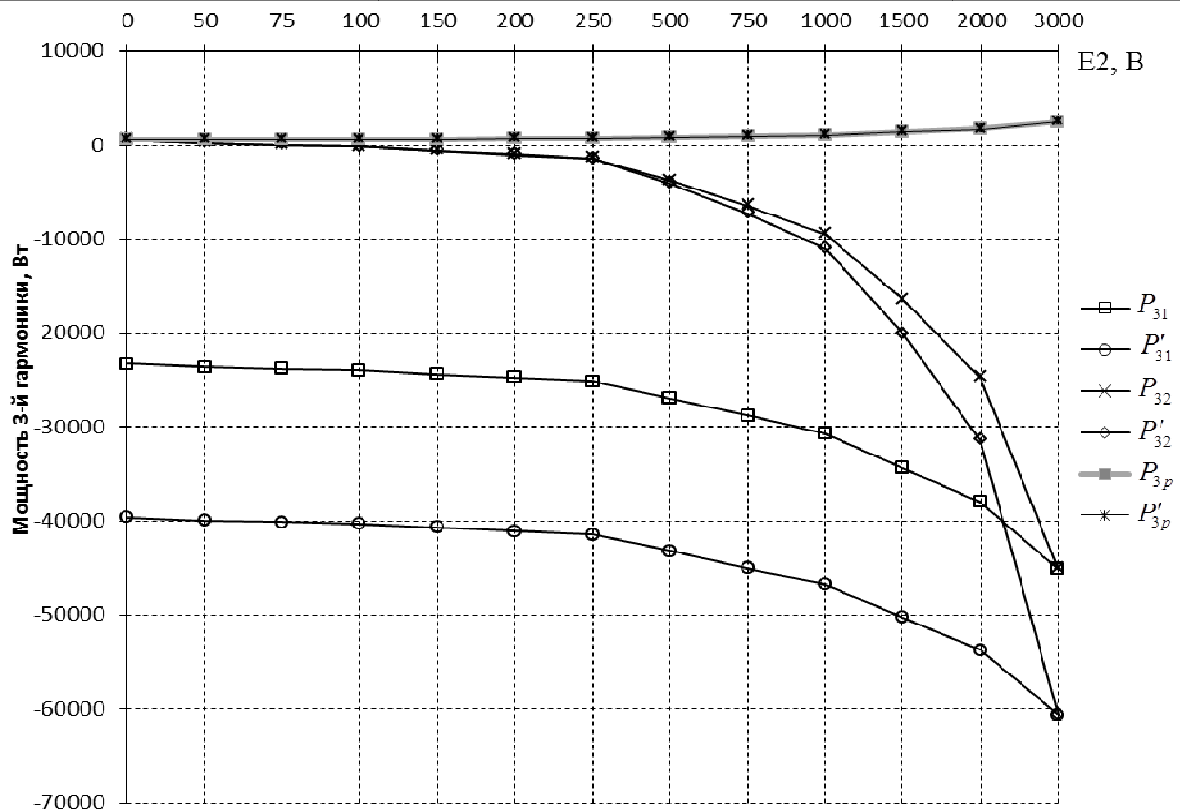


Рис. 2. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины E2 при синфазных E1 и E2, где P_{31} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке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

Таблица 1

Зависимость коэффициентов 3-й гармоники тока и напряжения от величины E2 при синфазных E1 и E2

E2 В	$K_{3U_{top}}$ %	K_{3U_1} %	K_{3I_1} %	K_{3U_2} %	K_{3I_2} %	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 вторичных мощностей 3-й гармоники, измеренных в ТОП и на клеммах потребителя. Это связано с потерями на сопротивлениях питающих линий. Так же 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 $K_{3U_{ТОП}}$. 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 $K_{3U_{ТОП}}$. По данным таблицы 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 $K_{3U_{ТОП}}$. 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 таблице 1).

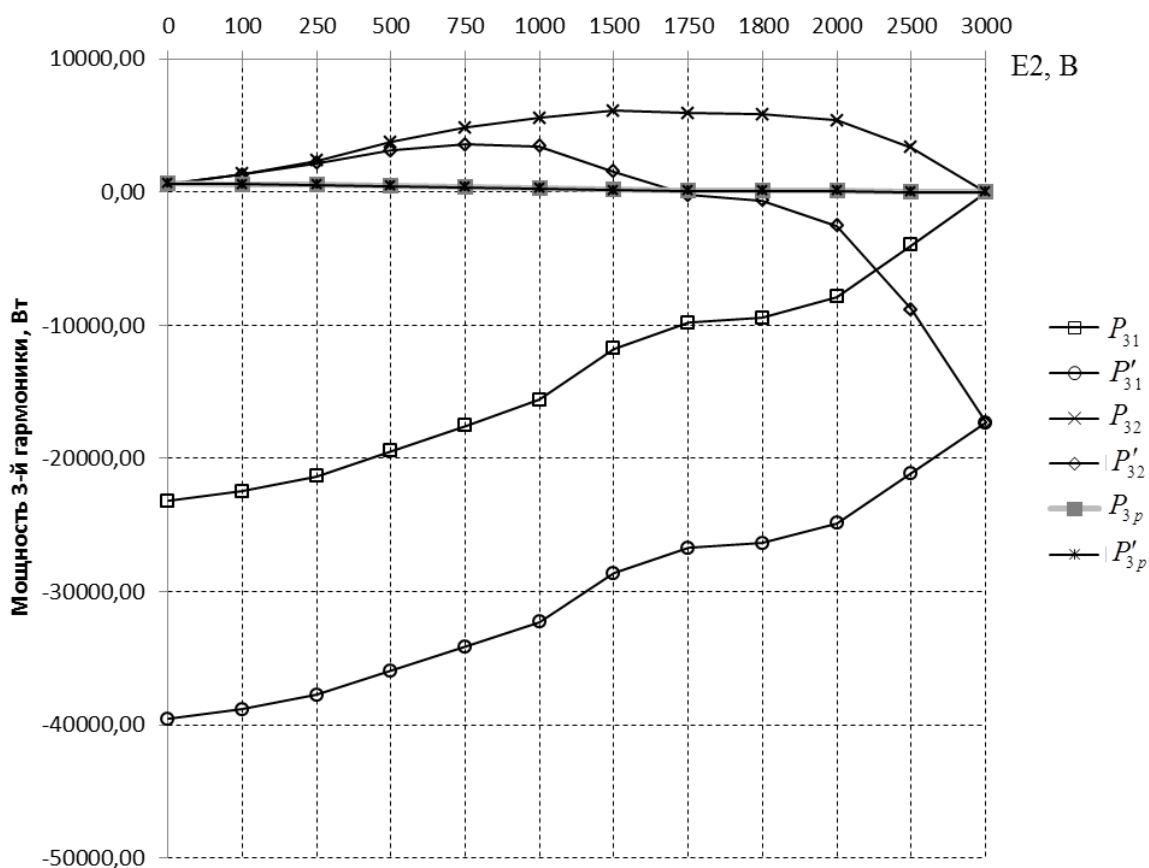


Рис. 3. Зависимость мощности 3-й гармоники от величины E2 при противофазных E1 и E2, где P_{31} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1; P'_{31} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 1'; P_{32} - мощность 3-й гармоники, измеренная в точке 2; P'_{32} - мощность 3-й гармоники, измеренная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

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

E2 В	$K_{3U_{TOP}}$ %	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 одного искажающего источника к другому, а искажающая мощность отсутствует. Также интересно заметить, что при незначительном уменьшении ЭДС E2, 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 $K_{3U_{TOP}}$. 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 $K_{3U_{TOP}}$. По данным таблицы 2 можно сделать вывод, что в случае противофазных искажающих ЭДС E1 и E2 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 $K_{3U_{TOP}}$. Коэффициент 3-й гармоники напряжения для случая противофазных искажающих ЭДС E1 и E2 на клеммах искажающего потребителя может быть ниже коэффициента 3-й гармоники напряжения в ТОП (выделенный фрагмент в таблице 2).

Выводы:

- для определения виновника искажения кривой напряжения в ТОП наиболее универсальным является метод на основе измерения величины и знака искажающей мощности;
- измерения искажающей мощности в ТОП не позволяют достоверно определить всех виновников искажения из-за одинакового значения напряжения соответствующей гармонической составляющей для всех потребителей;
- 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;
- 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 /edited by Prof. Gregorio Romero. - InTech, 2011. - P. 258 - ISBN 978-953-307-335-4
2. Харлов, Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Текст]: Учебное пособие/ Н. Н. Харлов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

3. Manson J., Targosz R. European Power Quality Survey Report. November 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSurvey.pdf> - 12.11.2014 г. – Загл. с экрана.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. - Введ. 18.06.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 30 с.
5. R. S. Herrera, A. Pérez, P. Salmerón, J. R. Vázquez, S. P. Litrán, «Distortion Sources Identification in Electric Power Systems» [Электронный ресурс] / Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University -Режим доступа: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf - 13.11.2014 г. – Загл. с экрана.
6. Luis F. Beites, Manuel Alvarez and Agustin Díaz, «Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks» [Электронный ресурс] / International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain), 8 th to 10 th April, 2014 – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> - 13.11.2014 г. – Загл. с экрана.
7. Степанов, А.С. О наблюдаемости распределительных электрических сетей [Текст] / А. С. Степанов, В. И. Маругин // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы докладов XVI Всероссийской научно-технической конференции, 8-10 декабря 2010 г. — Томск: Изд-во ТПУ - 2010 . - С. 46-48.
8. Зыкин, Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электрической энергии / Ф. А. Зыкин // Электричество -1992. - № 11. – С. 13-19.
9. Srinivasan, K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 11, No. 2, April 1996.
10. A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli y P.Zanchetta. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.
11. Сендерович, Г.А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений / Г. А. Сендерович // Наукові праці Донецького національного технічного університету – 2011. – №11(186). – С. 330 - 335.

A.V. Voloshko, D.V. Filyanin

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute»

DISTORTION SOURCE IDENTIFICATION IN THE POINT OF COMMON COUPLING ON THE EXAMPLE OF SIMPLIFIED MODEL OF ELECTRIC POWER SYSTEM

Urgency of the work driven by the need of reliable identification of distortion sources in the distribution network for the effective functioning of the system of penalties and sanctions.

In this paper a review of existing methods identification of distortion sources in the point of common coupling of the distribution network. On the example of a simplified model of the distribution network proposed a new approach to identify the sources of harmonics by using a harmonic power flux sense method.

Key words: power quality, harmonics, harmonic power, total harmonic distortion, distortion source.

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / edited by Prof. Gregorio Romero. - InTech, 2011. - P. 258 - ISBN 978-953-307-335-4
2. Kharlov N. N. Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in power industry]. Tomsk, 2007. 207 p.
3. 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/PQSurvey.pdf> (accessed 12 November 2014).
4. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah ekektrocnabgheniya obshchego naznacheniya [State Standard 13109-97. Quality standards of electrical energy in power systems for general use]. Minsk, 1999. 30 p.
5. R. S. Herrera, A. Pérez, P. Salmerón, J. R. Vázquez, S. P. Litrán, «Distortion Sources Identification in Electric Power Systems» / Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. Available at: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf (accessed 13 November 2014).
6. Luis F. Beites, Manuel Alvarez and Agustin Díaz, «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 th to 10 th April, 2014. Available at: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf> (accessed 13 November 2014).
7. Stepanov A.S., Marugin V.I. O nablyudaemosti raspredelitelyh elektricheskikh setey [On the observability of electricity distribution networks]. Energetika, ekologiya, nadezhnost, bezopasnost: materialy

XVI vsrossiyskoy naucho-tehnicheskoy konferentsii (Power engineering, ecology, reliability, safety: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference). Tomsk, 2010, pp. 46-48.

8. 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.

9. Srinivasan K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions // *IEEE Transaction On Power Delivery*. – 1996. – V.11. - №2.

10. A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli, P. Zanchetta. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2004. – V.19 - №3.

11. Senderovich G.A. Opredelenie dolevogo uchastiya sub'ektov v otvetstvennosti za narushenie simmetrii naprya zheniy [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.

УДК 621.311

А. В. Волошко, д-р техн. наук, доцент, **Д. В. Філянin**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ В ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО
ПІДКЛЮЧЕННЯ НА ПРИКЛАДІ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ**

Актуальність роботи обумовлена необхідністю достовірного визначення джерел гармонік в розподільній мережі для ефективного функціонування системи штрафів і санкцій. У статті проведено огляд існуючих методів визначення винуватців порушення синусоїдальності кривої напруги в точці загального підключення розподільної мережі. На прикладі спрощеної моделі запропоновано новий підхід до визначення джерел гармонік в розподільній мережі за методом, заснованим на вимірюванні знаку і величини спотворюючої потужності.

Ключові слова: якість електроенергії, гармоніки, потужність спотворення, коефіцієнт гармонік джерело спотворення.

Надійшла 04.03.2015

Received 04.03.2015

УДК 621.311.1:621.9.263:681.51/54

В.П. Розен, д-р. техн. наук, професор; **В.П. Калинчик**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А.В. Мейта, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

В.Г.Скосырев, канд. техн. наук

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНО-ПОМОЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В работе рассматривается оптимизация режимов работы дробильно-помольного комплекса с применением численного моделирования объектов, входящих в состав комплекса. Моделирование позволяет установить время, необходимое для измельчения на каждой стадии помола и определить момент перехода от одной стадии к другой, что позволяет избежать излишних энергозатрат.

Ключевые слова: дробильно-помольный комплекс, оптимизация, модель, электропотребление.

Введение. Работа дробильно-помольного комплекса определяется несколькими десятками факторов, многие из которых имеют случайный характер. Каждому сочетанию факторов соответствует определенный технико-энергетический режим работы комплекса. Базой для создания модели дробильного комплекса являются модели его компонентов, используя которые возможно решение оптимизационной задачи [1]. В простейшем случае комплекс может быть представлен как два