

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### Компенсация высших гармоник тока при питании групп бытовых нелинейных электроприемников

Янченко С. А., Цырук С. А., кандидаты техн. наук  
НИУ “МЭИ”, Москва

С помощью эффектов неоднородности и ослабления экспериментально описаны явления компенсации высших гармоник тока при питании групп бытовых нелинейных электроприемников. Показано снижение уровня несинусоидальности тока при совместном подключении разнотипных электроприемников, а также при питании большого числа однотипных нелинейных нагрузок по одной линии. Для наиболее распространенных нелинейных электроприемников построены индивидуальные распределения векторов высших гармоник тока, характеризующие реакцию гармонической эмиссии тока на изменение уровня несинусоидальности напряжения питания. Предложены варианты сочетаний электроприемников, наиболее благоприятных для компенсации высших гармоник тока. Даны рекомендации по максимизации явлений компенсации высших гармоник тока в бытовых электрических сетях.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, нелинейный электроприемник, эффект ослабления, эффект неоднородности, компенсация высших гармоник, компактная люминесцентная лампа, источник вторичного электропитания, светодиодная лампа.

Неизбежный рост нагрузок бытовой электроники, сопровождаемый повышением уровня несинусоидальности напряжения питания из-за их нелинейных свойств, может приводить к различным негативным эффектам для электрооборудования. Поэтому необходимо исследовать режимы работы нелинейных электроприемников (ЭП) в бытовых сетях, выявлять факторы, наиболее сильно влияющие на результирующий уровень несинусоидальности напряжения питания, и разрабатывать рекомендации по оптимальной организации электроснабжения этих ЭП.

Вместе с тем рассмотрение функционирования отдельных нелинейных бытовых ЭП с источниками вторичного электропитания (ИВЭ) пусть и с резко несинусоидальной формой входного тока с точки зрения их влияния на сеть бесперспективно ввиду их малой единичной мощности, а значит, ничтожного влияния на сеть. Интерес вызывает анализ работы совокупностей ЭП с ИВЭ (например, компьютерных нагрузок или люминесцентного освещения офиса), характеризующихся распределенностью и высоким суммарным электропотреблением, а также исследование эффектов компенсации высших гармоник (ВГ) при разных уровнях несинусоидальности напряжения, сопротивлениях питающих линий, качественном составе соседних ЭП.

Уровень эмиссии ВГ тока ЭП с ИВЭ в составе группы нелинейных ЭП отличается от значения аналогичного параметра в случае индивидуального подключения ЭП. При этом характерны как повышенные, так и пониженные уровни несинусоидальности. В результате гармонические искажения суммарного тока питания группы ЭП ниже алгебраической суммы индивидуальных спектров ВГ ЭП этой группы. Влияние работы совокупности ЭП и несинусоидальности сетевого напряжения на гармонический состав суммарного тока описывается с помощью эффектов ослабления и неоднородности.

#### *Эффект ослабления*

При питании некоторого числа ЭП от одной линии уровень несинусоидальности напряжения в точке общего присоединения (ТОП) определяется не только качеством поставляемой электроэнергии, но и эмиссией ВГ тока подключенных ЭП. Протекая по питающей линии, токи ВГ отдельных ЭП создают на ее общем сопротивлении несинусоидальное падение напряжения, в итоге искажающее напряжение питания (рис. 1). Как следствие, ЭП питаются несинусоидальным напряжением и в зависимости от него изменяют свои токовые спектры ВГ. Так, при

“плоской” синусоиде напряжения форма кривой тока ЭП с ИВЭ представляет собой широкий импульс и соответственно содержит меньше ВГ тока, чем при “пиковой” синусоиде напряжения и характерном для нее узком импульсе тока. Подобные изменения токовых спектров особенно ярко выражены при питании групп однотипных ЭП со схожими топологиями. В общем случае они характеризуются эффектом ослабления (снижения уровня несинусоидальности кривой тока вследствие искажения кривой напряжения питания).

Количественно этот эффект при подключении  $N$  одинаковых ЭП выражается с помощью коэффициента ослабления [1]

$$AF_n = \frac{I_n^N}{NI_n^1}, \quad (1)$$

где  $I_n^N$  — результирующий ток  $n$ -й ВГ при одновременной работе  $N$  одинаковых ЭП;  $I_n^1$  — ток  $n$ -й ВГ единичного ЭП.

В качестве примера компенсации ВГ тока за счет эффекта ослабления рассмотрим случай одновременной работы 10 одинаковых источников питания (ИП) персональных компьютеров (ПК) с потребляемой мощностью 100 Вт от одной питающей линии (табл. 1). В зависимости от соотношения активной и индуктивной составляющих, а также значения сопротивления сети искажение тока при совместном питании группы ИП ПК и пересчете на каждый ЭП может быть ниже, чем искажение в случае индивидуального питания каждого ПК.

В качестве стандартного значения сопротивления сети  $R_s + jX_s$  выбрано сопротивление трансформатора, активная и индуктивная компоненты которого составляют 0,4 и 0,16 Ом соответственно.

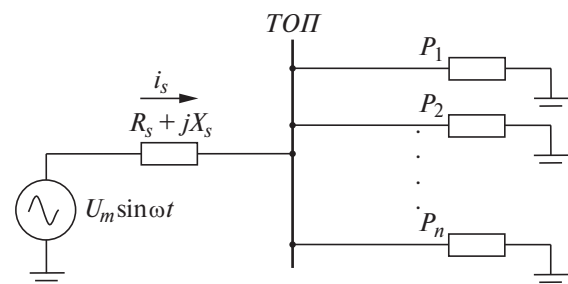


Рис. 1. Схема питания группы ЭП по линии с общим сопротивлением:

$U_m \sin \omega t$  — напряжение питания сети;  $R_s + jX_s$  — активно-индуктивное сопротивление сети;  $i_s$  — суммарный ток питания группы ЭП;  $P_n$  — потребляемая мощность  $n$ -го ЭП

В рамках экспериментальных исследований эффекта ослабления изменялось соотношение  $X_s/R_s$  (опыты № 1, 2), а также значение сопротивления питающей линии (опыт № 3), за счет чего значительно снизились уровни ВГ тока низких порядков. Одновременно вследствие большего падения напряжения увеличились значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  (до 7 %).

Из рис. 2, на котором представлены кривые напряжения 1 и тока 2 при  $X_s/R_s = 0,4$  (опыт № 3) в случае питания 1 (черные линии) и 10 (красные линии) ИП ПК, видно значительное ухудшение формы кривой напряжения при увеличении числа ЭП. При этом импульс тока питания 10 ПК шире, чем 1 ПК, что свидетельствует об улучшении синусоидальности тока питания группы ЭП.

### Эффект неоднородности

Возможная компенсация или суперпозиция векторов ВГ тока за счет разброса фазовых углов ЭП описывается с помощью эффекта неоднородности (снижения уровня несинусоидальности кривой тока вследствие

Таблица 1

№ опыта	$X_s/R_s$	$N$ , шт.	$I_3$ , А	$AF_3$	$I_5$ , А	$AF_5$	$I_7$ , А	$AF_7$	$I_9$ , А	$AF_9$	$I_{11}$ , А	$AF_{11}$	$K_U$ , %
1	0,16/0,4 = 0,4	10	3,23	<b>0,97</b>	1,68	<b>0,99</b>	0,52	<b>0,95</b>	0,34	<b>0,89</b>	0,28	<b>1,16</b>	<b>1,79</b>
		1	0,33	—	0,17	—	0,055	—	0,038	—	0,024	—	0,2
2	0,79/0,4 = 2	10	2,97	<b>0,9</b>	1,29	<b>0,77</b>	0,41	<b>0,77</b>	0,32	<b>0,88</b>	0,23	<b>0,9</b>	<b>6,91</b>
		1	0,33	—	0,17	—	0,054	—	0,037	—	0,026	—	0,58
3	0,79/2 = 0,4	10	2,79	<b>0,84</b>	1,12	<b>0,66</b>	0,33	<b>0,6</b>	0,28	<b>0,73</b>	0,19	<b>0,79</b>	<b>5,85</b>
		1	0,33	—	0,17	—	0,055	—	0,038	—	0,024	—	0,34

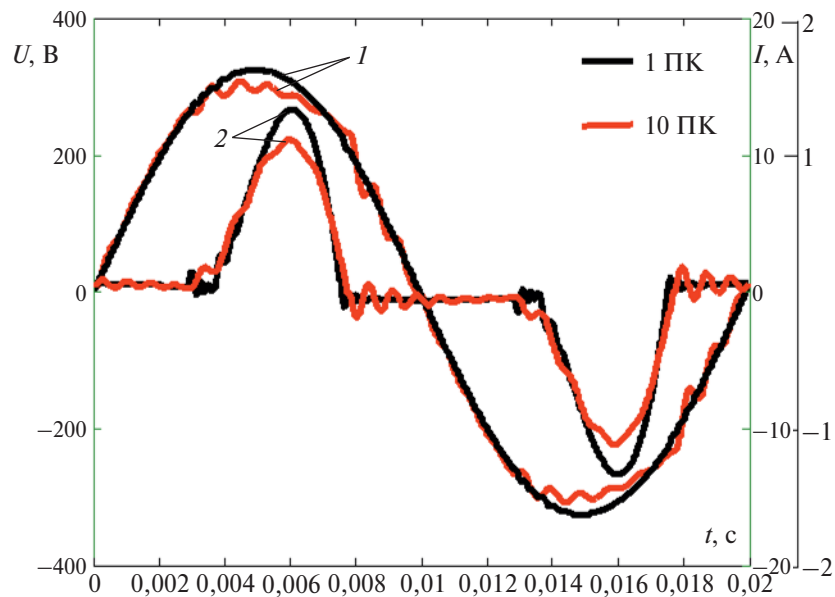


Рис. 2. Кривые напряжения и тока в случае питания 1 и 10 ПК при  $X_S/R_S = 0,4$

различия гармонических спектров токов питания ЭП). Количественно он характеризуется коэффициентом неоднородности [1]

$$DF_n = \frac{\left| \sum_{i=1}^N I_n^i \right|}{\sum_{i=1}^N |I_n^i|}, \quad (2)$$

где  $I_n^i$  — вектор  $n$ -й ВГ тока от  $i$ -го ЭП;  $N$  — число подключенных ЭП.

Таким образом, коэффициент неоднородности группы ЭП равен отношению векторной и алгебраической сумм ВГ тока от каждого ЭП.

Применительно к совокупностям однофазных нелинейных ЭП фазовая неоднородность векторов ВГ тока может быть обусловлена:

совместным подключением ЭП различных топологий, отличающихся по спектральному составу входного тока [2, 3];

при питании однотипных ЭП — изменениями количества ЭП, а также разными зна-

Таблица 2

Нагрузка (Вт)	$I_3$ , мА	$I_{3\Sigma}$ , мА	$DF_3$	$I_5$ , мА	$I_{5\Sigma}$ , мА	$DF_5$	$I_7$ , мА	$I_{7\Sigma}$ , мА	$DF_7$	$I_{15}$ , мА	$I_{15\Sigma}$ , мА	$DF_{15}$	$K_J$ , %
Смешанная:													
КЛЛ (11)	41,9	41,9	<b>1</b>	27,3	27,3	<b>1</b>	14,7	1,47	<b>1</b>	7	7	<b>1</b>	110
КЛЛ (24)	85,4	127,5	<b>1</b>	55,1	82,3	<b>0,999</b>	29	43,6	<b>0,998</b>	12,5	19,4	<b>0,99</b>	109,3
КЛЛ (30)	15,4	142,3	<b>0,997</b>	7,1	82	<b>0,92</b>	4,8	38,1	<b>0,79</b>	1	18,2	<b>0,89</b>	65,9
ИИП ПК (360)	191	180,5	<b>0,54</b>	120	74,7	<b>0,36</b>	62,5	99,8	<b>0,9</b>	12,1	21	<b>0,64</b>	46,7
Однотипная:													
КЛЛ (7)	31,8	31,8	<b>1</b>	19,5	1,95	<b>1</b>	10	10	<b>1</b>	4,7	4,7	<b>1</b>	104
КЛЛ (9)	38	66,9	<b>0,96</b>	26,4	45,1	<b>0,98</b>	15,2	24,7	<b>0,98</b>	6,7	9,4	<b>0,82</b>	106,8
КЛЛ (11)	41,9	109,4	<b>0,98</b>	27,3	73,3	<b>1</b>	14,7	39,7	<b>0,99</b>	7	14,8	<b>0,8</b>	105,6
КЛЛ (15)	57,1	166,9	<b>0,99</b>	36,4	110,3	<b>1</b>	18,9	58,7	<b>0,998</b>	8,1	20,9	<b>0,79</b>	104,2
КЛЛ (20)	68,2	238,9	<b>1</b>	38,4	144,5	<b>0,98</b>	19	67,1	<b>0,86</b>	10,1	12,8	<b>0,35</b>	94,4
КЛЛ (24)	85,4	326,4	<b>1</b>	55,1	198,3	<b>0,98</b>	29	92,3	<b>0,86</b>	12,5	17,6	<b>0,36</b>	94,9

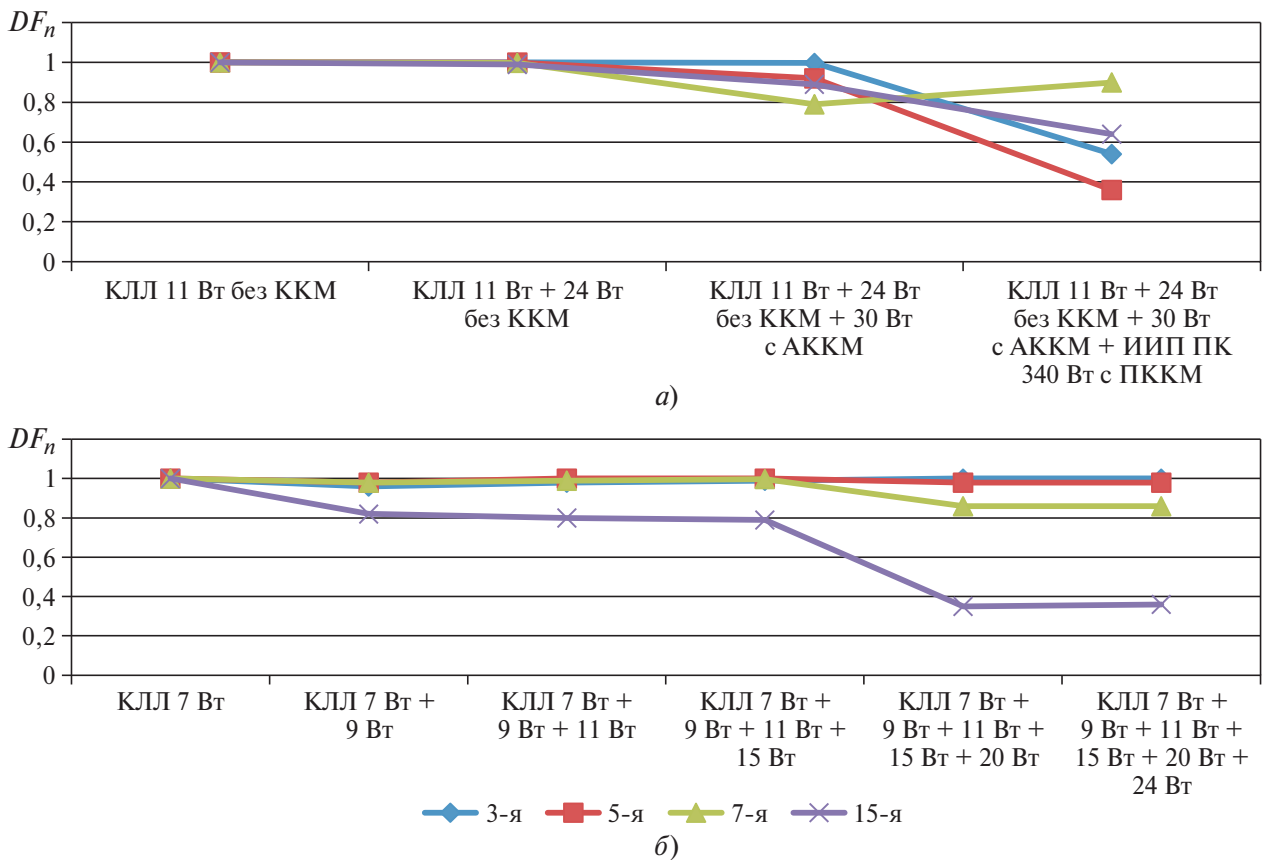


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента неоднородности ВГ тока от состава ЭП в случае питания смешанной (а) и однотипной (б) нагрузок

чениями сопротивления питающей линии каждого отдельного ЭП [4].

Для иллюстрации эффекта неоднородности в табл. 2 приведены результаты измерений ВГ тока групп ЭП: первой — состоящей из разнотипных нагрузок освещения и бытовой электроники; второй — включающей только нагрузки освещения, а именно — компактные люминесцентные лампы (КЛЛ).

На каждом этапе эксперимента к источнику напряжения последовательно подключали ЭП и измеряли уровни ВГ тока, которые затем сравнивали с алгебраической суммой ВГ тока, генерируемых ЭП в отдельности. В результате для 3, 5, 7 и 15-й ВГ тока был определен коэффициент неоднородности  $DF_n$  и построены графики его зависимости от состава ЭП в случае питания смешанной (рис. 3, а) и однотипной (рис. 3, б) нагрузок. Кроме того, найден суммарный коэффициент гармонических составляющих тока  $K_I$  для каждого ЭП. Из графиков следует, что в случае совместного питания разнотипных ЭП компенсация ВГ тока низких порядков (3-й, 5-й) может достигать 60 % благодаря разнообразию топологий ЭП, а значит, и фазовых углов гармоник. При питании совокупности

КЛЛ эффект неоднородности для ВГ низких порядков (3-й, 5-й) практически не проявляется. Существенное снижение уровня наблюдается только у 15-й ВГ тока после подключения большого количества КЛЛ.

Таким образом, различные типы ЭП при совместном питании характеризуются той или иной степенью компенсации токовых искажений за счет эффектов ослабления и неоднородности. Их учет приводит к значительной переоценке уровня несинусоидальности напряжения в распределительной сети и неоправданным затратам материальных ресурсов на проведение мероприятий по обеспечению КЭ.

#### Сигнатуры высших гармоник тока питания электроприемников

Для описания зависимости уровня эмиссии ВГ тока отдельных ЭП от уровня несинусоидальности напряжения питания и качественного состава групп соседних ЭП в [5] вводится понятие *сигнатуры* ВГ тока питания ЭП. Суть его заключается в индивидуальном для каждого типа ЭП “поведении” ВГ тока под воздействием несинусоидальности напря-

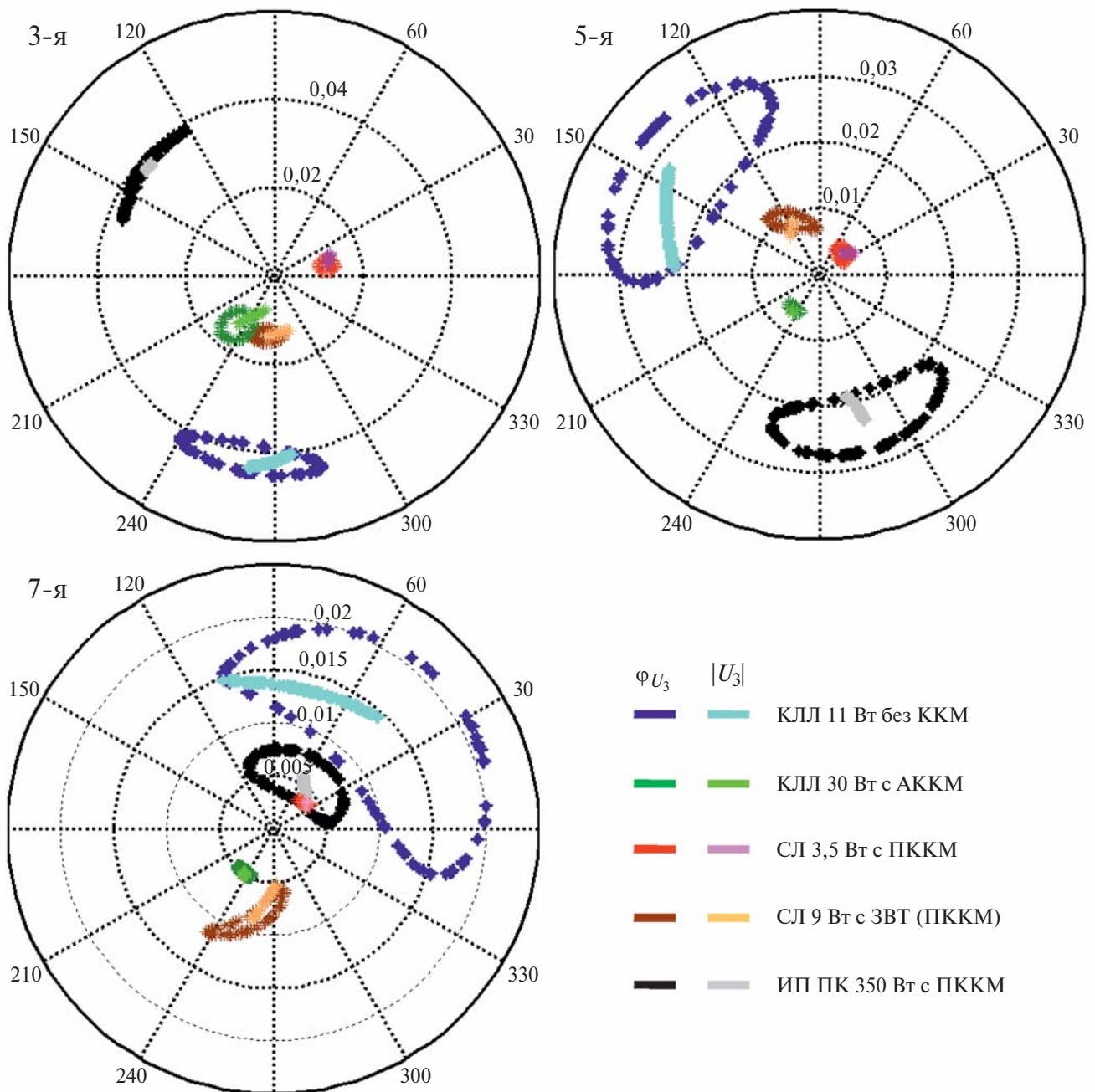


Рис. 4. Сигнатуры ВГ тока питания основных типов ЭП при изменении амплитуды и фазового угла 3-й ВГ напряжения

жения питания. Данная взаимосвязь описывается с помощью графического распределения концов векторов ВГ входного тока, соответствующих конкретным уровням несинусоидальности напряжения. Отсюда становится возможным определение эмиссии ВГ тока данного ЭП не только под действием идеально синусоидального напряжения, но и с учетом искажений напряжения сети.

В качестве примера на рис. 4 изображены сигнатуры ВГ тока основных типов нелинейных ЭП при некотором уровне несинусоидальности питающего напряжения, модели которых описаны в [6, 7], включая:

компактную люминесцентную лампу КЛЛ 11 Вт без коррекции коэффициента мощности (ККМ);

КЛЛ 30 Вт с активной коррекцией коэффициента мощности (АККМ);

ИП ПК 340 Вт с пассивной коррекцией коэффициента мощности (ПККМ) и нагрузкой 50 Вт;

светодиодную лампу (СЛ) 3,5 Вт с ПККМ;

СЛ 9 Вт со схемой заполнения впадины тока (ЗВТ).

При этом из-за большей мощности ИП ПК с ПККМ, чем других ЭП, его распределение для наглядности уменьшено в 5 раз.

Исследовалась реакция 3, 5 и 7-й ВГ тока ЭП на два типа воздействия:

1) питание синусоидальным напряжением с 3-й ВГ со случайно меняющейся амплитудой (до 5 % от амплитуды основной гармоники) и фиксированным нулевым фазовым углом ( $|U_3|$  на рис. 4);

2) питание синусоидальным напряжением с 3-й ВГ с постоянной амплитудой (2,5 % от амплитуды основной гармоники) и произвольным фазовым углом ( $\varphi_{U_3}$  на рис. 4).

Анализ диаграмм на рис. 4 позволяет выделить следующие типы “поведения” ВГ тока под действием несинусоидальности напряжения:

**линейное “поведение”**, когда линейное изменение амплитуды ВГ напряжения вызывает такое же линейное изменение амплитуды ВГ тока ЭП, а круговое вращение вектора ВГ напряжения фиксированной амплитуды вызывает аналогичное круговое изменение положения вектора ВГ тока ЭП. Кроме того, линейное поведение характеризуется отсутствием перекрестной взаимосвязи ВГ напряжения и тока, т. е. 3-я ВГ напряжения влияет только на 3-ю ВГ тока. Подобными свойствами среди рассматриваемых ЭП обладают КЛЛ 30 Вт с АККМ и СЛ 3,5 Вт с ПККМ. У первых линейность объясняется наличием схемы активной коррекции, имеющей свойства активного сопротивления, а у вторых — питанием схемы от конденсатора, что придает схеме линейные емкостные свойства [6].

**нелинейное “поведение”**, когда описанные выше линейные свойства отсутствуют. Так, существует нелинейная реакция векторов ВГ тока на линейные изменения амплитуды и фазового угла ВГ напряжения, а также перекрестное влияние векторов ВГ напряжения на ВГ тока. К ЭП с нелинейными свойствами можно отнести КЛЛ 11 Вт без ККМ, СЛ 9 Вт с ЗВТ, ИП ПК 340 Вт с ПККМ и нагрузкой 50 Вт. Реакция данных ЭП на линейные изменения амплитуды и фазового угла 3-й ВГ напряжения выражается соответственно в виде дугообразных и эллипсовидных кривых; 3-я ВГ напряжения значительно влияет на 5-ю и 7-ю ВГ тока.

Из рис. 4 также следует, что, несмотря на изменение параметров питающего напряжения, для каждого типа ЭП существуют наиболее вероятные области размещения векторов ВГ входного тока, ширина которых растет с увеличением порядка ВГ. Так, в случае КЛЛ без ККМ вектор 3-й ВГ тока направлен под углом  $260 \div 280^\circ$ , 5-й —

$120 \div 160^\circ$ , 7-й —  $0 \div 90^\circ$ . Подобные вероятные диапазоны фазовых углов ВГ тока могут быть получены для наиболее распространенных нелинейных ЭП.

#### *Рекомендации по снижению уровня несинусоидальности напряжения в сетях с бытовыми нелинейными ЭП*

Информация, содержащаяся в сигнатурах ВГ, позволяет комбинировать ЭП с противоположно направленными соответствующими векторами ВГ для максимального снижения искажения тока питания, а также давать рекомендации по одновременному питанию различных ЭП. Так, компенсация ВГ тока от неоднородности фазовых углов различных ЭП максимальна:

1. При совместном подключении ЭП с противоположными сигнатурами. Подобной “совместимостью” характеризуются:

для 3-й ВГ тока — КЛЛ с АККМ и СЛ с ПККМ;

для 5-й ВГ тока — КЛЛ с АККМ и СЛ с ПККМ, КЛЛ без ККМ и ИП ПК с ПККМ;

для 7-й ВГ тока — СЛ с ЗВТ, с одной стороны, и КЛЛ без ККМ, СЛ с ППКМ или ИП ПК с ПККМ — с другой.

2. При высокой вероятности одновременной работы ЭП с “противоположными” сигнатурами. Это может быть обеспечено:

установкой энергосберегающего освещения (КЛЛ или СЛ) в одной комнате с телевизором или компьютером для обеспечения совместного включения в период вечернего максимума нагрузок в квартире и снижения уровней 5-й или 3-й ВГ тока;

диверсификацией типов осветительных ЭП за счет совместного использования КЛЛ различной мощности (менее 25 Вт без ККМ и более 25 Вт с АККМ) или включения КЛЛ и СЛ;

совмещением питания нагрузок розеточной и осветительной сетей офисных зданий. При этом суммируются токи ВГ и снижается уровень несинусоидальности тока в точке присоединения ЭП, а не на секциях вводно-распределительного устройства (при раздельном питании щитов освещения и розеточной сети).

На основе эффекта ослабления минимизация несинусоидального падения напряжения при питании большого числа одинаковых нелинейных ЭП может быть достигнута путем:

снижения сопротивления питающей линии при размещении групп однотипных нелинейных ЭП в точках с максимальной же-

сткостью сети (максимально близко к вводному распределительному устройству здания или трансформаторной подстанции), а также при увеличении сечения питающих кабелей;

изменения структуры питания ЭП, а именно — исключения случаев питания большого числа однотипных нелинейных ЭП по одной линии. В офисных и административных зданиях в случае раздельного питания щитов освещения и розеточной сети следует с учетом экономической целесообразности “дробить” их нагрузку и увеличивать число питающих линий.

В заключение следует отметить, что несинусоидальность при питании большого числа разрозненных маломощных и резко нелинейных бытовых ЭП целесообразно компенсировать только в ТОП, где ток достаточно велик для экономически оправданной установки фильтрующего оборудования, что часто означает превышение норм несинусоидальности на уровне отдельных ЭП. Поэтому общепринятый подход к обеспечению синусоидальности напряжения в бытовых сетях с нелинейными ЭП — снижение эмиссии ВГ тока до некоторого приемлемого уровня с помощью схем ККМ для каждого ЭП. Между тем работа групп ЭП неизбежно сопровождается эффектами компенсации ВГ, степень которой зависит как от параметров электрической сети, так и от качественного состава соседних ЭП. Максимальное использование этих эффектов может стать доступной аль-

тернативой дорогостоящим мероприятиям по обеспечению норм качества электроэнергии.

### Список литературы

1. **An investigation** of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads / A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, M. J. Samotyj. — IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 1, Jan. 1995.
2. **Meyer J., Schegner P., Heidenreich K.** Harmonic summation effects of modern lamp technologies and small electronic household equipment, 21<sup>st</sup> International conference on electricity distribution, Frankfurt, 6 – 9 June, 2011.
3. **An analysis** of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps / V. Ćuk, J. F. G. Cobben, W. L. Kling, R. B. Timens, 14<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2008), Bergamo, September 2010.
4. **Mansoor A., Grady W. M.** Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads, 8<sup>th</sup> International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings, 14 – 18 Oct. 1998.
5. **Cobben J. F. G.** Power quality implications at the point of the connection. Ph. D. thesis, 2007.
6. **Цырук С. А., Янченко С. А., Рыжкова Е. Н.** Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях. — Вестник МЭИ, 2013, № 3.
7. **Цырук С. А., Янченко С. А.** Моделирование гармонического состава входного тока светодиодных светильников. — XI междунар. науч.-практическая интернет-конф. “Энерго- и ресурсосбережение — XXI век”, Орел, 2013.

yanchenko\_sa@mail.ru

## Ориентировочные расценки на информационно-рекламные услуги (без учета НДС)

1-я страница обложки	полноцветная	70 000 руб.
2-я и 3-я страницы обложки	полноцветные	35 000 руб.
4-я страница обложки	полноцветная	40 000 руб.
Одна страница формата А4 внутри журнала	полноцветная	30 000 руб.
	черно-белая	26 000 руб.
1/2 страницы внутри журнала	полноцветная	15 000 руб.
	черно-белая	13 000 руб.
Двухсторонний вкладыш, изготовленный заказчиком	полноцветный или черно-белый	18 000 руб.