

### АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ СВЕТОДИОДНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

*В статье рассмотрены результаты измерений спектрального состава токов и напряжений современных источников света, применяемых повсеместно. По данным авторов, в сетях освещения наблюдаются значительные искажения формы кривых токов, вызванные влиянием нелинейных нагрузок. Появляются очень большие значения токов в нулевом проводе распределительной сети, что может приводить к аварийным ситуациям, вызванным перегоранием нулевого проводника.*

**Ключевые слова:** *качество электроэнергии, источники света, нелинейная нагрузка, высшие гармоники.*

*N.P. Boyarskaya, S.A. Temerbaev, V.P. Dovgun,  
A.L. Kabak, V.O. Kolmakov*

### SPECTRAL COMPOSITION ANALYSIS OF THE CURRENT AND VOLTAGE OF LED AND GAS-DISCHARGE LIGHT SOURCES

*The measurement results of the voltage and current spectral composition of modern light sources used everywhere are considered in the article. According to the authors' data the significant distortion of current curves caused by the influence of non-linear loads in the lighting networks is observed. Very large current values appear in the neutral conductor of the distribution network that can lead to alarm conditions caused by the neutral conductor burnout.*

**Key words:** *electric power quality, light sources, nonlinear load, highest harmonic components.*

---

**Введение.** Основной причиной ухудшения качества электроэнергии является широкое распространение нелинейных нагрузок, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы. Их можно представить в виде суммы гармонических составляющих, частоты которых кратны основной частоте питающей сети. Высшие гармоники оказывают неблагоприятное влияние на работу силового электрооборудования, устройств релейной защиты и автоматики, вызывают ускоренное старение изоляции [1, 2].

Конечно, основным источником гармонических искажений в распределительных сетях являются нелинейные нагрузки крупных промышленных потребителей. Однако в последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях непромышленных потребителей – торговых комплексов, офисных зданий, учебных заведений, жилых зданий.

**Цель исследований.** Анализ искажений синусоидальности, которые появляются в распределительных сетях внутреннего освещения. В современных электроосветительных сетях все большее распространение получают энергоэкономичные световые приборы. Это люминесцентные, ртутные дуговые и светодиодные лампы и прожекторы. Все эти приборы являются для распределительных сетей нелинейной нагрузкой. При таком характере потребителей доля нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную составляющую. И существенную долю потребляемого тока в этом случае составляют компоненты с частотой третьей гармоники.

**Материалы и методы исследований.** Для измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения, использовался анализатор качества электроэнергии PM175 SATEC. Измерения проводились в соответствии с методикой, подробно изложенной в [4].

Для измерений была использована схема трехпроводного прямого соединения без трансформаторов тока (рис.).

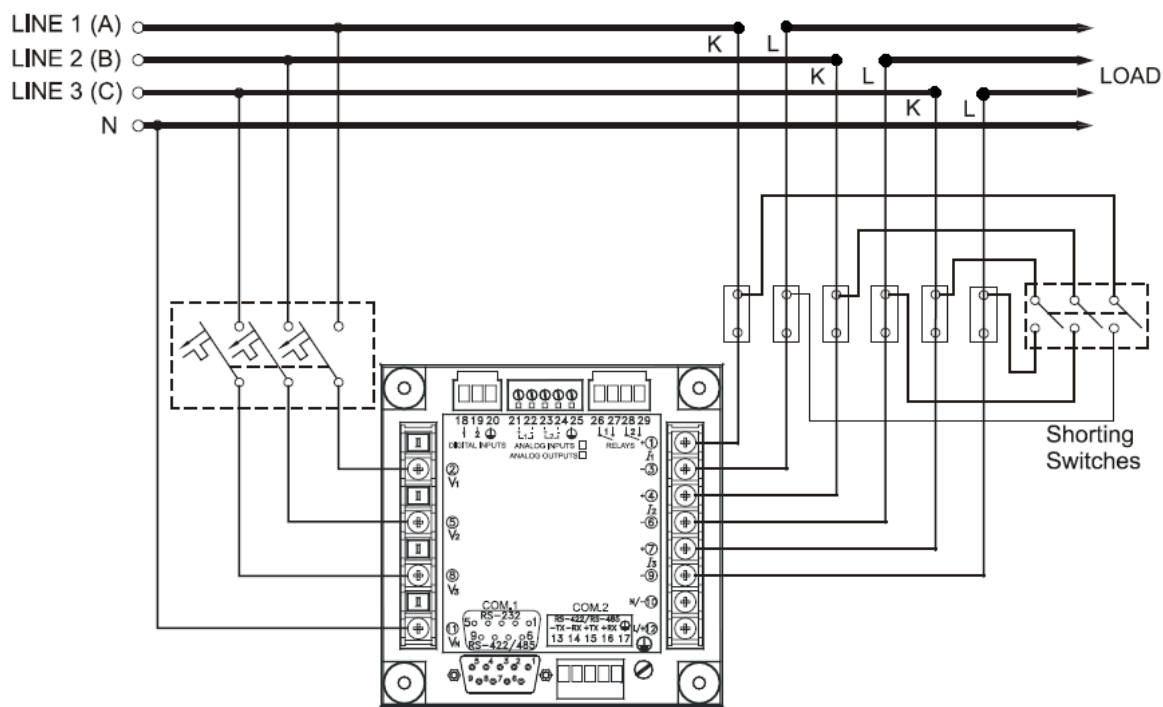


Схема включения прибора

В соответствии с ГОСТ13109-97 [3] вычисление значений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производилось по формулам:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100, K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100.$$

Измерения гармонического состава токов и напряжений для каждого типа световых приборов проводились в течение 4 ч.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Потребителями являлись следующие источники света:

- 1) прожекторы с галогеновыми лампами мощностью 150 Вт на фазу;
- 2) прожекторы светодиодные мощностью 10 Вт на фазу;
- 3) люминесцентные лампы низкого давления (типа ЛБ) мощностью 18 Вт на фазу;
- 4) светодиодные лампы мощностью 4 Вт на фазу;
- 5) энергосберегающие лампы мощностью 25 Вт на фазу;
- 6) лампы высокого давления (типа ДРВ) мощностью 125 Вт на фазу;
- 7) светодиодные лампы мощностью 15 Вт на фазу.

При всех измерениях для получения симметричной нагрузки в каждую фазу включалось по одной лампе соответствующего типа. Лампы были приобретены в розничной торговой сети, изготовлены самыми разнообразными производителями светотехнического оборудования.

В соответствии с ГОСТ Р 51317.3.2 [6] световое оборудование такого типа (за исключением светодиодных ламп и светодиодных прожекторов) относится к классу «С».

Для этого класса ГОСТ устанавливает нормы гармонических составляющих тока, которые не должны превышать при эксплуатации осветительного оборудования (табл. 2). Для светодиодных ламп и прожекторов как для устройств с мощностью менее 25 Вт ГОСТ приводит несколько иные нормы гармонических составляющих тока (табл. 3).

Нормируемые значения приведены табл. 1, а в табл. 2 выполнен их перерасчет для сравнения с полученными данными.

Таблица 1

Нормируемые значения гармонических составляющих токов

Номер гармонической составляющей, n	Максимальное допустимое значение гармонической составляющей
3	$30\% \cdot \text{коэффициент мощности} \cdot I_1$
5	$10\% \cdot I_1$
7	$7\% \cdot I_1$
9	$5\% I_1$
$11 \leq n \leq 39$	$3\% \cdot I_1$
При мощности менее 25 Вт	
3	3,4 мА/Вт
5	1,9 мА/Вт
7	1,0 мА/Вт
9	0,5 мА/Вт
11	0,35 мА/Вт
$13 \leq n \leq 39$	$3,85/n$ мА/Вт

Таблица 2

Нормы гармонических составляющих токов осветительных приборов

Номер гармонической составляющей	Тип осветительных приборов						
	1	2	3	4	5	6	7
3	0,018А	0,034А	0,021А	0,013А	0,0046А	0,015А	0,051А
5	0,06А	0,019А	0,007А	0,007А	0,0015А	0,005А	0,029А
7	0,004А	0,01А	0,005А	0,004А	0,0011А	0,004А	0,015А
9	0,003А	0,005А	0,004А	0,002А	0,0007А	0,003А	0,008А
11	0,0018А	0,034А	0,0021А	0,00014А	0,00045А	0,0015А	0,005А
13	0,0018А	0,0029А	0,0021А	0,00012А	0,00045А	0,0015А	0,0044А
15	0,0018А	0,0025А	0,0021А	0,0001А	0,00045А	0,0015А	0,0038А

Данные, полученные в результате измерений, сведены в табл. 3 (гармонический состав токов) и табл. 5 (гармонический состав напряжений). Относительные значения четных гармоник не превышают 1 % и поэтому не приводятся.

Таблица 3

Гармонический состав токов осветительных приборов

Номер гармонической составляющей	Тип осветительных приборов						
	1	2	3	4	5	6	7
3	0,006А	0,04	0,012А	0,0025А	0,012А	0,03А	0,01А
5	0,0015А	0,033А	0,003А	0,002А	0,007А	0,02А	0,006А
7	0,0011А	0,028А	0,0015А	0,0003А	0,04А	0,005А	0,003А
9	0,0006А	0,024А	0,0003А	0,0005А	0,0013А	0,004А	0,006А
11	0,0012А	0,022А	0,0005А	0,0008А	0,0023А	0,005А	0,002А
13	0,0004	0,021А	0,0002А	0,001А	0,0042А	0,003А	0,003А
15	0,0004	0,02А	0,0002А	0,0003А	0,0042А	0,003А	0,002А
Измеренный фазный ток	0,12 А	0,04 А	0,11 А	0,01 А	0,02 А	0,14 А	0,03 А
Коэффициент мощности	0,506	0,632	0,635	0,9	0,765	0,368	0,99

Примечание. В таблице выделены значения гармонических составляющих, превышающие нормативные значения.

По данным табл. 3, все источники света имеют в спектрах токов весьма существенную величину гармонической составляющей 3-го порядка (3-ю гармонику), а некоторые также 9- и 15-ю. Это не может не сказаться на появлении токов в нулевом проводе, но надо подчеркнуть, что нагрузка на фазы была полностью симметричной. Кроме того, в табл. 3 приводятся средние значения уровней гармонических составляющих за период проведения измерений. Если рассматривать мгновенные значения, то величины высших гармонических составляющих будут еще больше.

В таблице 4 приведены величины коэффициентов искажения синусоидальности токов по типам ламп, которые подтверждают сказанное выше. В таблице 5 представлен гармонический состав напряжений для тех же типов световых приборов. Данные приводятся в процентах по отношению к основной гармонике.

Таблица 4

**Коэффициенты искажения синусоидальности токов**

Параметр, %	Тип осветительных приборов						
	1	2	3	4	5	6	7
$K_I$	5,4	221,3	11,9	36,8	92,8	29,9	43,7

Таблица 5

**Гармонический состав напряжений для ламп внутреннего освещения**

Номер гармонической составляющей	Тип осветительных приборов							Допустимый уровень
	1	2	3	4	5	6	7	
3	4,89	3,23	4,92	3,19	4,45	4,76	4,01	5
5	0,87	0,47	0,84	0,48	0,64	0,7	0,42	6
7	0,86	0,71	0,94	0,39	0,73	0,75	0,46	5
9	0,53	1,27	0,67	0,19	0,5	0,55	0,48	1,5
11	1,29	0,5	1,39	1,13	1,41	1,18	1,2	3,5
13	0,48	0,21	0,54	0,54	0,34	0,46	0,25	3
15	0,45	0,24	0,41	0,14	0,31	0,38	0,25	0,3

ГОСТ13109-97 [3] регламентирует допустимые уровни гармонических составляющих. Как видно из табл. 5, почти все лампы соответствуют этим требованиям. Несоответствие наблюдается только в области 15-й гармоники.

В стандарте предусматриваются допустимое (8 %) и предельное (12 %) значения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения. Данные измерений, приведенные в табл. 6, подтверждают соответствие всех источников света этим требованиям.

Таблица 6

**Коэффициенты искажения синусоидальности напряжений**

Параметр, %	Тип осветительных приборов						
	1	2	3	4	5	6	7
$K_U$	6,0	3,6	5,6	3,7	5,6	5,8	5,1

Кроме измерения величин гармонических составляющих тока и напряжения, проводились измерения тока в нулевом проводе. Данные измерений, совместно с данными об уровне потребляемого тока приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Уровни фазного тока и тока в нулевом проводе**

Уровень токов	Тип осветительных приборов						
	1	2	3	4	5	6	7
В нулевом проводе	0,02 А	0,01 А	0,04 А	0	0,05 А	0,15 А	0,03 А
В фазном проводе	0,12 А	0,04 А	0,11 А	0,01 А	0,02 А	0,14 А	0,03 А
Соотношение $I_0 / I_\Phi$	0,17	0,25	0,36	-	2,5	1,1	1,0

В качестве комментария к табл. 7 необходимо добавить, что отсутствие тока в нулевом проводе при испытаниях светодиодных светильников малой мощности объясняется ограничениями в чувствительности измерительного прибора. Ее данные позволяют сделать вывод о том, что использование энергосберегающих ламп (5), ламп высокого давления (6) и светодиодных ламп (7) особенно опасно в случае старой электропроводки в зданиях, так как уровни токов в нулевом проводе способствуют перегоранию этого провода, а значит, могут вызвать аварии в системах электроснабжения.

**Заключение.** Во внутренних распределительных сетях коммерческих и офисных потребителей, бытовом секторе наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. Причиной таких искажений могут становиться электроосветительные приборы внутреннего освещения с нелинейными вольтамперными характеристиками. Достаточно часто коэффициент искажения синусоидальности кривой тока превышает 30 % даже при полностью симметричной нагрузке. Это вызывает значительное увеличение потерь по сравнению с синусоидальным режимом. Кроме того, появление гармоник, кратных трем, приводит к существенному росту тока в нулевом проводе. А это может привести к аварии, вызванной перегоранием нулевого провода.

Поэтому необходимо в обязательном порядке предусматривать мероприятия по поддержанию качества электроэнергии и надежности систем электроснабжения. Наибольший эффект получается при использовании специальных компенсирующих устройств – активных и пассивных фильтров гармоник.

Наиболее простым решением в рассматриваемом случае будет установка пассивных фильтров гармоник в сети освещения. В работе [5] показано, что наибольшую эффективность такой фильтр имеет, если он включается в сеть одновременно с включением электроприемника, для которого предназначен. Возможны два варианта решения этой задачи: 1 – установка фильтра для каждой лампы освещения; 2 – установка фильтра одновременно на все внутреннее освещение. Первый вариант был бы универсальным, но его достаточно сложно выполнить, поскольку при расчетах, подробно рассмотренных в [5], выяснилось, что для изготовления дросселей для такого пассивного фильтра потребуется материал с чрезвычайно высоким коэффициентом магнитной проницаемости (порядка 1000000), иначе габаритные размеры такого фильтра будут значительно превышать размеры лампы освещения. Второй вариант наиболее просто выполнить, если схемой электроснабжения предусмотрен отдельный распределительный щит для этого рода электроприемников. Стоимость фильтра для компенсации двух гармонических составляющих тока в этом случае составит порядка 30–35 тыс. руб. (по предварительной оценке, приведенной в [5]). Согласно методике, изложенной там же, в результате использования таких фильтров экономия будет не менее 5 % от затрат на оплату электроэнергии.

### Литература

1. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
2. Akagi H. Active harmonic filters// Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – № 12. – P. 2128–2141.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М., 1999.
4. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, С.А. Темербаев [и др.] // Вестн. КрасГАУ. – 2012. – № 3. – С. 169–182.
5. Боярская Н.П., Довгун В.П., Кунгс Я.А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса/ Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 123 с.
6. ГОСТ Р 51317.3.2-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007.

