

## Некоторые рекомендации для систем освещения на основе энергосберегающих ламп

Белей В. Ф., доктор техн. наук, Харитонов М. С., инж.

**ФГБОУ ВПО “Калининградский государственный технический университет”**

Приведены технические характеристики энергосберегающих ламп и показано, что в каталогах о них приводится неполная информация, необходимая при проектировании систем освещения. На основе экспериментальных исследований для ряда ламп получены значения потребляемой реактивной мощности и уровень высших гармоник, эмиссируемых ими в питающую сеть, что особенно важно при выборе сечения проводников и уставок средств релейной защиты. Даны рекомендации для решения проблем, касающихся их электромагнитной совместимости.

**Ключевые слова:** мощность, ток, напряжение, гармоника, трансформатор, энергосберегающая лампа, система освещения.

По разным данным, на цели освещения в мире расходуется до 20 % всей производимой электроэнергии, что обусловлено широким применением низкоэффективных ламп накаливания (см. табл. 1) [1, 2]. Альтернативными источниками света стали газоразрядные лампы, в частности, разрядные лампы низкого давления (люминесцентные), получившие широкое распространение в системах освещения. Первые компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) производства фирмы “Philips”

появились в 1978 г. [2]. В табл. 2 приведены данные о ряде современных КЛЛ напряжением 230 В, подключаемых через винтовые цоколи. Несмотря на более высокую энергоэффективность данных ламп, чем ламп накаливания, объем их внедрения в мире не превышает 20 % [1]. Это обусловлено ненадежностью недорогих КЛЛ, неудовлетворенностью потребителей цветовыми характеристиками ламп, необходимостью утилизации из-за применения в них паров ртути. Кроме

Таблица 1

Параметры источника (освещения)	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа	Светодиод
Теоретический предел светоотдачи, лм/Вт	25	80	300
Максимальный срок службы, ч	1000	15 000	100 000

Таблица 2

Фирма-производитель	Серия	Модель	Номинальная мощность $P_{ном}$ , Вт	Номинальный ток $I_{ном}$ , А	Удельная светоотдача, $\Phi_{уд}$ , лм/Вт	Цветовая температура, $T_c$ , К	Срок службы, ч
“Osram”	Dulux Pro	8 W/825	8	0,08	50	2500	10 000
		20 W/825	20	0,21	61,5	2500	10 000
		30 W/825	30	0,15	64,5	2500	10 000
“Philips”	Genie Long Life	8W WW 1PF	8	0,06	53	2700	15 000
		14W WW 1PF	14	0,10	58	2700	15 000
		18W WW 1PF	18	0,13	61	2700	15 000
“General Electric”	Stick T3 Mini	FLE9 1/8T10Y	9	0,075	52	2700	10 000
		FLE20 1/8T10Y	20	0,16	59	2700	10 000
		FLE23 1/8T10Y	23	0,18	61	2700	10 000

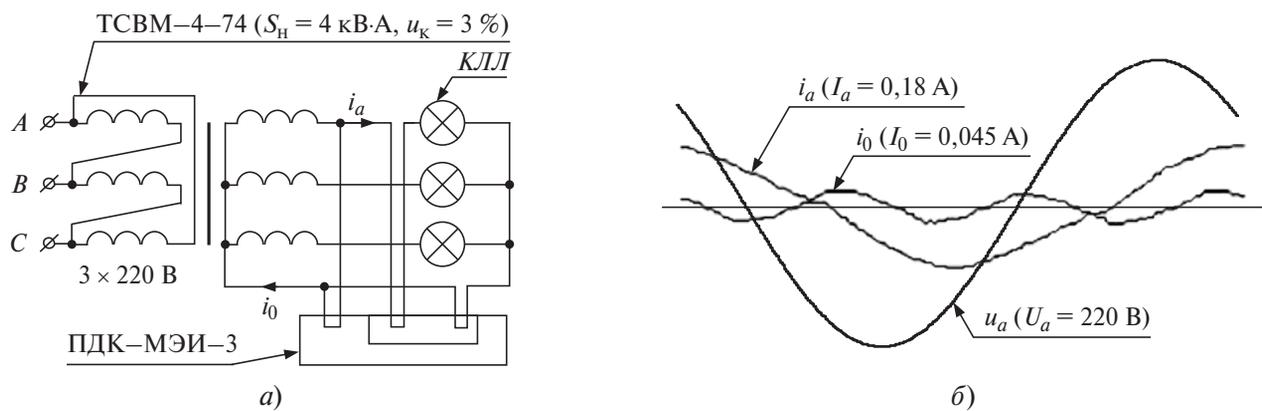


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, включающей комплекс ПДК-МЭИ-3 (а), а также осциллограммы токов и напряжения (б) КЛЛ серии Ecotone Ambione ( $P_{\text{ном}} = 21$  Вт,  $U_{\text{ном}} = 220$  В)

Таблица 3

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$Q_{\text{экв}}^p, \text{вар}$	$K_U, \%$	$K_I, \%$	Значение коэффициента $n$ -й гармоники составляющей тока $K_{I(n)} = I_{(n)}/I_{(1)}, \%$				
						3-й	5-й	7-й	9-й	11-й
198	0,132	17	20	2,58	10,83	10,5	2,32	1,55	0,86	0,52
220	0,18	21	34	2,18	9,16	9,05	0,86	1,55	0,52	0,52
242	0,23	26	49	2,3	10,48	10,21	0,86	1,82	0,41	0,52

Примечание.  $K_U, K_I$  — коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения и тока.

того, у них низкий коэффициент мощности и высокое потребление реактивной мощности (см. рис. 1 и табл. 3) [3, 4].

Значение расчетной эквивалентной реактивной мощности вычисляется по формуле

$$Q_{\text{экв}}^p = \sqrt{(UI)^2 - P^2}, \quad (1)$$

где  $I$  и  $U$  — действующие значения тока и напряжения;  $P$  — активная мощность.

Следует отметить, что если форма кривой тока КЛЛ первых поколений имела явно выраженный несинусоидальный характер [3], то в дальнейшем ведущие фирмы-производители стремились обеспечить низкий уровень коэффициента искажения синусоидальности.

На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения питающей сети  $u_a$ , а также токов в фазном  $i_a$  и нулевом  $i_0$  проводниках. Форма кривой фазного тока  $i_a$  незначительно отличается от синусоидальной, так как коэффициент искажения ее синусоидальности составляет около 10%. В нулевом проводнике протекает в основном ток третьей гармоники. Он равен утроенной сумме токов третьих гармоник трех фаз, так как токи 3-й, 9-й, 15-й и последующих нечетных гар-

моник образуют в трехфазной сети нулевую последовательность. Токи 1-й (основной), 7-й и т. д. гармоник образуют прямую последовательность ( $f_{\text{пр}}$ ), а токи 5-й, 11-й и т. д. гармоник — обратную последовательность ( $f_{\text{обр}}$ ):

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{пр}} &= f_1(6p+1); \\ f_{\text{обр}} &= f_1(6p-1); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $p = 1, 2, 3, 4, \dots$

Сумма токов прямой и обратной последовательностей в нулевом проводе близка к нулю.

В связи с прогрессом в области создания светодиодов (СД) в мировой осветительной практике расширяется использование СДЛ в системах освещения напряжением 220 В (в России) и 230 В (в странах Евросоюза). Далее будем рассматривать СДЛ, которыми в бытовом секторе, школах, офисах, гостиницах и т. д. заменяют лампы накаливания и КЛЛ.

В табл. 4 приведены параметры ряда подключаемых через винтовые цоколи СДЛ, выпускаемых ведущими мировыми производителями. Следует отметить, что удельная светоотдача КЛЛ практически достигла сво-

Таблица 4

Фирма-производитель	Серия	Модель	$P_{\text{ном}}$ , Вт	$I_{\text{ном}}$ , А	$\Phi_{\text{уд}}$ , лм/Вт	$T_c$ , К	Срок службы, ч
“Osram”	LED Star Classic A	A25 5W/827 E27	4,5	—	55,5	3000	15 000
		A40 8W/827 E27	8	—	59	3000	15 000
		A50 10W/830 E27	10	—	65	3000	25 000
“Philips”	CorePro	6-32W E27 WW	6	0,05	58	2700	15 000
		9.5-48W E27 WW	9,5	0,08	63	2700	15 000
		10.5-60W E27827	10,5	0,08	77	2700	15 000
“General Electric”	EnergySmart™ GLS	LED5/GLS/827	5	0,06	37	2700	25 000
		LED9/GLS/827	9	0,09	45	2700	25 000
		LED12/GLS/827	12	0,15	67,5	2700	15 000
“Sylvania”	Ultra LED A-line $U = 120$ В	LED8A19/DIM/O	8	—	59	2700	25 000
		LED14A19/DIM/O	14	—	78,5	2700	25 000
		LED20A21/DIM/O	20	—	80	2700	25 000
“Xavax”	—	00112170	6	0,037	78,3	2700	25 000
		00112146	9	0,052	89,6	2700	12 500
		00112172	13	0,072	81,5	2700	25 000

его теоретического предела, тогда как у серийно выпускаемых СДЛ она существенно выше, а у некоторых лабораторных образцов составляет 150 лм/Вт.

Анализ характеристик СДЛ, приведенных в паспортах и каталогах, показывает, что некоторые фирмы не предоставляют данные о значениях потребляемого тока и практически все фирмы — об уровнях искажений, которые эти лампы вносят в питающую сеть, а также о значениях коэффициента пульсаций напряжения, подводимого от модуля питания к светодиоду или группе светодиодов лампы [6].

Результаты наших исследований ряда СДЛ при напряжении питания 220 В приведены в табл. 5. Методика их проведения указана в [7].

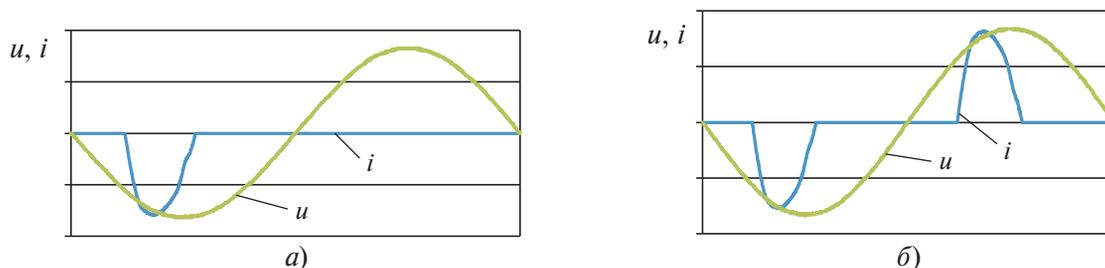
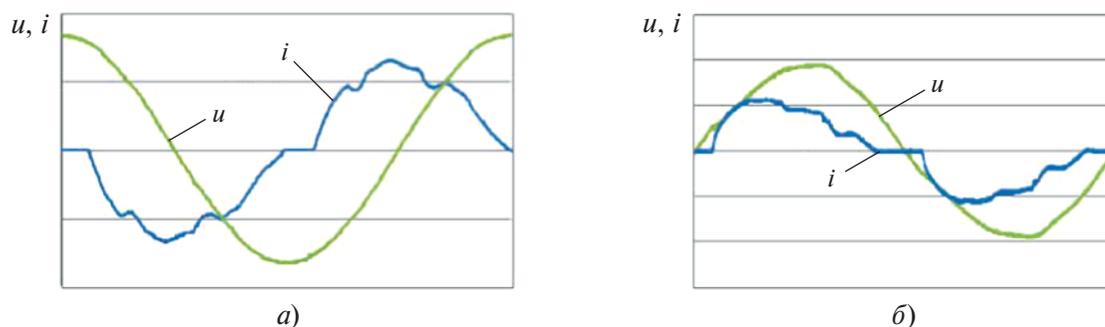
На рис. 2 даны осциллограммы кривых напряжения  $u$  и тока  $i$  СДЛ фирмы “Osram”. При подключении одной лампы к сети (рис. 2, а) ток протекает только в один полупериод. Это обусловлено наличием встроенного блока питания СДЛ с однополупериодным выпрямлением. В случае подключения к сети второй идентичной лампы (рис. 2, б) ток в цепи будет зависеть от “полярности” ее включения. Если на этой лампе поменять местами фазный и нулевой проводники, то

при двух лампах ток в цепи будет протекать уже 2 раза за период, что значительно снизит коэффициент искажения синусоидальности кривой тока  $K_f$  (см. табл. 5). При включении ламп с одинаковой “полярностью” амплитуда тока увеличится, но протекать он будет только в один из полупериодов каждого периода. Согласно п. 6.6.10 ПУЭ у стационарно установленных светильников винтовые токоведущие гильзы патронов для ламп с винтовыми цоколями в сетях с заземленной нейтралью должны быть присоединены к нулевому рабочему проводнику [8], что ограничивает возможности оптимизации режима электропотребления и повышения качества электроэнергии при построении систем освещения на подобных СДЛ.

На рис. 3, а, б представлены осциллограммы кривых тока  $i$  и напряжения  $u$  СДЛ фирмы “Xavax” — соответственно ранней модели мощностью 3 Вт (см. табл. 5) и современной модели мощностью 9 Вт (см. табл. 4 и 5). Характер потребляемого тока, его гармонический состав, значения коэффициента мощности СДЛ, коэффициент пульсаций напряжения, подводимого к светодиодам

Таблица 5

Фирма-производитель	Кол-во	$P$ , Вт	$\Phi$ , лм	$K_U$ , %	$K_I$ , %	Значение коэффициента $n$ -й гармонической составляющей тока $K_{In}$ , %						$I_{изм}$ , мА	$Q_{экв}^p$ , вар
						2-й	3-й	4-й	5-й	7-й	9-й		
"Osram"	1	2	50	1,6	160	92,7	82,2	68,7	53,7	23,7	5,7	15,1	2,8
	2	4	100	1,6	102	2,9	82,6	1,9	54,4	25,3	6,6	33,2	6,1
"Melitech"	1	2,5	115	1,6	13,6	0	8,2	0	6,8	6,3	2,6	62,9	14,2
"Xavax"	1	3	100	1,6	31,7	0,1	24,6	0,1	18,4	3,1	4,8	41,6	9,1
	1	9	806	1,6	30	2,7	19,3	1,3	12,3	6,1	6,8	52	6,8

Рис. 2. Кривые напряжения  $u$  и потребляемого тока  $i$  при подключении к цепи одной (а) и двух параллельно (б) светодиодных ламп фирмы "Osram"Рис. 3. Осциллограммы кривых тока  $i$  и напряжения  $u$  СДЛ фирмы "Xavax"

этих ламп, определяются схмотехническими особенностями встроенного модуля питания.

На рис. 4, 5 приведены простейшие схемы питания СДЛ [9, 10]. Лампа может представлять для сети нагрузку емкостного характера (см. рис. 3, а и 4), предположительно обусловленную установкой в цепи блока питания последовательно включенного конденсатора. При наличии системы активной коррекции коэффициента мощности сдвиг по фазе между током и напряжением сети может отсутствовать (см. рис. 3, б и 5).

Встроенный в лампу модуль питания обеспечивает определенный режим работы светодиода, который задается на основе его вольт-амперной характеристики. Результаты анализа вольт-амперных характеристик и зон

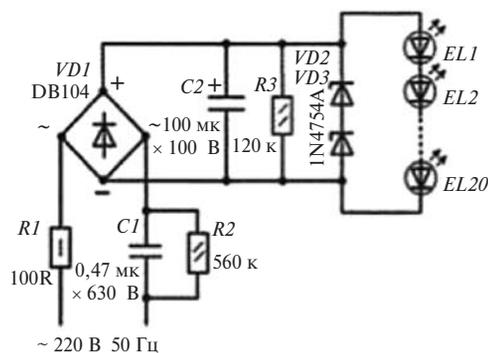


Рис. 4. Электрическая схема питания СДЛ

свечения светодиодов [11] позволили нам сформировать их обобщенную характеристику (рис. 6). Следует отметить, что положительная и отрицательная области координатных

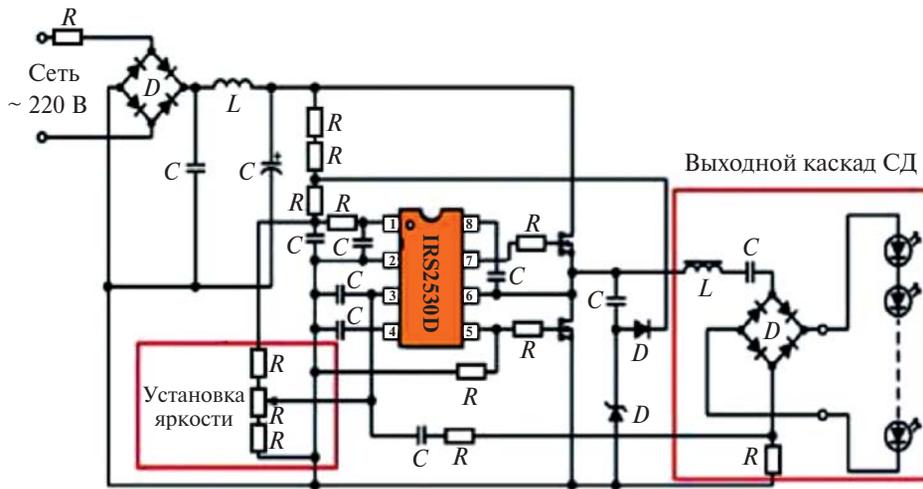


Рис. 5. Электрическая схема питания СДЛ с активной коррекцией коэффициента мощности

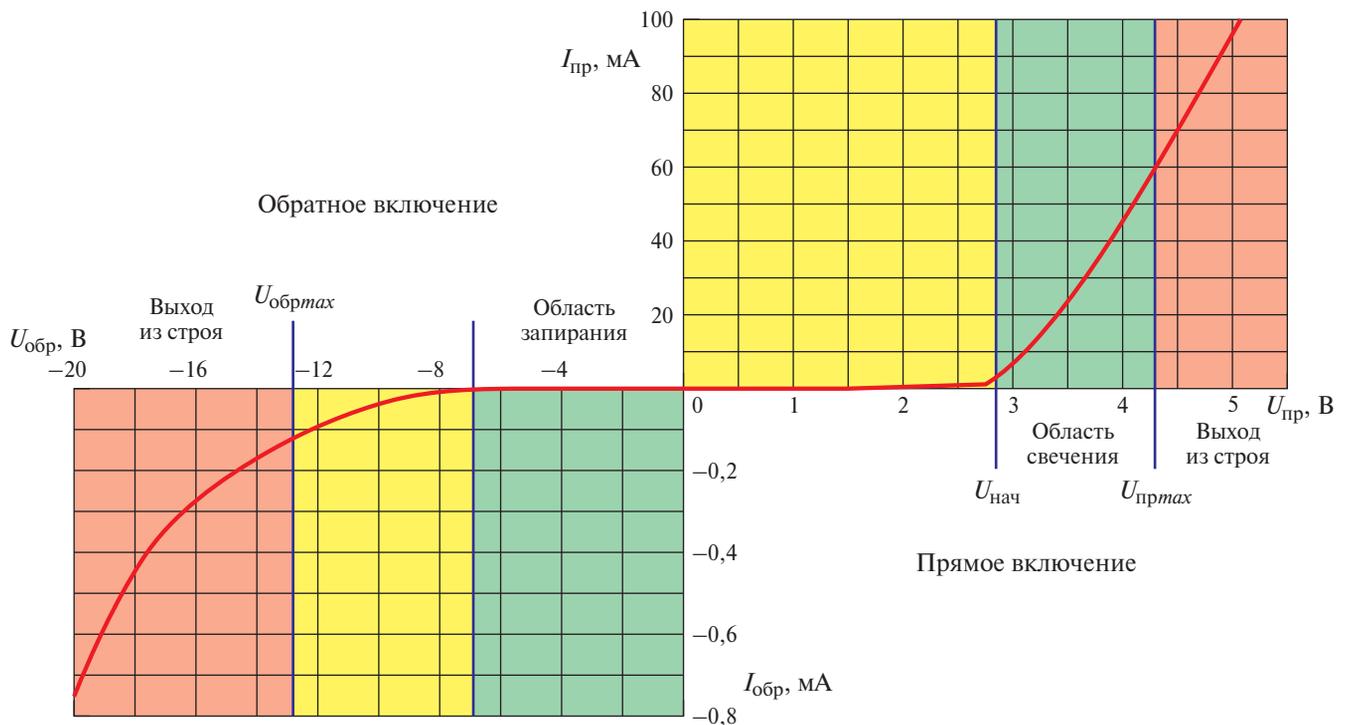


Рис. 6. Обобщенная вольт-амперная характеристика светодиода

осей имеют различный масштаб, рабочие диапазоны светодиода нанесены приблизительно.

В случае прямого включения светодиода при некотором значении прямого напряжения  $U_{нач}$  от анода к катоду начинает протекать ток, что вызывает свечение светодиода. В области свечения значение протекающего тока определяет испускаемый диодом световой поток. В случае увеличения напряжения питания выше  $U_{прmax}$  ток, протекающий через светодиод, может разрушить его внутреннюю структуру и вывести из строя. При подаче обратного напряжения, попадающего в область запирания, ток через светодиод не

протекает. В случае возрастания обратного напряжения через светодиод будет протекать обратный ток от катода к аноду. При напряжении  $U_{обрmax}$  светодиод выйдет из строя из-за недопустимого значения обратного тока.

Поскольку световой поток светодиода обусловлен значением протекающего через него тока, модуль блока питания должен быть построен так, чтобы подводимое к светодиоду или группе светодиодов постоянное напряжение имело низкий коэффициент пульсаций [9, 10]. Колебания напряжения вызывают изменения светимости ламп, что может создать фликер, который при превы-

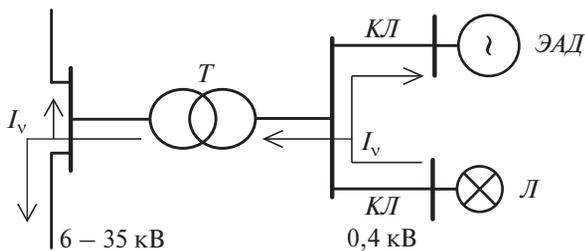


Рис. 7. Схема распространения эмиссируемых лампой гармоник тока  $I_v$  по питающей сети:

$T$  — трансформатор;  $КЛ$  — кабельная линия;  $ЭАД$  — эквивалентный асинхронный двигатель;  $Л$  — энергосберегающая лампа

шении некоторого порогового значения становится раздражающим, причем раздражение растет при увеличении амплитуды колебаний. Наиболее неблагоприятны колебания с частотой 8,767 Гц (совпадают с частотой колебаний нервных клеток головного мозга). Показатель качества электроэнергии, отражающий это явление, — доза фликера. Интенсивность вызванного фликером раздражения, определенного измерительно-оценочным методом UIE-IECA, характеризуется следующими числами:

кратковременной дозой фликера ( $P_{st}$ ), измеренной в течение 10 мин;

долговременной дозой фликера ( $P_{lt}$ ), рассчитанной на основе последовательности 12 значений  $P_{st}$  за двухчасовой интервал.

Согласно стандарту по качеству электроэнергии [12] доза фликера не должна превышать 1. В системах освещения она оценивается путем измерения напряжения (колебаний напряжения) в электрической сети, к которой подключены лампы освещения. Для оценки фликера в случае применения СДЛ данный подход неправомерен: как было показано выше, их колебания напряжения обусловлены коэффициентом пульсаций напряжения, подводимого непосредственно к светодиоду.

Встроенные модули питания СДЛ следует проектировать так, чтобы кроме низкого коэффициента пульсаций обеспечивались невысокий уровень высших гармоник тока, эмиссируемых в питающую сеть, небольшое потребление реактивной мощности и низкие потери мощности. Более подробные рекомендации, касающиеся модулей питания СДЛ, изложены в [10].

Степень распространения высших гармоник тока, эмиссируемых энергосберегающими лампами в питающую сеть, можно оценить на основе аналитических исследований для конкретной системы электроснабжения [13]. На рис. 7 приведена упрощенная схема системы электроснабжения объектов жилищно-бытового комплекса, по питающей сети которой распространяются эмиссируемые лампой гармоники тока  $I_v$ .

На рис. 8 энергосберегающая лампа представляется источником тока с рядом гармоник, преимущественно 3, 5, 7, 9-й и т. д. Гармоники тока прямой (7-й, 13-й, ...) и обратной (5-й, 11-й, ...) последовательностей распространяются как по сети электроснабжения, так и через трансформаторы в питающую сеть (см. рис. 3). Распространение этих гармоник тока и оценка их влияния на  $K_U$  даны в [5].

В случае с третьей и кратной ей гармониками создается иная ситуация, что подтверждается проведенными нами экспериментальными исследованиями на трансформаторе ТСВМ-4-74 ОМ5 мощностью 4 кВ · А со схемой соединения обмоток “треугольник — звезда с нулевым выводом” при  $K_U = 1,6\%$ . В качестве нелинейного источника использовали схему на основе индуктивности в состоянии насыщения, обеспечивающую значительную эмиссию гармоник токов, кратных трем. Анализ показал, что при симметричных нагрузках трансформатора гармониками тока, кратными трем, эти токи создают магнитные

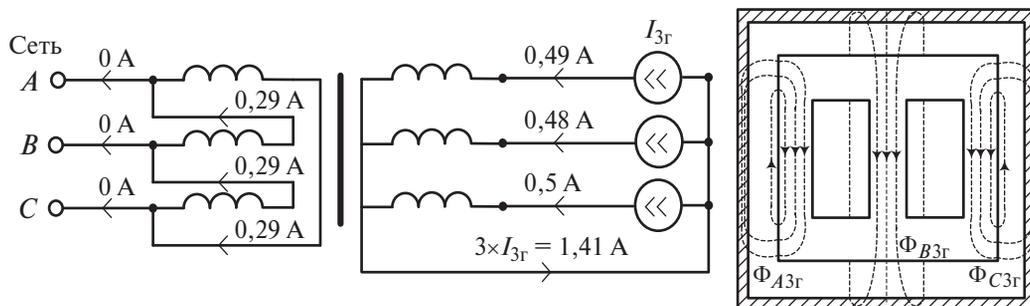


Рис. 8. Результаты, полученные при экспериментальном исследовании проникновения в сеть гармоник тока, кратных трем, через трансформатор при симметричной нагрузке

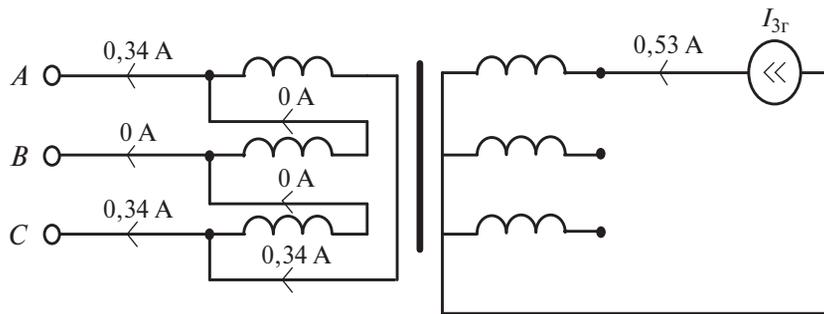


Рис. 9. Результаты, полученные при проникновении в сеть гармоник тока, кратных трем, через трансформатор при однофазной нагрузке

потоки, силовые линии которых замыкаются аналогично линиям, обусловленным полями нулевой последовательности. При соединении обмотки высокого напряжения трансформатора в треугольник эти потоки компенсируются, что приводит к невозможности проникновения гармоник токов, кратных трем, в питающую сеть (см. рис. 8).

При однофазной нагрузке трансформатора (крайний случай несимметрии) с той же схемой соединения обмоток компенсация гармониками тока, кратными трем, не достигается, что приводит к полному их проникновению в питающую сеть (рис. 9).

В случае соединения обмоток трансформатора по схеме “звезда — звезда с нулевым выводом”, как известно [14], третьи гармоники тока, эмиттируемые со стороны нагрузки (рассматривается симметричный режим), создают потоки, магнитные силовые линии которых замыкаются по элементам магнитной системы трансформатора (см. рис. 8). Наводимые этими потоками ЭДС третьих гармоник не создают токи в первичной обмотке, так как при соединении обмотки в звезду цепь для их протекания отсутствует.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют, что построение систем освещения на основе энергосберегающих ламп осложняется нелинейным характером нагрузки данных электроприемников. Учет потребляемой реактивной мощности необходим для корректного расчета значения тока, выбора сечения проводников и уставок средств релейной защиты. Учет эмиссии высших гармоник тока позволяет удовлетворить требования к электромагнитной совместимости. Помимо этого следует применять меры к лимитированию эмиссии высших гармоник тока либо к ограничению их распространения путем использования фильтров или трансформаторных развязок.

### Список литературы

1. **Закгейм А. Л.** Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор). — Светотехника, 2012, № 6.
2. **Шахпаруянц Г. З., Атаев А. Е.** Светотехника. Пути развития и перспективы. — Изв. академии электротехн. наук, 2008, № 1.
3. **Белей В. Ф.** Компактные люминесцентные лампы: электрические характеристики, проблемы электромагнитной совместимости. — Электротехника, 2002, № 7.
4. **Verderber R. R., Morse O. C., Alling W. R.** Harmonics from compact fluorescent lamps. — IEEE Trans. Ind. Appl., 1993, № 5.
5. **Поливанов К. М.** Теоретические основы электротехники. — М.: Энергия, 1972.
6. **Виноградов А. А., Зябкина О. Н.** Показатели качества электрической энергии, обусловленные применением светодиодных светильников. — Вестник Белгородского технологич. ун-та им. В. Г. Шухова, 2013, № 1.
7. **Белей В. Ф., Харитонов М. С.** Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп сетевого напряжения. — Промышленная энергетика, 2012, № 9.
8. **Правила устройства электроустановок. 7-е издание.** — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2013.
9. **Миронов С.** Режим питания нарушать нельзя: модули питания для осветительных светодиодов. — Новости электротехники плюс светотехника, 2013, № 1.
10. **Shrivastava A., Singh B.** Improved power quality based highbrightness LED lamp driver. — International Journal of Engineering, Science and Technology, 2012, vol. 4, No. 1.
11. **Никифоров С.** Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества. — Компоненты и технологии, 2005, № 5.
12. **ГОСТ Р 54149–2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
13. **Цырук С. А., Янченко С. А.** Гармонический анализ нелинейных электроприемников офисных центров. — Промышленная энергетика, 2012, № 3.
14. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Ч. I. Трансформаторы. — М.: Энергия, 1974.