

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Анализ гармонической эмиссии распространенных видов современных бытовых нелинейных электроприемников

Янченко С. А., канд. техн. наук

НИУ “МЭИ”, Москва



Янченко С. А.

На основе экспериментальных данных проанализированы формы кривых и спектры высших гармоник тока основных групп нелинейных электроприемников. Для различных уровней мощности электроприемников указаны наиболее вероятные схемы коррекции коэффициента мощности. Исходя из фазных спектров высших гармоник, предложены комбинации бытовых электроприемников, характеризующиеся естественным снижением несинусоидальности суммарного тока за счет противофазности векторов высших гармоник.

Ключевые слова: высшие гармоники, нелинейный электроприемник, коррекция коэффициента мощности, компенсация высших гармоник, фазовый спектр высших гармоник, компактная люминесцентная лампа, источник питания, светодиодная лампа.

С ростом доли нелинейных электроприемников (ЭП) в бытовом электропотреблении возникают нестандартные проблемы в обеспечении качества электроэнергии (КЭ), требуемого ГОСТ Р 51317.3.2–2006 [1]. Общепринятые для этого методы в промышленности, например, использование фильтров высших гармонических составляющих (ВГ), оказываются малоэффективными при питании совокупностей бытовых нелинейных ЭП, характеризующихся неравномерным режимом работы, большой разрозненностью и разнообразием топологий. При этом электроприборы одного и того же вида могут иметь различные схемы исполнения, а значит, по-разному влиять на сеть в зависимости от своей мощности. Например, у светодиодных ламп (СЛ) мощностью от 1 до 15 Вт можно выделить около 10 различных схем входных каскадов источников питания (ИП) с резко импульсной или синусоидальной кривой питающего тока. Классифицировать такое разнообразие можно по уровню искажения кривой тока питания конкретной схемы, т.е. исходя из разных схем коррекции коэффициента мощности (ККМ) [2]. При этом различают:

недорогие простые схемы без ККМ (рис. 1, а) с коэффициентом гармонических искажений тока $K_I > 100\%$ и коэффициентом мощности $PF \approx 0,5$;

схемы пассивной коррекции коэффициента мощности (ПККМ) с громоздкими реактивными элементами (рис. 1, б – е), низкой эффективностью, $K_I = 50 - 100\%$ и $PF < 0,8$;

сравнительно дорогие и сложные схемы активной коррекции коэффициента мощности (АККМ) с высокочастотным преобразователем (рис. 1, ж), $K_I < 30\%$ и $PF > 0,9$.

Учитывая требования ГОСТ к уровням гармонической эмиссии тока нелинейных ЭП, зависящим от их номинальной мощности, выбор той или иной схемы ККМ всегда является компромиссом между стоимостью и достигаемым уровнем синусоидальности тока. В данной статье приведен анализ соответствия существующих схемных решений и реального уровня несинусоидальности тока для наиболее распространенных нелинейных ЭП:

компьютерной техники — персональных компьютеров (ПК), ноутбуков, интернет-оборудования;

бытовой электроники — жидкокристаллических (ЖК) телевизоров (ТВ), ТВ с электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ) аудиосистем, зарядных устройств;

энергосберегающих источников освещения — компактных люминесцентных (КЛЛ) и светодиодных ламп (СЛ).

В каждой группе выделяли ЭП без ККМ, с ПККМ и АККМ и при необходимости рассматривали подвиды этих схем.

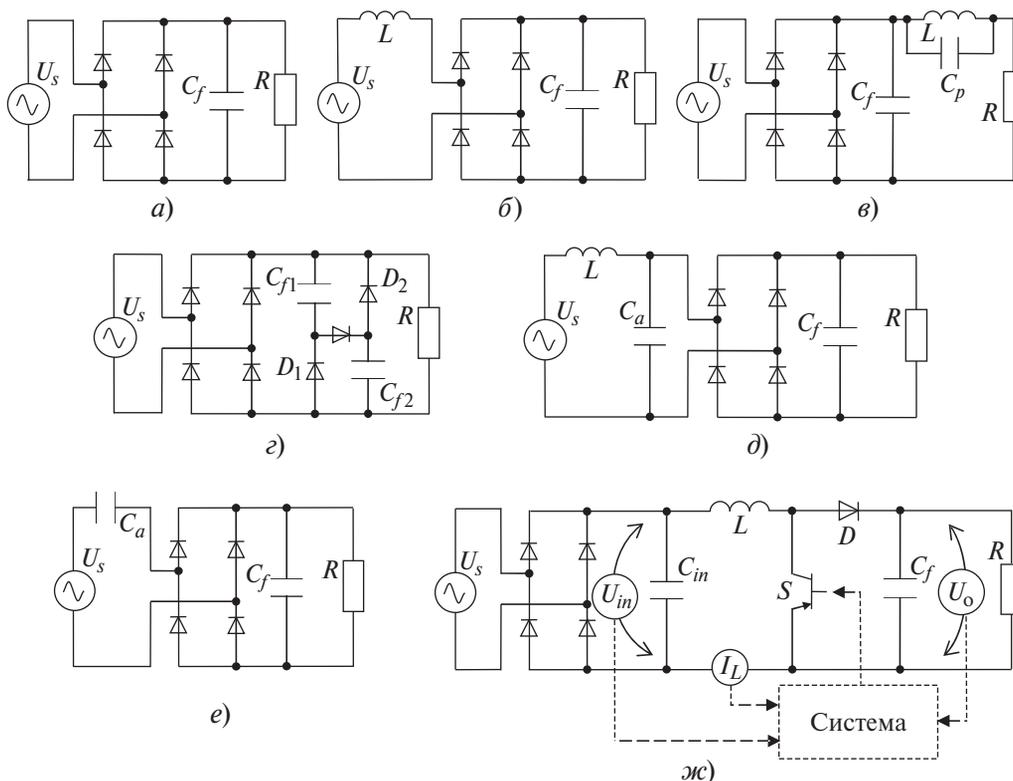


Рис. 1. Распространенные виды схем входных каскадов ИП бытовых нелинейных ЭП

Персональные компьютеры и ноутбуки

В соответствии с [1] для ПК и прочей бытовой электроники, относящейся к категории D, в зависимости от номинальной мощности $P_{ном}$ установлено два вида норм: менее жесткие — при $P_{ном} < 75$ Вт и более жесткие — при $P_{ном} > 75$ Вт. С учетом этого в табл. 1 приведены характеристики электропотребления некоторых настольных ПК и ноутбуков. Среди них можно выделить два противоположных типа:

у ПК без ККМ (п. 1) — низкие номинальная $P_{ном}$ и потребляемая $P_{потр}$ мощности, высокий коэффициент гармонических

искажений K_I и низкий коэффициент мощности PF ;

у ПК с АККМ (п. 3, 5) — высокие значения $P_{ном}$ и $P_{потр}$, низкий K_I и высокий PF .

На рис. 2, а, б показаны кривые и спектры ВГ тока питания рассматриваемых ЭП. Кривая тока I представляет собой узкий импульс, обусловленный коротким интервалом проводимости диодов выпрямителя входного каскада ЭП. Данной кривой тока соответствует схема входного каскада на рис. 1, б, в которой вследствие взаимодействия конденсатора большой емкости C_f и дросселя фильтра электромагнитных помех (ЭМП) небольшой индуктивности L имеют место вы-

Таблица 1

Номер п/п	ЭП	$P_{ном}$, Вт	$P_{потр}$, Вт	K_I , %	PF
1	ПК без ККМ	200	61	196	0,45
2	ПК с ПККМ	300	190	77	0,76
3	ПК с АККМ	450	150	10	0,98
3'	ПК с АККМ	450	75	47	0,88
4	Ноутбук без ККМ	36	33	230	0,37
5	Ноутбук с АККМ	90	42	16	0,94

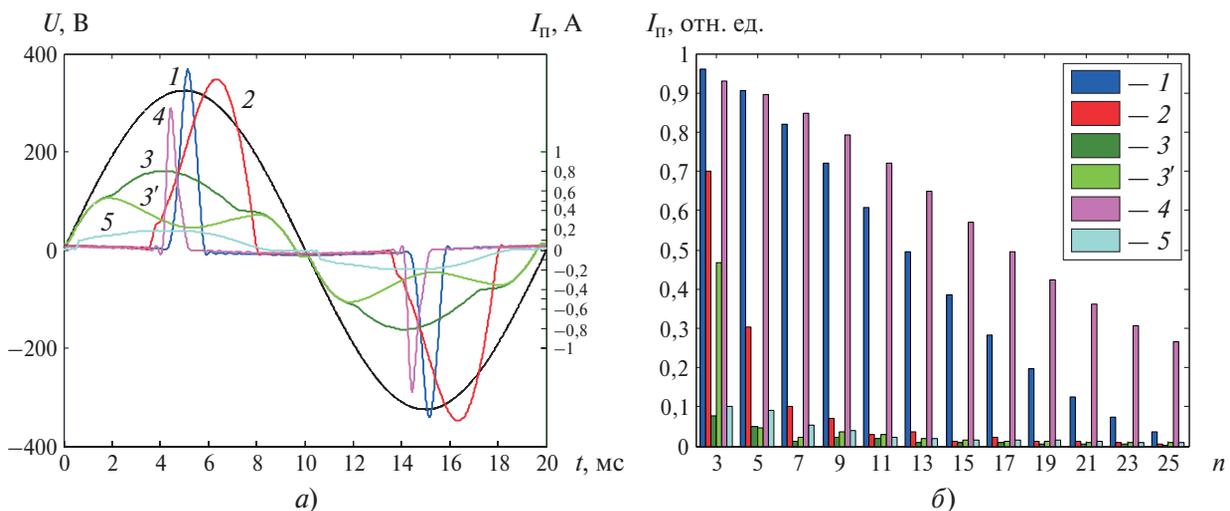


Рис. 2. Кривые (а) и спектры ВГ (б) тока питания ПК:

1 и 2 — настольные ПК 200 и 300 Вт; 3 и 3' — настольный ПК 450 Вт с нагрузками 150 и 75 Вт; 4 и 5 — ноутбуки 36 и 90 Вт

сокий уровень искажения и низкий коэффициент мощности (см. табл. 1). Амплитудный спектр ВГ тока кривой 1 (рис. 2, б) характеризуется низкой скоростью затухания с ростом порядка ВГ, что влечет за собой появление значительных уровней гармоник высоких порядков. Несмотря на то, что $P_{\text{ном}} = 200$ Вт превышает 75 Вт, данный ИП не имеет схемы ККМ, поскольку был выпущен в годы, когда существовали “мягкие” нормы эмиссии ВГ. Поэтому при вводе новых ГОСТ возможна недопустимо высокая эмиссия ВГ при их использовании.

В отличие от кривой 1 кривая 2 имеет более широкий интервал протекания тока и соответственно более низкий уровень несинусоидальности (см. табл. 1) из-за наличия на выходе выпрямителя LC -контура, включающего в себя дроссель с большой индуктивностью L и конденсатор с небольшой емкостью C_p (см. рис. 1, в). После открытия диодов выпрямителя ток сначала протекает через конденсатор C_p , а после его заряда — через дроссель L , в результате чего импульс тока становится шире. В итоге в спектре присутствуют в основном ВГ низких порядков (3-го и 5-го). Благодаря относительно небольшой стоимости и соответствию требованиям ГОСТ данная схема широко применяется в источниках питания ПК мощностью от 75 до 400 Вт [3].

Близкую к синусоидальной форму имеет кривая тока 3, что достигается за счет использования схемы АККМ, а именно — повышающего преобразователя, включаемого между выпрямителем и силовой частью ИП (рис. 1, ж). Под действием системы управления преобразователь

формирует синусоидальную форму кривой тока питания, что обуславливает значительное снижение ВГ, максимальной из которых является 3-я гармоника с амплитудой менее 10%.

Несмотря на высокую стоимость, применение подобных схем в ПК становится экономически оправданным с увеличением номинальной мощности. Так, современные ИП ПК мощностью более 500 Вт практически всегда имеют в своем составе схему АККМ [3]. Существенным недостатком мощных схем с АККМ является значительное увеличение искажения кривой тока при низкой нагрузке ИП. Указанное объясняется прямой зависимостью между эффективностью ККМ и значением нагрузки ИП: при малых нагрузках преобразователь схемы АККМ переходит в нестандартный для себя режим работы, и система управления больше не может обеспечивать синусоидальность кривой входного тока. Это иллюстрирует кривая 3', соответствующая нагрузке 75 Вт на ИП ПК с АККМ. Для подобного варианта характерно многократное увеличение K_I и значительное снижение коэффициента мощности по сравнению с этими параметрами в случае, когда нагрузка на ИП составляет 150 Вт (кривая 3). При незагруженной работе ИП ПК несинусоидальность увеличивается в основном за счет роста амплитуды 3-й ВГ (рис. 2, б).

Аналогично описанному выше короткому импульсу тока питания настольного ПК кривая тока 4 ноутбука имеет резко несинусоидальную форму из-за использования конденсатора большой емкости при отсутствии какой-либо схемы ККМ (см. рис. 1, а). В

Таблица 2

$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	Тип ККМ	Схема входного каскада (рис. 1)	Форма кривой тока (рис. 2, а)
< 75	–	Выпрямитель с конденсатором C_f и дросселем L фильтра ЭМП (δ)	Узкий импульс в момент пика кривой напряжения (кривая 1)
75 – 400	ПККМ	Выпрямитель с конденсатором C_f и LC-контуром на выходе (ϵ)	Широкий нарастающий импульс (кривая 2)
> 400	АККМ	Выпрямитель с конденсатором C_f и повышающим преобразователем на выходе (ζ)	Синусоидальная форма с участками нулевого тока в моменты протекания через нуль (кривая 3)

результате ток представляет собой узкий треугольный импульс, продолжительность которого соответствует времени заряда конденсатора C_f . Низкий коэффициент мощности, высокое значение K_I (см. табл. 1) обуславливают применение данной схемы в маломощных ИП ноутбуков.

В более мощном ИП ноутбука, которому соответствует кривая 5, используется схема ККМ. О наличии АККМ здесь свидетельствует синусоидальная форма кривой тока, имеющая характерные для всех схем с АККМ интервалы нулевого тока в моменты перехода кривой напряжения через нуль. В спектре кривой тока питания ноутбука 90 Вт существенный уровень имеют только 3-я и 5-я ВГ.

На основе приведенного анализа составлена табл. 2, в которой для ИП ПК различной мощности указаны предполагаемые схемы его входных каскадов.

Бытовая электроника

Аналогично описанным выше ПК ГОСТ [1] относит бытовую электронику к категории D, что обуславливает различия в видах входных каскадов ЭП с номинальной мощностью менее и более 75 Вт. В соответствии

с табл. 3 можно выделить два противоположных типа характеристик бытовых ЭП:

без ККМ (пп. 1, 4, 6) — малая $P_{\text{ном}}$, высокий K_I и низкий PF ;

с АККМ (п. 3) — большая мощность, низкий K_I и PF , близкий к 1.

На рис. 3 представлены кривые тока приборов бытовой электроники. Кривые тока 1, 4, 6 имеют наиболее характерную для бытовой электроники (ТВ, мониторы, аудио- и видеотехника) форму резкого импульса, соответствующую непродолжительному времени заряда конденсатора. Из-за потребности данных ЭП в постоянном напряжении с минимальной колебательной составляющей на их входе используются конденсаторы большой емкости с малым временем заряда, а значит, небольшим интервалом протекания тока. В результате ЭП таких видов характеризуются высоким K_I и низким PF (см. табл. 3). Даже у ВГ высоких порядков амплитуды соизмеримы с амплитудой первой гармоники, что видно на примере кривой тока маломощных аудиокколонок, для которых K_I составляет 314 % (рис. 3, б). Тем не менее согласно рекомендациям [1] вследствие малой номинальной мощности рассматриваемых ЖК монитора, аудиокколонок и зарядного устройства

Таблица 3

Номер п/п	ЭП	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$P_{\text{потр}}, \text{Вт}$	$K_I, \%$	PF
1	ЖК монитор без ККМ	40	20	185	0,44
2	ЭЛТ ТВ с ПККМ	60	48	94	0,71
3	ЖК телевизор с АККМ	160	67	18	0,9
4	Аудиоколонки без ККМ	5	1	314	0,3
5	Интернет-модем	15	10	56	0,75
6	Зарядное устройство	7	3,2	179	0,7

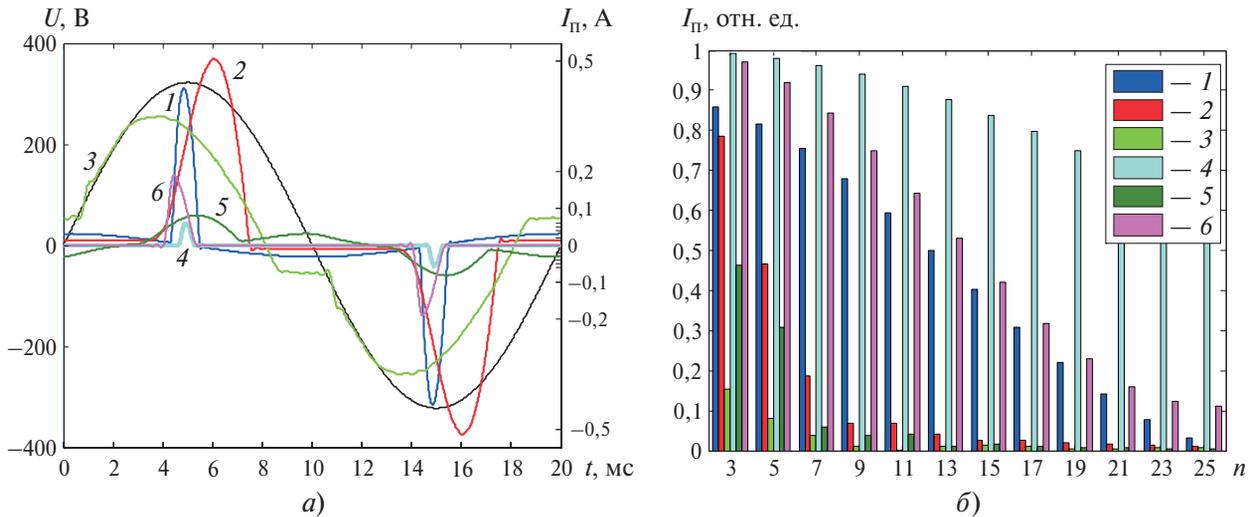


Рис. 3. Кривые (а) и спектры (б) тока питания бытовой электроники:

1 — 19-дюймовый ЖК монитор; 2 — 20-дюймовый ЭЛТ ТВ 60 Вт; 3 — 32-дюймовый ЖК ТВ 160 Вт; 4 — аудиокolonки 5 Вт; 5 — интернет-модем 15 Вт; 6 — зарядное устройство мобильного телефона 7 Вт

Таблица 4

$P_{ном}$, Вт	Тип ККМ	Схема входного каскада (рис. 1)	Форма кривой тока (рис. 3, а)
< 50	—	Выпрямитель с конденсатором C_f и дросселем L фильтра ЭМП (б)	Узкий импульс в момент пика кривой напряжения (кривые 1, 4, б)
> 100	АККМ	Выпрямитель с конденсатором C_f и повышающим преобразователем на выходе (ж)	Синусоидальная форма с участками нулевого тока в моменты протекания через нуль (кривая 3)

мобильного телефона можно не проводить мероприятия по снижению токовых искажений.

Увеличение потребляемой мощности вызывает необходимость использования средств ККМ. Так, кривая тока 2 ЭЛТ ТВ формируется с помощью схемы ПККМ, включающей дроссель большой индуктивности, который сглаживает импульс тока при заряде конденсатора (см. рис. 1, б). Основной вклад в не-синусоидальность тока вносят ВГ низких порядков (3-, 5- и 7-я), остальные ВГ пренебрежимо малы (см. рис. 3, б). Пониженный уровень искажений достигается за счет расширения интервала протекания тока, а значит, заряда конденсатора, что может негативно отразиться на качестве постоянного напряжения. Таким образом, использование ПККМ предполагает соблюдение компромисса между синусоидальностью тока и постоянством напряжения питания. Кроме того, по мере роста номинальной нагрузки ЭП эффективность ПККМ снижается вследствие дополнительных потерь от реактивных элементов.

Этих недостатков лишена схема АККМ, применяемая при формировании кривой 3 более мощного ЖК ТВ. Несмотря на наличие интервала нулевого тока, выражающегося в виде 10 %-ного уровня 3-й гармоники в спектре ВГ, здесь обеспечиваются низкий K_f и высокий коэффициент мощности (см. табл. 2).

Кривая тока 5 соответствует схеме входного каскада на рис. 1, д. Включение LC -контур на входе выпрямителя позволяет значительно снизить K_f , сохранив PF на высоком уровне. В итоге в спектре ВГ кривой 5 основной вклад в искажения вносят 3-я и 5-я гармоники.

Таким образом, требования, предъявляемые ГОСТ [1] к гармонической эмиссии ЭП, стимулируют производство маломощных ЭП с высоким уровнем искажений кривой тока как наиболее выгодных с точки зрения минимизации затрат на ККМ. Поэтому можно считать, что чем меньше мощность нелинейного ЭП, тем выше гармоническая эмиссия его тока питания в сеть.

В табл. 4 содержится информация о предполагаемых схемах входных каскадов, соответствующих ЭП бытовой электроники различных мощностей. Если для ЭП мощностью менее 50 и более 100 Вт можно определить эти схемы, то для электронных приборов с $P_{\text{ном}}$ от 50 до 100 Вт существует большое их разнообразие (в зависимости от года производства и страны использования ЭП).

Энергосберегающие источники освещения

В соответствии с [1] ЭП освещения относятся к категории С. На практике это означает применение более жестких норм эмиссии к лампам мощностью более 25 Вт, что обуславливает использование той или иной схемы ККМ.

Компактные люминесцентные лампы

Данные табл. 5, в которой приведены параметры электропотребления, свидетельствуют о том, что использование схем ККМ в КЛЛ экономически целесообразно только при $P_{\text{ном}} \geq 30$ Вт. Поэтому в лампах небольшой мощности ККМ отсутствует, что негативно отражается на K_I и PF . Кривые тока и дан-

ные о гармонической эмиссии рассматриваемых КЛЛ представлены на рис. 4.

Кривая 1 треугольной формы соответствует схеме КЛЛ без ККМ — наиболее распространенной среди ламп небольшой мощности. Из-за отсутствия во входном каскаде каких-либо реактивных элементов кроме конденсатора C_f существует тесная связь между формой кривой тока и значением емкости конденсатора: чем емкость меньше, тем дольше заряжается конденсатор, а значит, шире импульс тока и ниже уровень несинусоидальности. Поэтому, учитывая требования к допустимому уровню колебательной составляющей в постоянном напряжении, емкость конденсатора C_f выбирают максимально низкой — для ламп мощностью менее 25 Вт — обычно не более 15 мкФ [4]. При этом спектр ВГ тока КЛЛ малой мощности формируется в основном из ВГ низких и средних порядков (см. рис. 4, б), а схема питания характеризуется высоким K_I и низким коэффициентом мощности. Такие параметры несколько снижают энергосберегающий эффект КЛЛ с низким коэффициентом мощности, поскольку им свойственно повышенное значение потребляемой реактивной мощности. С учетом активной нагрузки полная

Таблица 5

Номер п/п	ЭП	$P_{\text{ном}}$, Вт	$P_{\text{потр}}$, Вт	K_I , %	PF
1	КЛЛ без ККМ	15	14,3	98	0,62
2	КЛЛ с АККМ	30	30,5	19,8	0,97
3	КЛЛ с ПККМ	35	31	34	0,94

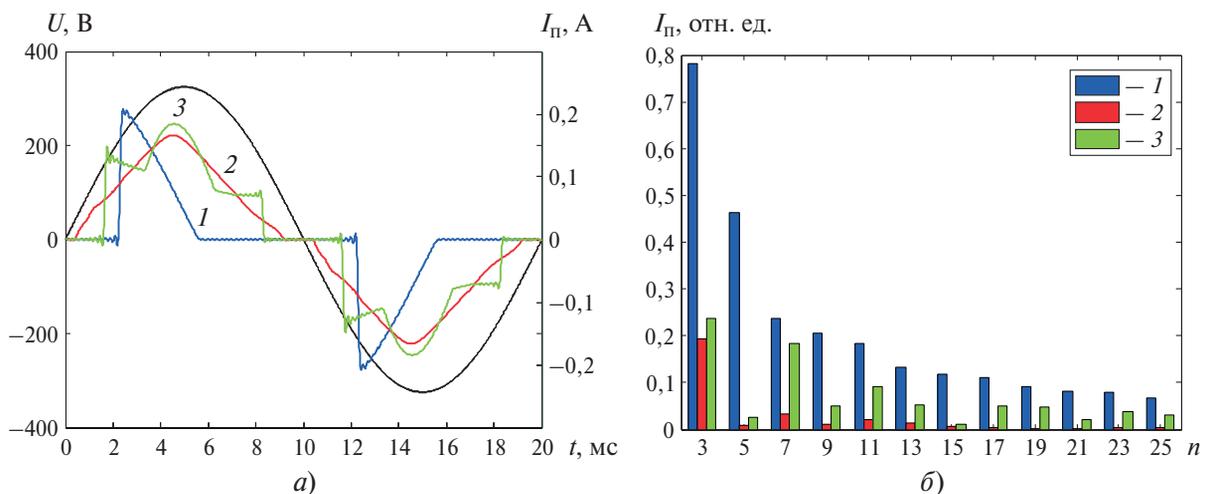


Рис. 4. Кривые (а) и спектры ВГ (б) тока питания различных энергосберегающих газоразрядных ламп: 1 – 3 — КЛЛ 15, 30, 35 Вт соответственно

Таблица 6

$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	Тип ККМ	Схема входного каскада (рис. 1)	Форма кривой тока (рис. 4, а)
< 25	–	Выпрямитель с конденсатором (а)	Треугольный импульс в течение первой половины полуволны напряжения (кривая 1)
> 25	АККМ	Выпрямитель с конденсатором C_f и повышающим преобразователем на выходе (ж)	Синусоидальная форма с участками нулевого тока в моменты протекания через нуль (кривая 3)

мощность КЛЛ без ККМ может снижаться не столь значительно, как это следует из сравнения активных мощностей КЛЛ и традиционной лампы накаливания. Например, КЛЛ 15 Вт с коэффициентом мощности 0,5 потребляет 30 кВ·А, что соответствует потреблению лампы накаливания 75 Вт. Но несмотря на снижение потребления активной мощности, внедрение энергосберегающих газоразрядных ламп с низким коэффициентом мощности может сопровождаться повышением потребления реактивной мощности.

Форма кривой тока 2 близка к синусоидальной, что характерно для мощных КЛЛ с АККМ (см. рис. 1, ж). Искажение ее при переходе через нуль обуславливает наличие в спектре тока 3-й ВГ (рис. 4, б), однако суммарный коэффициент гармонических искажений K_I сравнительно невелик, а коэффициент мощности близок к единице (см. табл. 5). Благодаря постоянству во времени нагрузки КЛЛ загруженность схемы с АККМ максимальна, что позволяет наиболее эффективно подавлять ВГ.

При питании мощных КЛЛ популярной стоимостной альтернативой схеме АККМ является схема ПККМ с заполнением впадины кривой тока (см. рис. 1, з), в которой форма кривой тока соответствует форме кривой 3 на рис. 4, а. Интервал протекания тока увеличивается за счет использования двух диодов (D_1 и D_2), поочередно заряжающих кон-

денсаторы C_{f1} и C_{f2} , в результате чего расширяется импульс тока и снижается уровень несинусоидальности. В спектре ВГ присутствуют в основном 3-, 7- и 11-я гармонические составляющие. В табл. 6 приведены наиболее вероятные схемы входных каскадов КЛЛ различной мощности.

Светодиодные лампы

О широком разнообразии имеющихся на рынке топологий СЛ свидетельствует большое количество ламп, характеристики которых представлены в табл. 7 и на рис. 5. В отличие от более или менее унифицированных схем КЛЛ две СЛ одной номинальной мощности могут иметь совершенно разные схемы входных каскадов и соответственно различные уровни искажения тока питания. Такая неоднородность вызвана малой номинальной мощностью светодиодов (< 25 Вт), используемых в бытовых условиях, а значит, менее жесткими требованиями ГОСТ к гармонической эмиссии СЛ, что позволяет, допуская снижение синусоидальности кривой тока, в каждом конкретном случае применять индивидуальную схему с целью улучшения конкретных параметров лампы, например светотехнических или тепловых характеристик [5]. Общим для рассматриваемых СЛ является сравнительно низкий K_I ($\approx 60\%$) и такой же низкий PF (< 0,7).

Таблица 7

Номер п/п	ЭП	$P_{\text{ном}}, \text{Вт}$	$P_{\text{потр}}, \text{Вт}$	$K_I, \%$	PF
1	СЛ с ПККМ	3,5	3,2	57	0,46
2	СЛ без ККМ	5	4,7	104	0,6
3	СЛ с ПККМ	7	6,3	75	0,67
4	СЛ с ПККМ	9	9,6	58	0,8
5	СЛ с АККМ	12	11	63	0,82

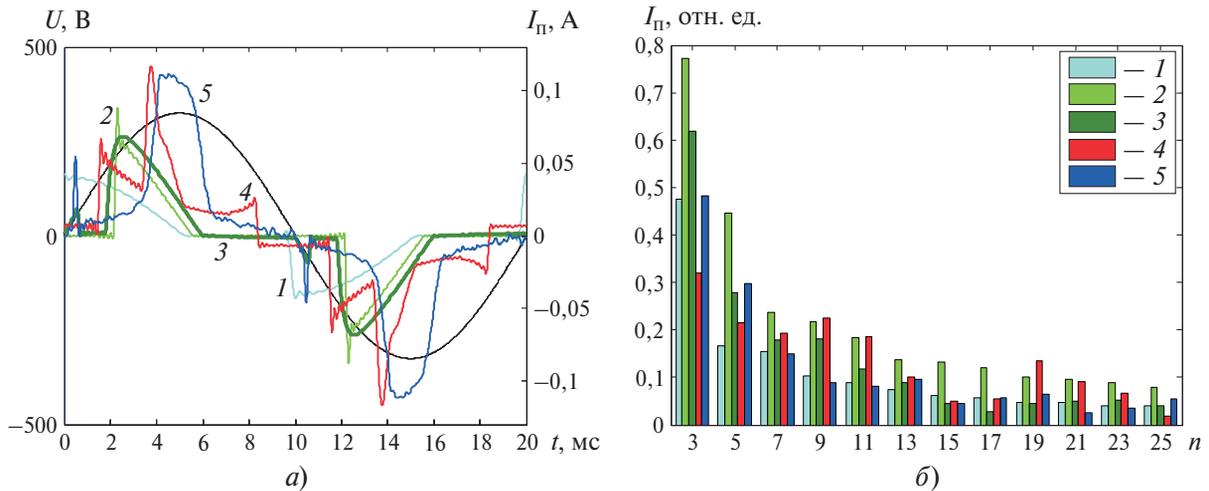


Рис. 5. Кривые (а) и спектры ВГ (б) тока питания различных СЛ:

1 – 5 — СЛ 3,5, 5, 7, 9, 12 Вт соответственно

Таблица 8

$P_{ном}, Вт$	Тип ККМ	Схема входного каскада (рис. 1)	Форма кривой тока (рис. 5, а)
< 5	ПККМ	Выпрямитель с конденсатором и последовательно включенным на входе небольшим конденсатором (e)	Срезанная синусоида, опережающая кривую напряжения на 90° (кривая 1)
7 – 9	ПККМ	Выпрямитель с конденсатором и схемой заполнения впадины кривой тока (z)	Серия из трех пиков тока, равномерно распределенных в течение полупериода (кривая 4)

Например, кривая тока 1 на рис. 5, а имеет широкий импульс, сдвинутый относительно кривой напряжения. Подобная ее форма обусловлена последовательным включением конденсатора C_a небольшой емкости (1 – 3 мкФ) в фазе входного каскада СЛ (см. рис. 1, e), в результате чего за счет значительного снижения коэффициента мощности ($PF < 0,5$) достигается максимально низкий K_f без использования схем АККМ. В спектре ВГ (рис. 5, б) присутствуют в основном гармонические составляющие низких порядков.

Кривая тока 2, соответствующая кривой в традиционной схеме КЛЛ без ККМ (см. рис. 1, а), имеет резко несинусоидальную треугольную импульсную форму и высокий K_f . Форма кривой тока 3 — такая же, как и кривой 2, но с добавлением небольшого токового пика в момент перехода кривой напряжения через нуль. Как следует из спектра ВГ тока для данной СЛ (рис. 5, б), наличие этого пика позволяет значительно снизить уровни наиболее важных 3-й и 5-й ВГ по сравнению с их уровнем в спектре кривой 2 и тем самым уменьшить суммарный коэффициент гармонических искажений K_f .

При питании более мощных светодиодов (> 9 Вт) — кривая 4 на рис. 5, б — требуется большее подавление эмиссии ВГ, что в данном случае осуществляется с помощью схемы с заполнением впадины кривой тока (рис. 1, z). Данная схема обеспечивает сравнительно небольшие уровни ВГ низких порядков (до 11-го).

Кривая 5 получается с использованием схемы АККМ (см. рис. 1, $ж$) [5]. Недостаточная степень синусоидальности кривой тока объясняется малой загруженностью ИП СЛ. В результате в спектре ВГ тока данной СЛ присутствуют в основном 3-я и 5-я гармонические составляющие.

В связи с большим разнообразием схем входных каскадов СЛ в табл. 8 приведены наиболее вероятные из них лишь для некоторых уровней мощности.

Фазовые спектры ВГ низких порядков бытовых нелинейных ЭП

При рассмотрении гармонической эмиссии нелинейных ЭП обычно основное внимание уделяется амплитудным спектрам ВГ.

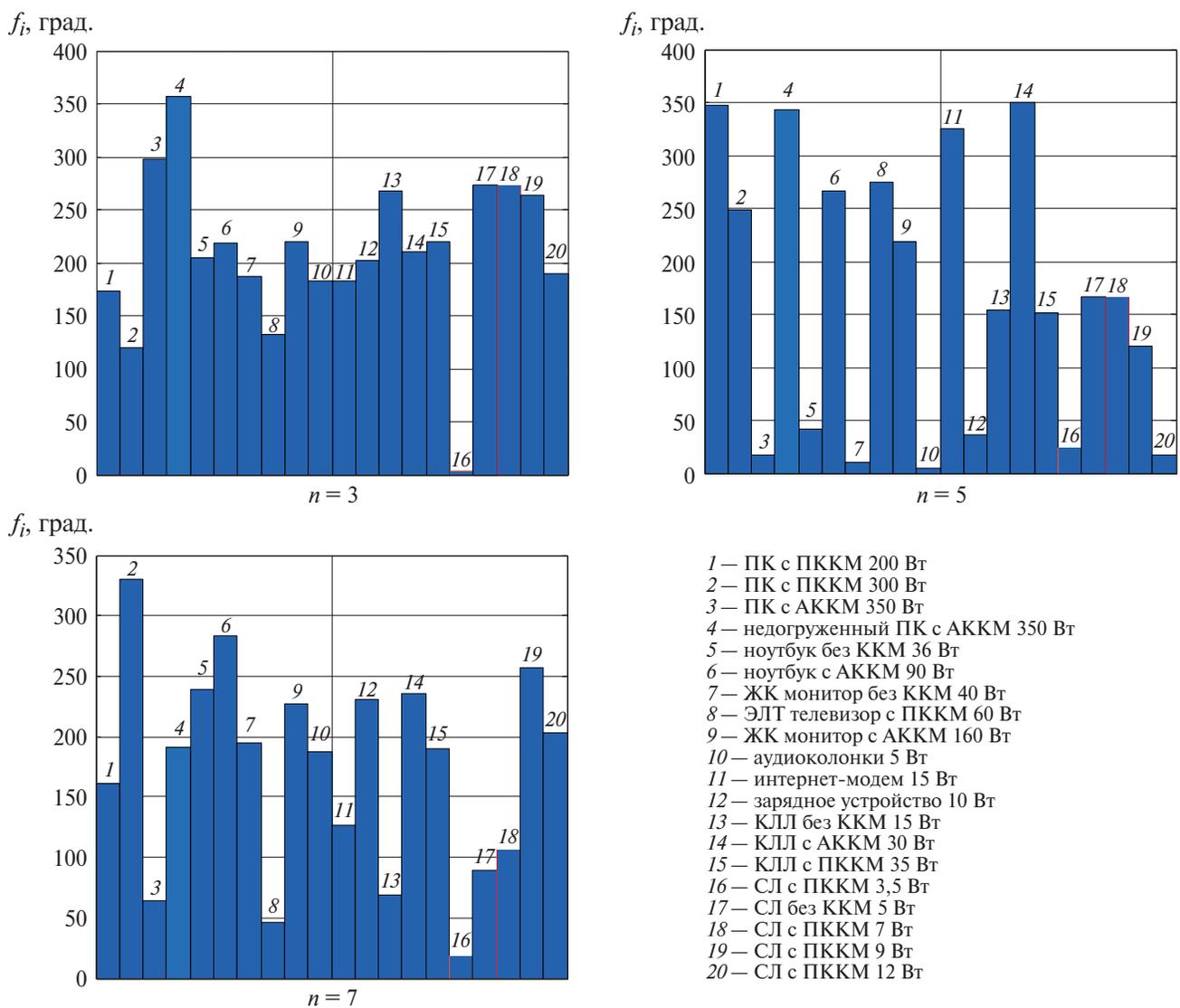


Рис. 6. Фазовые спектры ВГ низких порядков (3-й, 5-й и 7-й) исследованных ЭП

Между тем на практике распространены случаи, когда при одновременной работе нескольких нелинейных ЭП уровень искажений суммарной кривой тока питания ЭП ниже, чем при индивидуальном их подключении. Такое снижение уровня несинусоидальности объясняется частичной или полной компенсацией отдельных ВГ, находящихся в противофазе [6]. Противоположная ситуация может наблюдаться при совпадении фаз ВГ тока, когда совместная работа ЭП сопровождается алгебраическим суммированием синфазных ВГ.

Как показано в [7], с увеличением порядка ВГ возрастает случайность их фаз, поэтому исследование устойчивых и воспроизводимых в разных условиях характеристик гармонической эмиссии бытовых ЭП целесообразно проводить для гармоник низких порядков — 3-, 5-, 7-й, которые вносят основной вклад

в искажение кривой тока. Учитывая устойчивость фазовых спектров гармоник низких порядков к воздействию внешних факторов, можно для каждого типа нелинейного ЭП определить наиболее вероятный диапазон значений фазовых углов [2]. Благодаря тому, что этот диапазон индивидуален для конкретного ЭП и на него слабо влияет несинусоидальность напряжения сети, возможно прогнозирование уровня несинусоидального режима в ней на основе анализа состава питаемых ЭП.

На рис. 6 представлены фазовые спектры основных ВГ низких порядков (3-, 5- и 7-й) исследованных ЭП при питании их от источника синусоидального напряжения.

Максимальный эффект компенсации наблюдается для ВГ, находящихся в противофазе, когда разность значений углов близка к 180° . В списке исследованных ЭП можно

выделить комбинации с максимальной и минимальной компенсацией несинусоидальности при одновременном их включении. Например, наиболее эффективное снижение искажений наблюдается:

для 3-й ВГ — при питании настольного ПК с АККМ (3) и настольного ПК с ПККМ (2) / ЭЛТ ТВ с ПККМ (8), а также СЛ с ПККМ (16) и аудиоколонок (10) / интернет-модема (11);

для 5-й ВГ — при питании интернет-модема (11) и КЛЛ без ККМ (13);

для 7-й ВГ — при питании ЭЛТ ТВ с ПККМ (8) и ноутбука без ККМ (5), а также СЛ с ПККМ (16) и аудиоколонок (10).

Что касается отсутствия компенсации амплитуд ВГ тока, оно характерно:

для 3-й ВГ — при питании аудиоколонок (10), интернет-модема (11), СЛ с ПККМ (20), а также СЛ без ККМ (17), СЛ с ПККМ (18), СЛ с ПККМ (19);

для 5-й ВГ — при питании КЛЛ без ККМ (13) и КЛЛ с ПККМ (15), а также аудиоколонок (10), интернет-модема (11), СЛ с ПККМ (20) либо СЛ без ККМ (17), СЛ с ПККМ (18);

для 7-й ВГ — при питании ПК с АККМ (4), ЖК монитора без ККМ (7), КЛЛ с ПККМ (15), СЛ с ПККМ (20).

Из спектров на рис. 6 также следует, что фазовые углы 3-й ВГ у большинства исследованных ЭП имеют близкие значения, т.е. отсутствует компенсация токов на частоте 3-й ВГ. В то же время на частотах 5-й и 7-й гармоник фазовые углы у ЭП гораздо более неоднородны, что способствует снижению несинусоидальности за счет противофазности ВГ.

Выводы

1. Основным источником гармонической эмиссии бытовых нелинейных ЭП является мостовой выпрямитель с конденсатором. Его влияние, обуславливающее несинусоидальность кривой тока питания, снижается с по-

мощью разнообразных схем ККМ, позволяющих в зависимости от требований ГОСТ, мощности ЭП и стоимостных показателей подавлять уровень искажений, вносимых конкретным ЭП, до желаемого уровня.

2. Несмотря на разнообразие этих схем, для каждого типа нелинейных бытовых ЭП в зависимости от мощности существуют наиболее вероятные виды схем ККМ. Учитывая важное значение фазовых спектров ВГ бытовых ЭП, можно указать их комбинации, которые будут иметь пониженный или повышенный уровень гармонических искажений.

Список литературы

1. **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.
2. **Meyer J., Schegner P., Heidenreich K.** Harmonic summation effects of modern lamp technologies and small electronic household equipment. — 21st International conference on electricity distribution, Frankfurt, 6–9 June 2011.
3. **Panda** equipment harmonic database (<http://www.panda.et.tu-dresden.de/cgi-bin/PANDA.cgi>).
4. **Component-based** aggregate load models for combined power flow and harmonic analysis / A. J. Collin, J. L. Acosta, B. P. Hayes, S. Z. Djokic. — Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on, vol. 1, no. 7–10 Nov., 2010.
5. **Investigation** of Harmonic Generation from Low Wattage LED Lamps / S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, M. A. Hannan. — Journal of Applied Sciences Research, 2012, № 8(8).
6. **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.
7. **An analysis** of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps / V. Cuk, J. F. G. Cobben, W. L. Kling, R. B. Timens. — Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, vol. 1, 26–29 Sept, 2010.

yanchenko_sa@mail.ru