

# Корректоры коэффициента мощности

## однофазных источников бесперебойного питания

Приведена классификация современных однофазных корректоров коэффициента мощности (ККМ–бустеров) применительно к источникам бесперебойного питания (ИБП) переменного тока. Дается анализ структур ККМ и их энергетических характеристик.

Валерий Климов, к. т. н.

klimov@ruselt.ru

Светлана Климова  
Юрий Карпиленко

### Назначение и функциональные особенности

Необходимость применения корректора коэффициента мощности (ККМ) в структуре источников бесперебойного питания (ИБП) переменного тока диктуется требованиями к электромагнитной совместимости (ЭМС) с сетью [1]. Высшие гармоники тока, создаваемые ИБП как объектом с нелинейной входной характеристикой, могут представлять собой серьезные проблемы ЭМС для систем электроснабжения, так как возникают высшие гармонические составляющие с частотами, кратными основной частоте сети. Отметим, что искажение синусоидальности тока влияет также на форму напряжения питания других потребителей, подключенных к тому же сетевому фидеру. Предельно допустимые значения гармонических составляющих напряжения в точке общего подключения к электрическим сетям с номинальным напряжением 380 В не должны превышать 5% для третьей и 6% для пятой гармоник. Среди основных способов подавления высших гармоник — использование корректоров коэффициента мощности в структурах однофазных ИБП [2]. Обладая свойствами бустера — преобразователя повышенного постоянного напряжения, ККМ-бустер выполняет следующие функции:

- обеспечивает потребление из сети входного тока, совпадающего по фазе с напряжением сети и имеющего практически синусоидальную форму независимо

от характера нагрузки ИБП, благодаря чему входной коэффициент мощности близок к единице;

- осуществляет преобразование напряжения сети переменного тока в напряжение постоянного тока, обеспечивая питание инвертора стабильным напряжением постоянного тока 700–800 В.

### Классификация однофазных ККМ

В основе однофазной структуры ККМ (рис. 1) используется повышающий преобразователь напряжения — AC/DC-бустер, содержащий индуктивный накопитель (дроссель) L, двунаправленный коммутатор (ДК) и удвоитель напряжения (УН) (рис. 2а).

В зависимости от реализации схемы двунаправленного коммутатора можно дать следующую классификацию структур однофазных ККМ:

- структуры на основе двухполюсного двунаправленного ключа;
- дифференциальная структура;
- полумостовая структура.

Рассмотрим подробнее особенности построения каждой из структур ККМ. Так как в настоящее время идеального двунаправленного коммутатора переменного тока не существует, то его реализация связана с использованием однонаправленных полупроводниковых приборов (диодов и транзисторов). Возможны следующие пути создания двунаправленных ключей [3].

Для диодного мостового ключа необходим один управляемый прибор (обычно IGBT) и, соответст-

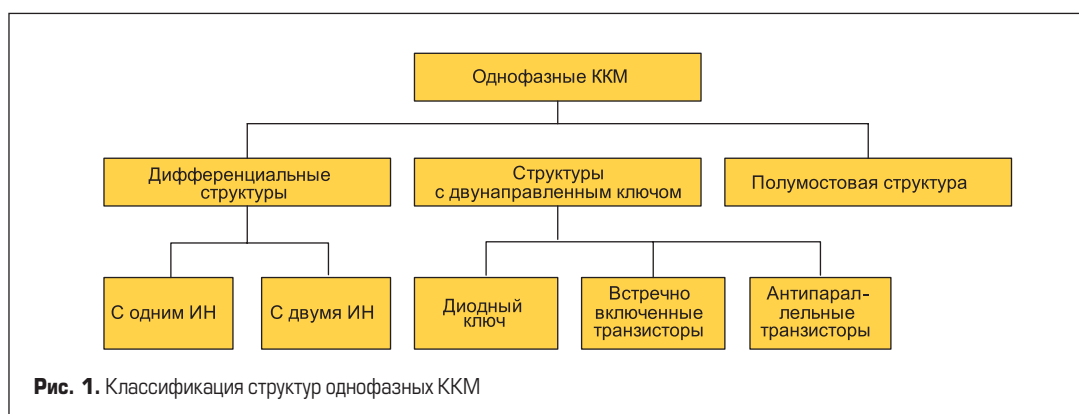
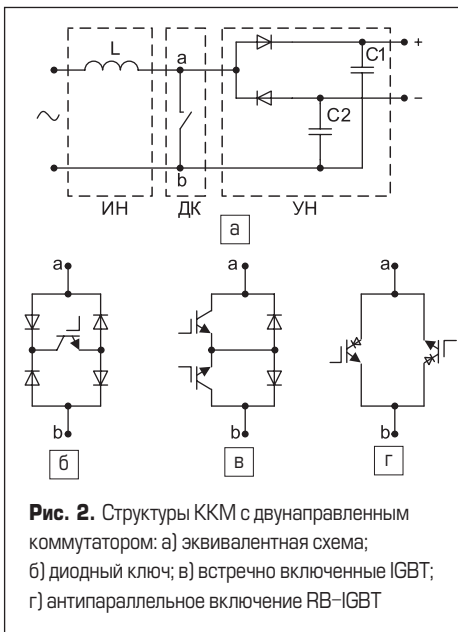


Рис. 1. Классификация структур однофазных ККМ



**Рис. 2.** Структуры ККМ с двунаправленным коммутатором: а) эквивалентная схема; б) диодный ключ; в) встречно включенные IGBT; г) антипараллельное включение RB-IGBT

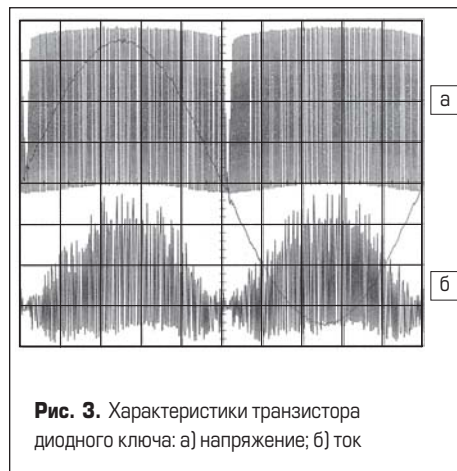
венно, один драйвер управления (рис. 2б). Очевидный недостаток такого коммутатора — это последовательное включение трех полупроводниковых приборов, что увеличивает суммарные статические потери в ключе. Кроме того, транзистор создает цепь проводимости тока при обеих полярностях напряжения сети и, следовательно, не может управлять отдельно направлениями входного тока. Тем не менее, в настоящее время такое решение в силу простоты реализации используется многими производителями ИБП малой мощности (1–3 кВ·А).

Встречно включенные транзисторы и диоды представляют вторую реализацию двунаправленных ключей (рис. 2в). В этом случае можно контролировать протекание тока при изменении полярности входного напряжения, что обеспечивает безопасную коммутацию тока. Кроме того, снижаются потери на проводимость, так как в данный момент времени открыты только два последовательно включенных прибора (транзистор и диод). Для таких коммутаторов необходимы два изолированных источника питания драйверов управления IGBT-транзисторов.

Антипараллельное включение транзисторов представляет третью конфигурацию двунаправленного ключа. Встречно-параллельное включение обычных IGBT требует дополнительных последовательно включенных диодов в цепи коллекторов транзисторов. Это необходимо, так как обычные IGBT, выполненные по NPT-структуре, могут блокировать обратное напряжение не выше 20 В. Новые структуры RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) ключей позволяют исключить диоды и иметь симметричные вольт-амперные характеристики при обеих полярностях напряжения. Основное преимущество такого двунаправленного ключа — это уменьшение числа полупроводниковых приборов и, следовательно, снижение потерь на проводимость, так как только один прибор проводит ток в данное время (рис. 2г). Современные RB-IGBT ключи позволяют работать при напряжениях до 1200 В и токах до 100 А. Падение напряжения на открытых RB-IGBT ключах составляет

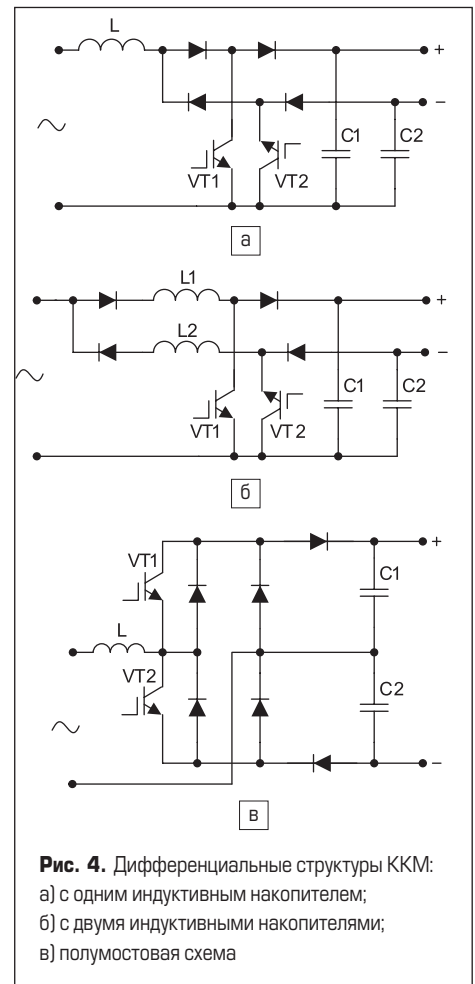
3 В. Для сравнения отметим, что при использовании обычного IGBT четвертого поколения с последовательным диодом это напряжение составляет 3,8 В.

Силовые транзисторы двунаправленных коммутаторов управляются сигналом с широтно-импульсной модуляцией (20–40 кГц) с помощью специализированных микросхем — ШИМ-контроллеров (типа UC 3854), на входы которых поступают сигналы, пропорциональные входному напряжению ( $u_1$ ), входному току ( $i_1$ ) и напряжению на выходе ККМ ( $U_2$ ). Кроме этих сигналов, на ШИМ-контроллер поступает сигнал управления (вкл/выкл) ККМ от центрального микроконтроллера платы управления ИБП. Сигнал ШИМ поступает на затвор IGBT-транзистора через узел сопряжения (оптопару типа TLP 250), обеспечивающий необходимое усиление сигнала и гальваническую развязку цепи управления и силовой цепи транзистора. Формы напряжения и тока транзистора диодного ключа приведены на рис. 3. На накопительных конденсаторах шины постоянного тока C1, C2 формируется высоковольтное стабилизированное постоянное напряжение, необходимое для питания инвертора  $U_2 = \pm 350$  В.



**Рис. 3.** Характеристики транзистора диодного ключа: а) напряжение; б) ток

Дифференциальная структура ККМ выполнена на IGBT-транзисторах VT1, VT2 с использованием одного (рис. 4а) или двух дросселей L1, L2 (рис. 4б). С помощью транзистора положительного плеча бустера (VT1) обеспечивается повышение и стабилизация напряжения на положительной шине постоянного тока в течение одного полупериода сетевого напряжения. С помощью транзистора отрицательного плеча бустера (VT2) в течение другого полупериода происходит повышение и стабилизация выходного напряжения бустера на отрицательной



**Рис. 4.** Дифференциальные структуры ККМ: а) с одним индуктивным накопителем; б) с двумя индуктивными накопителями; в) полумостовая схема

шине относительно общей шины. Применение дифференциальной схемы с двумя индуктивными накопителями позволяет снизить потери мощности в обмотках дросселей за счет уменьшения в два раза токовой нагрузки на каждом из них. Такие схемы ККМ нашли широкое применение в ИБП мощностью более 5 кВ·А. Регулировочные характеристики бустера дифференциальной структуры ККМ обеспечивают широкий диапазон изменения входного напряжения при номинальной нагрузке (таблица). При этом снижение нагрузки до 30% от номинального значения обеспечивает минимальное входное напряжение 120 В.

Полумостовая структура ККМ (рис. 4в) является частным случаем применения управляемого мостового ШИМ-выпрямителя, обычно используемого при трехфазном входном напряжении. Такие структуры имеют ряд недостатков, среди которых: повышенное напряжение на закрытых ключах и амплитуды гармоник на частоте коммутации, пониженное

**Таблица.** Допустимый диапазон входных напряжений однофазных ККМ

Производитель	Модель ИБП	Мощность, кВ·А	Структура ККМ	Входное напряжение*, В	$K_{P\text{ вх}}$ **	Напряжение DC-шины, В
Powerware	PW9120	1; 1,5; 2; 3	Мостовой ключ	160–276	0,95–0,97	720
		5; 6	Дифференциальная	184–276	0,99	
Liebert	GXT-2U	1; 2; 3	Мостовой ключ	160–280	0,95–0,97	700
	GXT	6; 10	Дифференциальная	160–280	0,97	700
	Nfinity	4; 8; 12; 16	Дифференциальная	170–256	0,98	800
Электромаш	ИДП1	1; 2; 3	Мостовой ключ	160–280	0,95–0,97	700
		6; 10	Дифференциальная			
GE Digital Energy	VH	1; 1,5; 2; 3	Мостовой ключ	160–280	0,95–0,97	н/д

Примечание: \* — при 100% нагрузке; \*\* — при номинальном входном напряжении.

значение КПД, сложные алгоритмы управления, требующие информацию о фазе входного напряжения. Мостовые ШИМ-выпрямители, выполненные на шести IGBT, обеспечивают высокие значения входного коэффициента мощности и находят применение в ИБП средней мощности с трехфазным входом и однофазным выходом.

**Параметры индуктивных и емкостных накопителей ККМ**

Величина индуктивности дросселя влияет на безразрывный характер входного тока, определяет необходимый запас энергии для подзаряда накопительных конденсаторов ККМ и может быть найдена по следующему соотношению [4]:

$$L = \frac{U_{1max}^2 (U_2 - \sqrt{2}U_{1max})\eta}{2f_k P_2 U_2}, \quad (1)$$

где  $U_{1max}$  — максимальное действующее значение входного напряжения,  $U_2$  — выходное напряжение,  $P_2$  — выходная мощность,  $\eta$  — КПД ККМ,  $f_k$  — частота коммутации транзисторов.

Величина емкости накопительных конденсаторов  $C_1 = C_2$  выбирается из соотношения:

$$C = P_2 / (4\pi f_1 U_2 \Delta U_2), \quad (2)$$

где  $\Delta U_2$  — пульсация выходного напряжения, которая не должна превышать (0,5–1,0)%  $U_2$  [6],  $f_1$  — частота входного напряжения (50 Гц).

Обычно емкостной накопитель выбирается из расчета 330–470 мкФ на каждый 1 кВт выходной мощности ИБП малой мощности для обеспечения достаточной энергии питания инвертора при скачках нагрузки и провалах сетевого напряжения. На примере ИБП мощностью 3 кВ·А значение электрической энергии, запасаемой в накопительных конденсаторах ККМ, составит:

$$W = (C_{эк} U_2^2) / 2 = 173 \text{ Дж},$$

где  $C_{эк}$  — эквивалентная емкость последовательно включенных конденсаторов, которая составляет  $C_{эк} = 0,5C_1 = 0,5(470 \times 3) = 705$  мкФ;  $U_2 = 700$  В — выходное напряжение ККМ.

Эта энергия за период выходного напряжения ИБП  $T = 0,02$  с может обеспечить мощность нагрузки более 8,5 кВт. Значительный запас энергии питания инвертора ИБП и высокое быстродействие его системы управления обеспечивают высокие динамические свойства. Значения динамических параметров — величина отклонения выходного напряжения от номинального значения и время восстановления статической точности поддержания выходного напряжения при 100% набросе (сбросе) нагрузки для однофазных ИБП (3–20 кВ·А) — составляют соответственно: +/-5%, 10 мс.

**Энергетические показатели ККМ**

Входной коэффициент мощности  $K_{р\text{ вх}}$  характеризует эффективность потребления энергии от сети и представляет отношение активной входной мощности ККМ к полной:

$$K_{р1} = P_1 / S_1 = \cos\phi_1 K_{нн}, \quad (3)$$

где  $\phi_1$  — фазовый сдвиг между основными гармониками входного напряжения и тока,

$$K_{нн} = I_1 / I = \sqrt{1 / (1 + K_{и}^2)}, \quad (4)$$

$K_{нн}$  — коэффициент нелинейности,  $I_1$  — действующее значение первой (основной) гармоники тока,

$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$  — действующее значение несинусоидального периодического тока,  $I_n$  — действующее значение  $n$ -й гармоники тока,  $n$  — порядок высшей гармоники тока.

Коэффициент нелинейности, влияющий на значение коэффициента мощности, может быть представлен через коэффициент искажения синусоидальности входного тока.

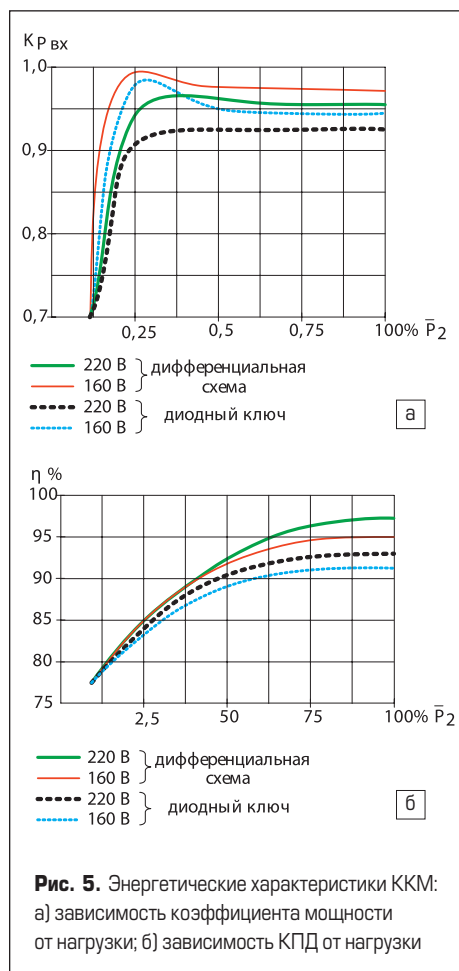
Коэффициент искажения синусоидальности характеризует степень отклонения формы периодической кривой тока от синусоидальной:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}. \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия ККМ представляет отношение выходной активной мощности к активной мощности, потребляемой из сети:

$$\eta = (P_2 / P_1) \times 100\%. \quad (6)$$

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования энергетических ха-



рактеристик однофазных ИБП — входной коэффициент мощности (рис. 5а) и КПД (рис. 5б) — в функции относительной нагрузки при различных значениях входного напряжения  $U_1$ . Судя по рис. 5а, входной коэффициент мощности повышается при снижении входного напряжения. Это объясняется тем, что при уменьшении  $U_1$  для обеспечения требуемой мощности нагрузки растет основная гармоника входного тока  $I_1$ , что уменьшает коэффициент искажения синусоидальности и, как следствие, увеличивается составляющая коэффициента мощности  $K_{нн}$  в выражении (3).

Величина КПД в функции степени загрузки ККМ (рис. 5б) зависит от величины входного напряжения. С уменьшением  $U_1$  растет значение тока  $I_1$ , что приводит к росту потерь в силовой цепи ККМ. Экспериментальные исследования показали, что КПД дифференциальной структуры ККМ выше по сравнению с двунаправленным коммутатором на основе диодного ключа. Полученные результаты подтверждаются также опытными данными, приведенными в работе по анализу ИБП малой мощности [5].

**Заключение**

- ККМ в структуре ИБП является основным звеном, определяющим как эффективность, так и надежность системы в целом.
- ККМ с диодным ключом находит широкое применение в ИБП малой мощности (1–3 кВ·А).
- Дифференциальные структуры ККМ являются основой для ИБП средней мощности (5–20 кВ·А).
- Эффективность ККМ во многом определяется оптимальностью алгоритма ШИМ-управления при использовании DSP-контроллера.
- Развитие технологии построения ККМ с двунаправленным коммутатором на основе RB-IGBT станет новым шагом в создании высокоэффективных структур ККМ для ИБП средней мощности.

**Литература**

1. Климов В., Климов И., Смирнов В. Вопросы электромагнитной совместимости систем бесперебойного питания // Электронные компоненты. 2006. № 2.
2. Климов В. Современные источники бесперебойного питания: классификация и структуры однофазных ИДП. Часть 1 // Электронные компоненты. 2008. № 6.
3. Климов В., Климова С. Двунаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. 2008. № 4.
4. L6561 Enhanced Transition Mode Power Factor Corrector. Application Note AN966: [www.st.com](http://www.st.com).
5. Su G. J., Adams D. J. Comparative Study of Power Factor Correction Converters for Single Phase Half-Bridge Inverters. Oak Ridge National Laboratory, USA, 2001.
6. AC UPS System Guide Specification: [www.gutor.com/pdf/EN\\_AC\\_UPS.pdf](http://www.gutor.com/pdf/EN_AC_UPS.pdf).