

Корректоры коэффициента мощности

AC/DC-источников питания

Вниманию читателей предлагается глава из книги «AC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User» [1] («Книга знаний AC/DC — практические советы для пользователей») Стива Робертса, технического директора компании RECOM. В публикации рассмотрены корректоры коэффициента мощности, которые являются обязательными для AC/DC-источников питания. Другие статьи этой серии доступны по ссылкам [2–5]¹.

**Стив Робертс
(Steve Roberts)**

**Перевод, дополнения
и комментарии:
Владимир Рентюк**

Введение

Корректор коэффициента мощности (ККМ, в англ. терминологии — Power Factor Correction, или PFC) требуется для AC/DC-источников питания с выходной мощностью более 75 Вт (25 Вт в случае драйверов светодиодов) в соответствии с требованиями стандарта IEC/EN 61000-3-2. В этом направлении в России пока действует межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 61000-3-2-2017 «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе)», идентичный международному стандарту IEC 61000-3-2:2014 «Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 3-2: Limits — Limits for harmonic current emissions (equipment input current 16 A per phase)», IDT. Стандарт прекратит свое действие 1 июля 2023 года и тогда же будет заменен стандартом ГОСТ IEC 61000-3-2-2021 [6], с правом досрочного применения. Этот стандарт будет идентичен международному стандарту IEC 61000-3-2:2020. В США не существует стандартов для ограничения выбросов гармонического тока, генерируемого электрическим оборудованием, как в Европе (IEC6100-3-2). Однако инициатива под названием 80 PLUS пытается интегрировать более эффективные блоки питания, особенно для персональных компьютеров, серверов и ноутбуков. В соответствии с ней сертифицируются блоки питания с энергоэффективностью не менее 80% при нагрузке в 20, 50 и 100%, а также с коэффициентом мощности при 100%-ной нагрузке не менее 0,9.

Распространено заблуждение, что ККМ приносит пользу только поставщикам электроэнергии, а разработчикам AC/DC-источников питания только создает лишние проблемы, поскольку требуется

выполнить требования стандарта по ЭМС, без чего, как известно, не обойтись [8], и приводит к дополнительным затратам и снижению эффективности, что верно лишь отчасти. Да, затраты будут, и КПД, за счет потребления каскадов ККМ, снизится. Тем не менее использование ККМ не только уменьшает гармоники в электросети и предусматривает выполнение регламентов ЭМС, но и позволяет достичь более высокой выходной мощности без превышения максимального предела входного тока от сети:

$$P_{out} = \eta \times PF \times V_{in,rms} I_{in,rms_limit}, \quad (1)$$

где PF — коррекция коэффициента мощности; η — коэффициент полезного действия (КПД).

Для AC/DC-преобразователя с КПД 85%, работающего от фиксированного напряжения электросети $V_{in,rms} = 230$ В переменного тока, оснащенного защитой от перегрузки по току, настроенной на предельный ток $I_{in,rms_limit} = 10$ А, при:

- $PF = 0,70$ обеспечивается максимальная выходная мощность $0,70 \times 0,85 \times 230 \text{ В} \times 10 \text{ А} \approx 1370$ Вт;
- $PF = 0,95$ обеспечивается максимальная выходная мощность $0,95 \times 0,85 \times 230 \text{ В} \times 10 \text{ А} \approx 1860$ Вт.

Пассивный ККМ

Типовое решение

Возвращаясь к нашей простой конструкции линейного источника питания в [3], вспомним, что реактивная мощность в основном является емкостной, хотя по факту нагрузкой в сети становится трансформатор, а это в первую очередь индуктивный компонент. Это связано с тем, что трансформатор «отражает» фазовый сдвиг вторичной нагрузки на первичную сторону. Таким образом, реактивная мощность источника питания в основном емкостная, а ток опережает напряжение. Можно было бы сместить форму волны

¹ Публикация переводов из книги [1] осуществляется с предоставленного переводчику эксклюзивного разрешения автора — Стива Робертса (Steve Roberts M.Sc. B.Sc.), технического директора компании RECOM.

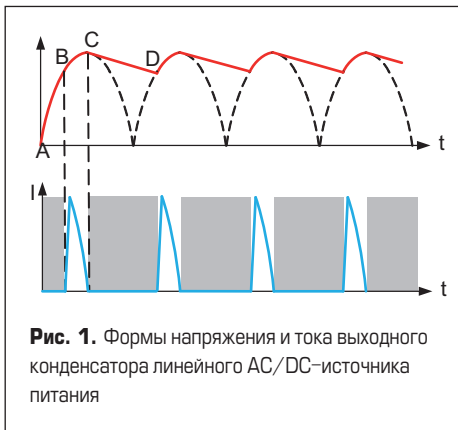


Рис. 1. Формы напряжения и тока выходного конденсатора линейного AC/DC-источника питания

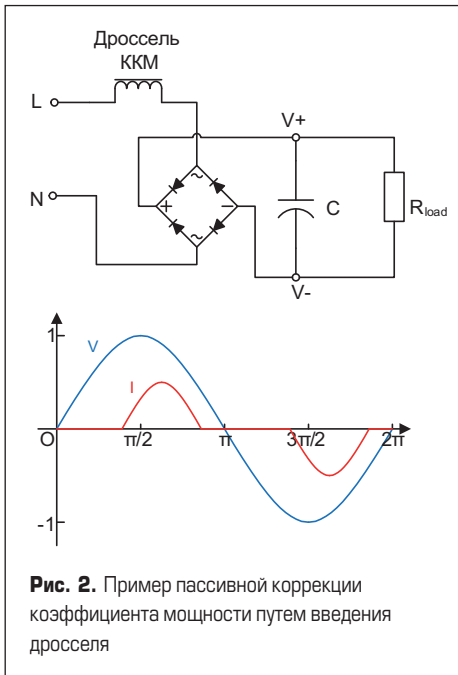


Рис. 2. Пример пассивной коррекции коэффициента мощности путем введения дросселя

тока, чтобы частично скорректировать коэффициент мощности, добавив последовательную катушку индуктивности, но поскольку в этом случае невозможно заполнить все серые области в форме волны, показанной на рис. 1 из [3], током, поэтому коэффициент мощности нельзя сделать полностью равным единице.

На практике улучшить нескорректированный коэффициент мощности с $\approx 0,4$ до $\approx 0,7$ поможет решение с пассивной коррекцией коэффициента мощности за счет использования дросселей (обычно это трансформатор с железным сердечником, но только с одной

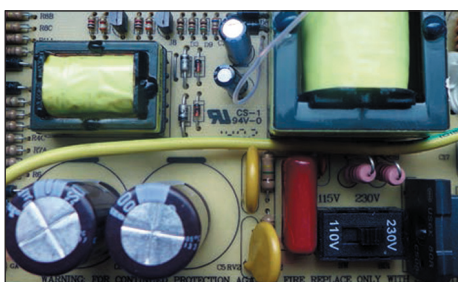


Рис. 4. Пример конструкции блока питания с пассивной коррекцией коэффициента мощности с сетевым селекторным переключателем

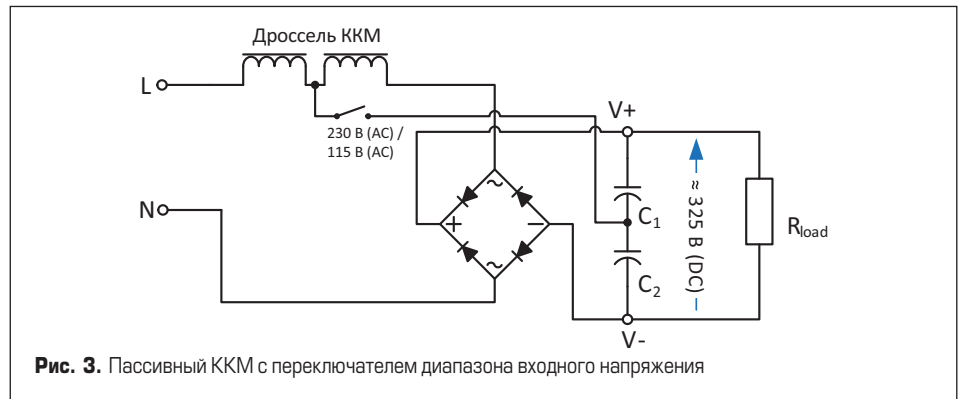


Рис. 3. Пассивный ККМ с переключателем диапазона входного напряжения

обмоткой). Однако такие катушки индуктивности часто столь же велики и тяжелы, как и сам развязывающий трансформатор. Дроссель ККМ частично компенсирует фазовый сдвиг, вызванный выходным конденсатором. Полученный график напряжения/тока показывает, как входной ток «задерживается» дросселем, что позволяет улучшить общее значение коэффициента мощности (рис. 2).

Одна из основных проблем с простой пассивной схемой коррекции коэффициента мощности, показанной на рис. 2, заключается в том, что для адекватного регулирования коэффициента мощности дроссель корректора может работать только в ограниченном диапазоне входного напряжения. Решение, часто используемое в очень недорогих пассивных схемах коррекции коэффициента мощности, состоит в добавлении переключателя напряжения между 115 и 230 В переменного тока, как показано на рис. 3.

Переключатель либо разомкнут (на 230 В), а дроссель ККМ подключен последовательно с двухполупериодным выпрямителем, либо замкнут (на 115 В), что делает схему такой же, как полуволновой удвоитель напряжения, так что выходное напряжение остается неизменным, поскольку активными будут только левая половина дросселя и левая половина моста. В целом же эта схема не актуальна именно для рассматриваемых AC/DC-источников питания и приводится только в качестве примера оригинального инженерного подхода к решению проблемы.

Конденсаторы удвоителя напряжения можно рассчитать по соотношению (2):

$$C_1 = C_2 = \frac{2I_{in}t_{holdup}}{V_{ripple}} \quad (2)$$

Для блока питания мощностью 100 Вт с КПД 80% при входном напряжении 115 В переменного тока частотой 60 Гц при $I_{in} = 100 \text{ Вт} / 325 \text{ В DC} = 0,3 \text{ А} / 8 = 0,375 \text{ А}$, $t_{holdup} = 1/120 \text{ Гц} = 0,08 \text{ с}$, и предполагая приемлемое напряжение пульсации $V_{ripple} = 30 \text{ В}$, имеем:

$$C_1 = C_2 = \frac{2I_{in}t_{holdup}}{V_{ripple}} = \frac{2 \times 0,375 \times 0,08}{30} = 200 \text{ мкФ.}$$

Пример конструкции блока питания с пассивной коррекцией коэффициента мощности с сетевым селекторным переключателем показан на рис. 4. Дроссель ККМ можно увидеть над двумя конденсаторами схемы удвоения напряжения. Преимущество этой схемы в том, что электролитические конденсаторы должны быть рассчитаны только на работу при напряжении 200 В, даже при входном напряжении 230 В переменного тока.

ККМ типа valley-fill

Хотя пассивная коррекция коэффициента мощности с переключаемым диапазоном очень эффективна для коррекции коэффициента мощности высокой мощности (100–250 Вт), с возможными значениями коэффициента мощности не менее 0,95 при 230 В переменного тока и не менее 0,98 при 115 В переменного тока, она не столь эффективна при более низких уровнях мощности. Однако на низких уровнях мощности, используя только пассивные компоненты, также возможно получить коэффициент мощности не менее 0,9.

Требуемый метод называется valley-fill (буквально: «заполнение впадины») и основан

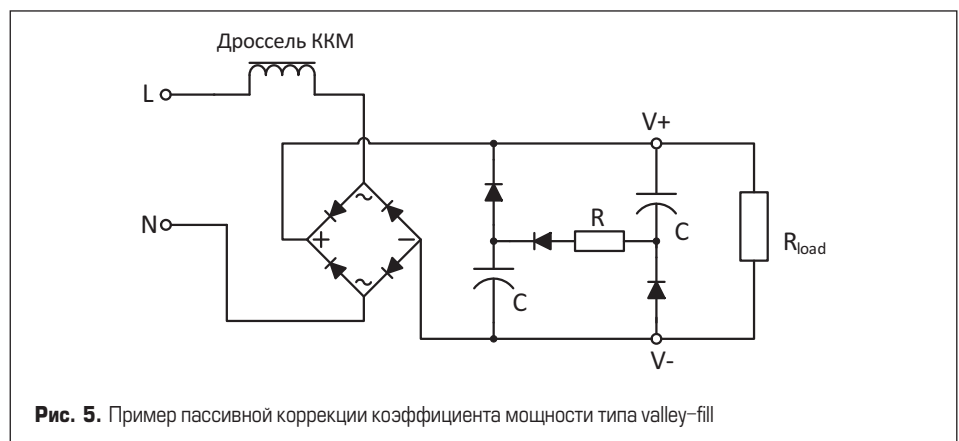
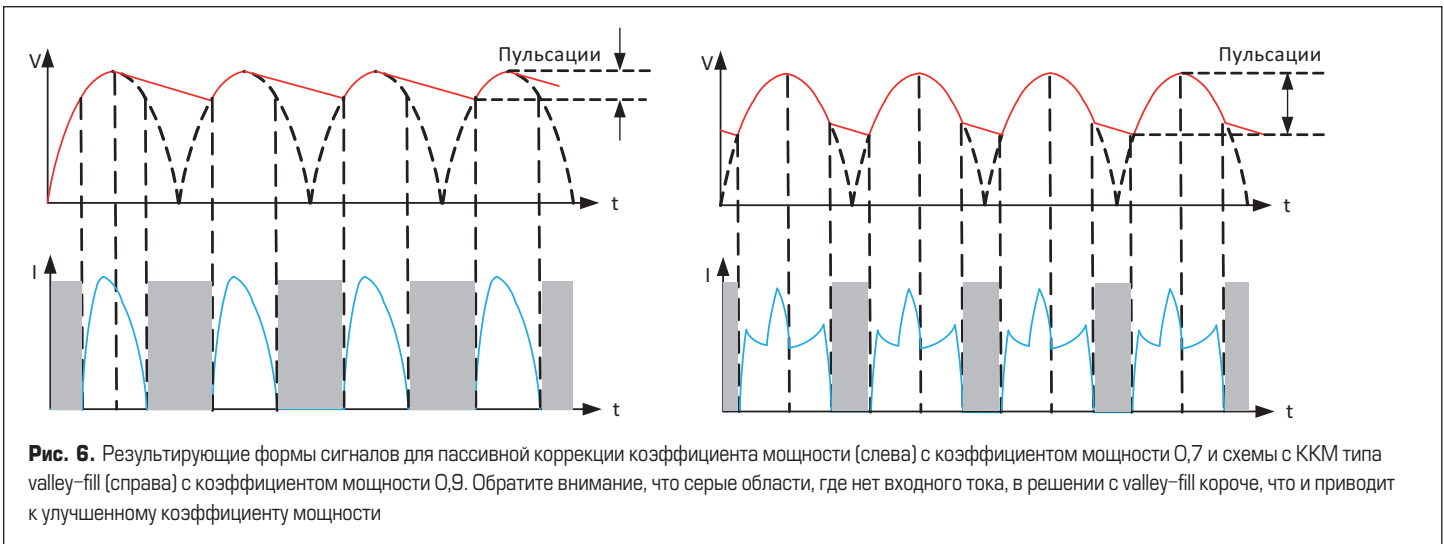


Рис. 5. Пример пассивной коррекции коэффициента мощности типа valley-fill



на применении управляющих диодов для зарядки двух выходных конденсаторов до половины пикового напряжения (рис. 5). Это означает, что они начнут потреблять входной ток намного раньше в каждом полупериоде сети (при половине пикового входного напряжения, а не почти при пиковом входном напряжении) и будут продолжать потреблять ток намного позже в полупериоде (снова до тех пор, пока напряжение не упадет до половины пикового напряжения). Недостаток такой схемы — очень высокая пульсация на выходе, составляющая 50% от выходного напряжения постоянного тока (рис. 6).

В драйверах светодиодов с регулируемой яркостью, выполненных на основе симистора, чаще всего используются схемы с valley-fill. Во-первых, схема valley-fill также хорошо работает с входом сети с фазовым управлением, состоящим из коротких участков синусоидальной формы сигнала сети, а во-вторых, высокая пульсация на выходе здесь не так важна (человеческий глаз не замечает мерцания светодиода на частотах около 100 Гц). Наконец, это доступное решение, которое имеет значение для дешевой части рынка освещения. Однако для промышленных источников питания с коррекцией коэффициента мощности высокие пульсации на выходе часто недопустимы. Чтобы получить хороший коэффициент мощности с низким

уровнем пульсаций на выходе, требуется активная коррекция коэффициента мощности. За каждое удовольствие нужно платить, как гласит французская поговорка.

Активный ККМ

Активная коррекция коэффициента мощности для управления входным током, чтобы заставить его согласоваться с входным напряжением, использует управление методом широтно-импульсной модуляции с переменным интервалом. Для этого сначала необходимо увеличить напряжение на конденсаторе, чтобы гарантировать, что в любой момент в течение полупериода он все еще остается заряжен. Следовательно, все активные схемы ККМ являются повышающими преобразователями постоянного тока. Такое повышенное напряжение должно быть равно максимальному выпрямленному входному пиковому напряжению или превышать его, поэтому обычно выбирают в пределах 400–425 В. Чем выше значение напряжения, тем выше ненужное напряжение на повышающем конденсаторе и переключающих элементах, однако при более низком схеме ККМ не сможет гарантировать, что зарядный ток будет контролироваться в течение всего полупериода.

Для активной коррекции коэффициента мощности используются четыре основные то-

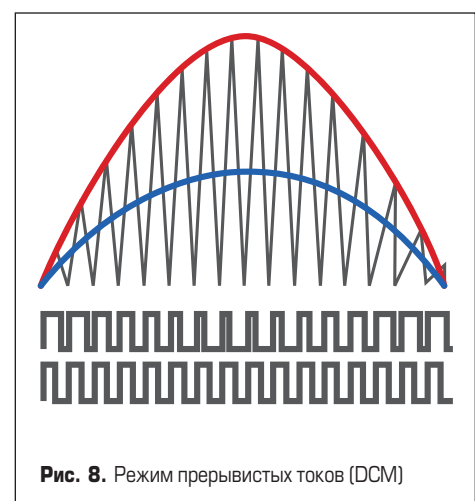
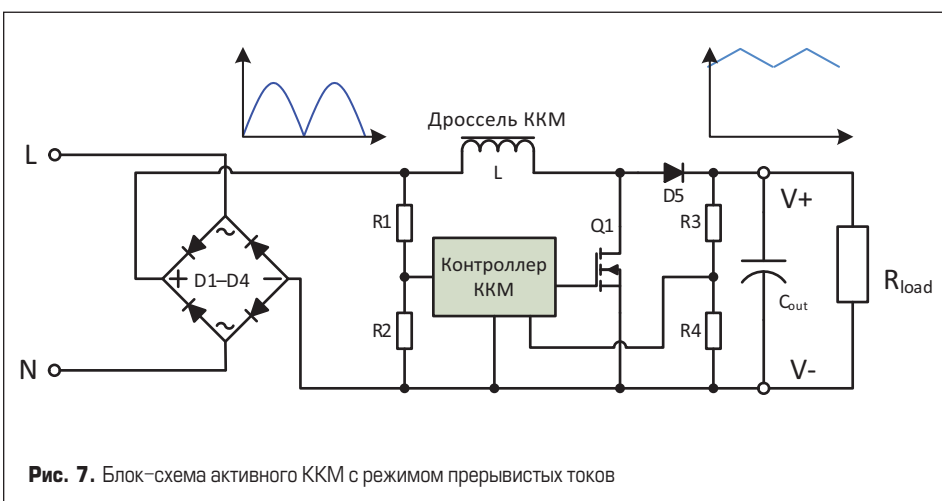
пологии, а именно режим прерывистых токов (иногда так называемых прерывных, или разрывных токов, или прерывистой проводимости), непрерывных токов, режим критической проводимости и смешанный режим.

Активный ККМ

с режимом прерывистых токов

Блок-схема активного ККМ с режимом прерывистых токов, или прерывистой проводимостью (Discontinuous Conduction Mode, DCM), приведена на рис. 7, а временная диаграмма — на рис. 8.

Контроллер ККМ изменяет рабочий цикл (скважность импульсов) во время выпрямленной входной полусинусоидальной волны, так что длительность импульса на пике входного напряжения является наименьшей и максимальной в начале и в конце полупериода. Частота ШИМ при этом остается постоянной. Выпрямленное входное напряжение делится на делителе R1/R2 и используется для синхронизации контроллера ККМ. В свою очередь выходное напряжение поступает на делитель R3/R4 и применяется в контуре обратной связи, который отвечает за стабилизацию выходного напряжения. Накопительный конденсатор C_{out}, за счет действия повышающего преобразователя, образованного L, Q1 и D5, заряжается до гораздо более высокого напряжения, чем



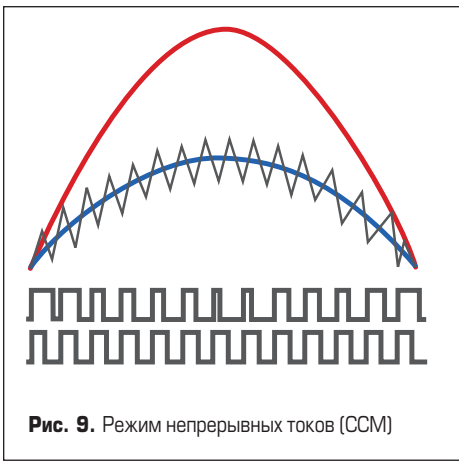


Рис. 9. Режим непрерывных токов (CCM)

пиковое входное напряжение, но зарядный ток представляет собой серию коротких импульсов в течение входного полупериода, более длительных при низком входном напряжении и более коротких при более высоком входном напряжении. Таким образом, средний ток через дроссель следует за формой волны входного напряжения, поэтому коэффициент мощности очень близок к желанной единице.

Ток дросселя показан на рис. 8 черным, входное напряжение — красным, а средний входной ток — синим цветом. Как можно видеть, ток катушки индуктивности падает до нуля в конце каждого импульса ШИМ. Отсюда и название этого режима — «режим прерывистых токов».

Основным преимуществом коррекции коэффициента мощности в этом режиме является то, что, поскольку ток дросселя падает до нуля в конце каждого импульса, он полностью намагничивается и размагничивается во время каждого цикла ШИМ. Кроме того, транзисторный ключ Q1 включается при нулевом напряжении/нулевом токе, поэтому очень эффективен и работает почти без потерь. Также скорость восстановления повышающего выпрямительного диода здесь в общем не особо критична.

Недостатком этого метода являются электромагнитные помехи (ЭМП), возникающие из-за больших пиковых токов как следствие прерывистой формы входного сигнала. Соответственно, чтобы отвечать стандарту по ЭМС в части уровня кондуктивных помех, такая схема ККМ должна иметь очень хороший входной фильтр. Дроссель ККМ также должен выдерживать высокие пиковые токи, поэтому он будет габаритным и тяжелым.

Активный ККМ с режимом непрерывных токов

Для решения проблем ЭМС коррекции коэффициента мощности в режиме прерывистых токов используется контроллер коррекции коэффициента мощности с режимом непрерывных токов, или непрерывной проводимостью (Continuous Conduction Mode, CCM). Это та же схема, что показана и на рис. 7, но с одним уточнением — индуктивность дросселя увеличена так, что ток в дросселе изменяется лишь немного выше и ниже идеальной синусоидальной формы волны. Обычно пульсацию тока в этом режиме выбирают равной примерно 20–40% от среднего тока катушки индуктивности. Опять же, частота ШИМ здесь постоянна. Временная диаграмма представлена на рис. 9.

Ток дросселя отмечен черным, входное напряжение — красным, а средний входной ток — синим цветом. Как можно видеть на рис. 9, ток дросселя не падает до нуля в конце каждого импульса ШИМ. Отсюда и название этого режима — «режим непрерывных токов».

Для данного режима выбран более сложный ШИМ-контроллер, ведь он должен не только отслеживать входное напряжение, но и точнее регулировать входной ток. Однако генерируемые электромагнитные помехи в этом режиме намного ниже, поскольку входной ток непрерывный, а не резко пульсирующий.

К основным недостаткам следует отнести значительно более высокие потери переключения в транзисторе и более высокие потери восстановления как в диоде, так и в транзисторе. Для решения ККМ с режимом непрерывных токов выпрямительный диод D1 в схеме повышающего преобразователя должен быть сверхбыстродействующим, то есть с очень низким зарядом обратного восстановления Q_{rr} . Кроме того, дроссель должен иметь гораздо большую индуктивность, чем в конструкции с прерывистым током, хотя его пиковый ток здесь ниже.

Активный ККМ с режимом критической проводимости

В схемах ККМ с режимом прерывистых и непрерывных токов, как было дважды подчеркнуто выше, используется фиксированная частота ШИМ. Однако если частота также сделана переменной и синхронизированной с полупериодом входного напряжения, ток катушки индуктивности можно отрегулировать так, чтобы он лишь касался нуля в конце каждого импульса ШИМ, независимо от входного напряжения. Это называется режимом граничной проводимости (Boundary Conduction Mode, BCM), или режимом критической проводимости (Critical Conduction Mode, CrCM). Временная диаграмма представлена на рис. 10.

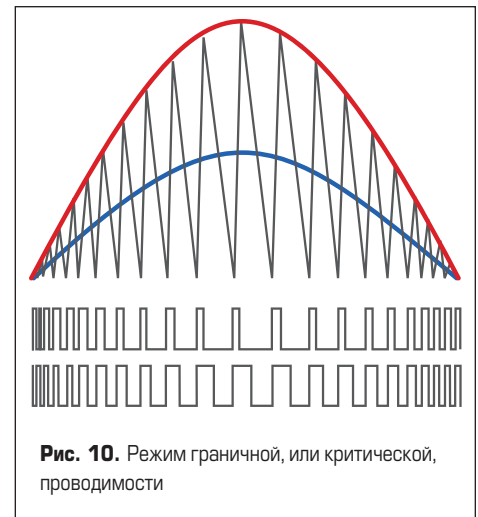


Рис. 10. Режим граничной, или критической, проводимости

Ток дросселя показан черным, входное напряжение — красным, а средний входной ток — синим цветом. На рис. 10 видно, что ток дросселя падает до нуля в конце каждого импульса ШИМ, а частота ШИМ меняется. В ККМ с режимом критической проводимости коммутационные потери в транзисторе и потери восстановления в диоде столь же низкие, как и в схеме с прерывистым током, кроме того, индуктивность дросселя может быть меньше, чем в схеме ККМ с режимом непрерывных токов, потому что пиковые токи здесь несколько ниже. Недостатком решения ККМ с режимом критической проводимости является то, что для ШИМ с регулируемой частотой необходимо выполнение требований по ЭМС-фильтрам, которые имеют более широкую полосу подавления частот. Сравнение осциллограмм тока дросселя для ККМ с режимами непрерывных токов, критической проводимости и прерывистых токов приведено на рис. 11.

Все три рассмотренных выше решения имеют одинаковый средний ток катушки индуктивности, но размах тока дросселя в режиме критической проводимости становится компромиссом между очень высокими уровнями тока в режиме прерывистых токов и низкими в режиме непрерывных токов.

На рынке представлено множество контроллеров ККМ, которые могут переключаться между различными режимами работы

Смешанный режим в активных ККМ

На рынке представлено множество контроллеров ККМ, которые могут переключаться между различными режимами работы

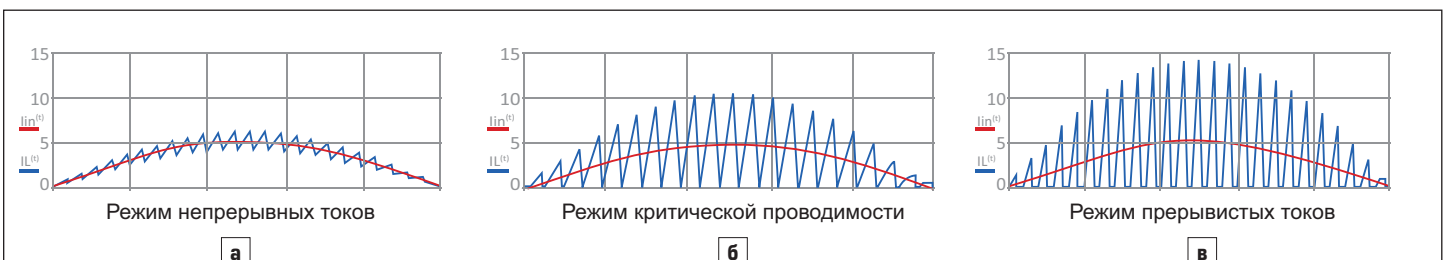


Рис. 11. Сравнение осциллограмм тока дросселя для ККМ с режимами непрерывных токов, критической проводимости и прерывистых токов

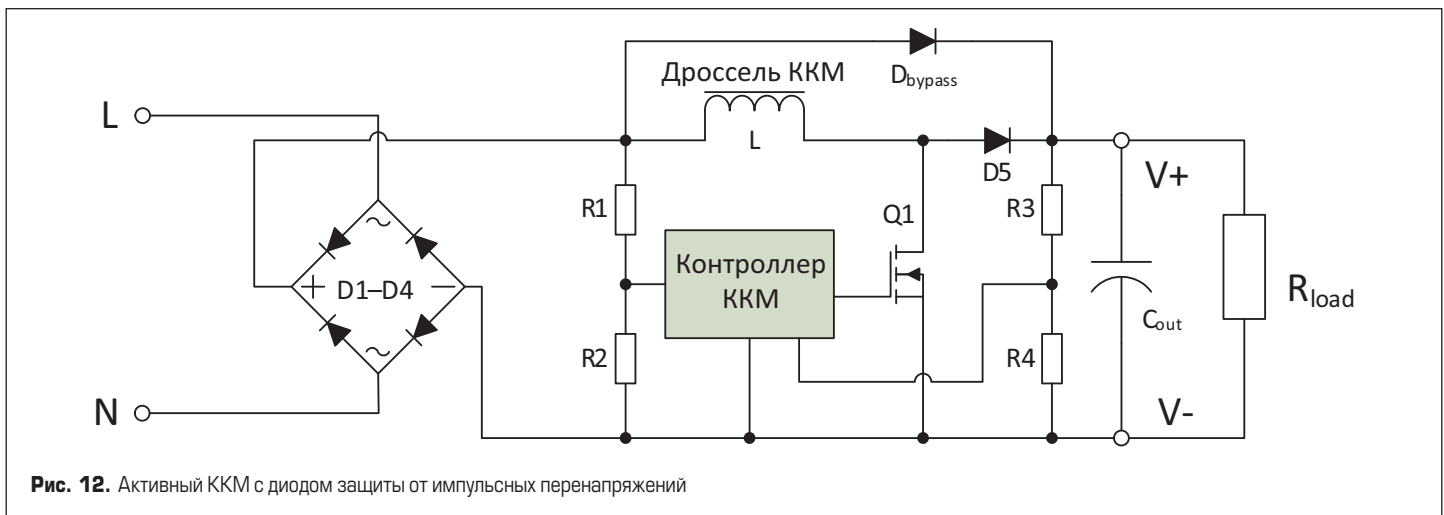


Рис. 12. Активный ККМ с диодом защиты от импульсных перенапряжений

в соответствии с теми или иными условиями работы преобразователя. Выбранное значение индуктивности дросселя, хорошо работает с контроллером прерывистых токов при низком входном напряжении (90–125 В переменного тока), но при более высоких входных напряжениях (180–265 В переменного тока) из-за более низкого входного тока может негативно сказаться на коррекции коэффициента мощности и перейти в режим непрерывных токов.

Чтобы избежать здесь не всегда удобного компромисса, в контроллере можно предусмотреть регулируемую частоту/ШИМ так, чтобы он мог поддерживать схему в режимах непрерывных токов/критической проводимости во всем диапазоне входного напряжения. Существуют также дроссели переменной индуктивности, которые изменяют свою индуктивность в соответствии с протекающим через них током. Они выполнены на порошковом сердечнике и в литературе часто называются *swinging chokes* (буквально: «качающиеся дроссели»). При малых токах их индуктивность увеличивается, что позволяет автоматически поддерживать ККМ в режимах непрерывных токов/критической проводимости независимо от условий эксплуатации.

Практический совет: каскады ККМ чувствительны к повреждениям, которые возникают вследствие скачков напряжения на входе. Мостовой выпрямитель будет выпрямлять

как положительные, так и отрицательные выбросы, создавая высокое положительное напряжение на дросселе ККМ. Возникающий в результате большой ток может быстро насыщать сердечник, поэтому дроссель L, потеряв индуктивность, не сможет полностью подавить импульс напряжения. Соответственно, основной диод ККМ (D5) теперь должен выдерживать высокий ток (иногда сотни ампер), вызванный зарядом конденсатора C_{out} и может быстро выйти из строя. Решение состоит в том, чтобы добавить силовоточный обходной (байпасный) диод D_{bypass} параллельно дросселю L и основному диоду D5, как это показано на рис. 12. В нормальных условиях эксплуатации напряжение ККМ будет выше входного напряжения, и байпасный диод будет иметь обратное смещение. В условиях перенапряжения входной сигнал превышает напряжение ККМ, и обходной диод будет проводить ток, снимая нагрузку на диод и дроссель корректора, а также снижая напряжение на мостовом выпрямителе D1–D4.

Активный ККМ с чередованием

Как уже неоднократно упоминалось, при выборе того или иного режима проводимости для контроллера ККМ важно выполнение непростых требований по ЭМС [8]. Если электромагнитные помехи слишком высоки, то для их эффективной фильтрации альтернативной топологией становится использование двух че-

редующихся цепей коррекции коэффициента мощности, как показано на рис. 13. В этом случае ток пульсаций на каждой ступени уменьшался бы вдвое и добавлялся в противофазе.

Чередование также имеет преимущество в том, что выходной ток распределяется между двумя катушками индуктивности и двумя диодами — таким образом, можно либо обеспечить более высокие выходные токи, либо получить улучшенные рабочие температурные режимы.

ККМ с чередованием в основном используется для высокоомощных AC/DC-преобразователей, в которых высокий входной ток делает входной фильтр для подавления ЭМП очень громоздким и дорогим, чем дополнительная схема с использованием двух повышающих преобразователей с целью реализации ККМ с режимом критической проводимости. Выходы ШИМ работают в противофазе со сдвигом на 180°, поэтому, хотя ток в любой из катушек индуктивности падает до нуля в конце каждого импульса, ток, протекающий через конденсатор C_{out} , остается непрерывным (ток течет попеременно через D5 и D6).

Все было бы хорошо, так как пульсации выходного напряжения значительно ниже, чем с одноступенчатым ККМ, а при рабочем цикле 50% топология с чередованием имеет вообще нулевую пульсацию входного тока, поскольку пульсации от двух каскадов ККМ компенси-

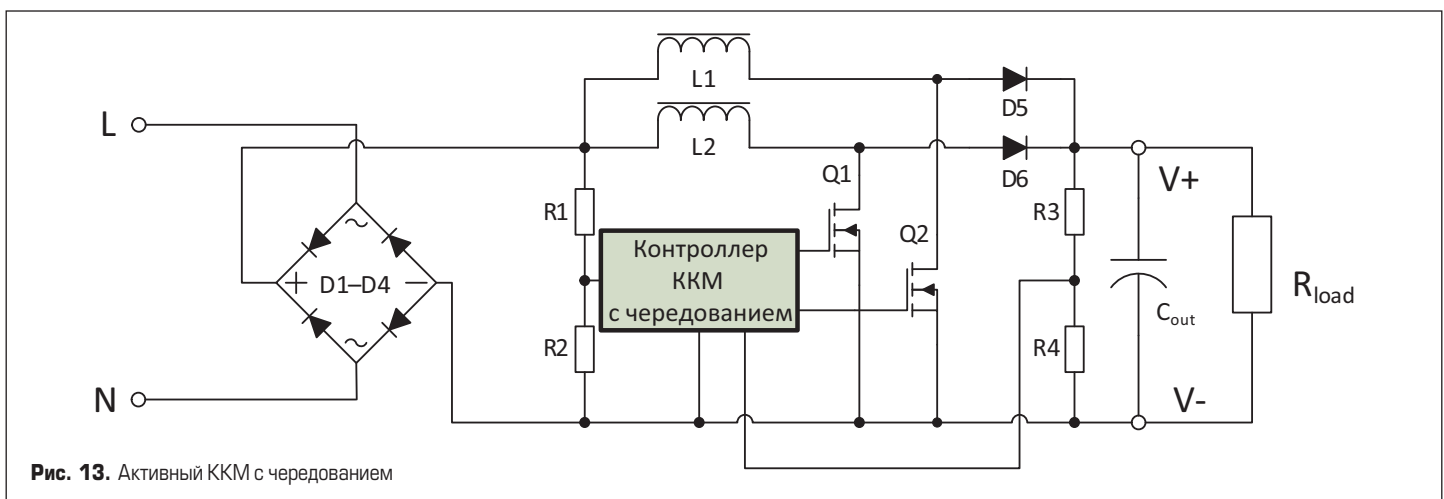
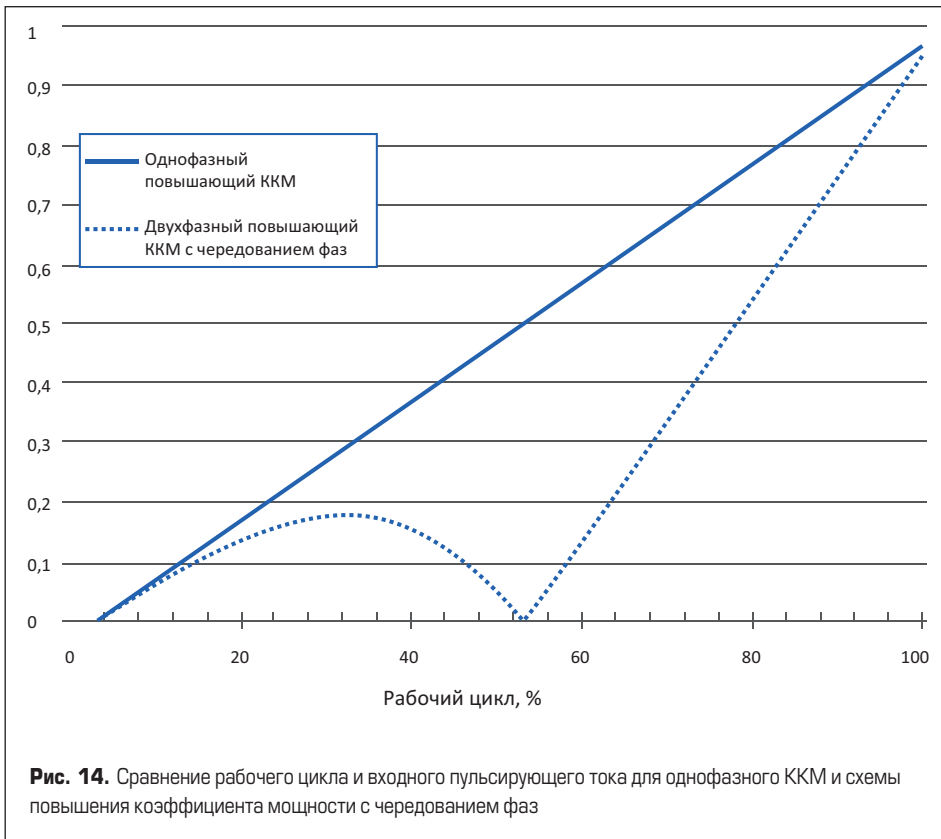


Рис. 13. Активный ККМ с чередованием



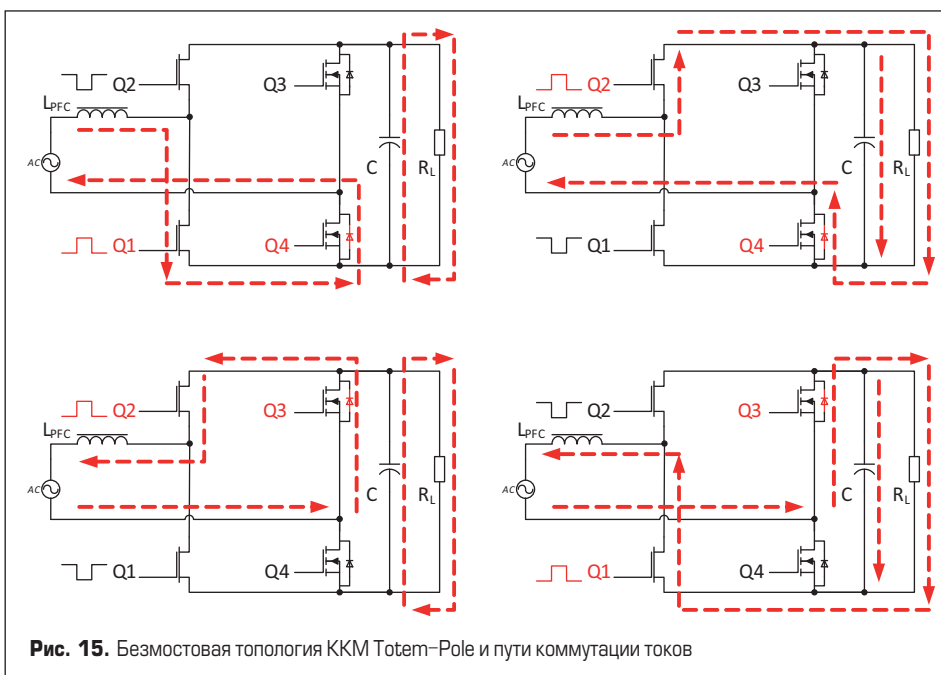
руются. Но, помимо повышенной стоимости, самый большой недостаток заключается в том, что все используемые компоненты должны быть очень тщательно согласованы. Это необходимо, чтобы поддерживать «одинаковость» при всех рабочих условиях. Сравнение рабочего цикла (скважности) и входного пульсирующего тока для однофазного ККМ и схемы повышения коэффициента мощности с чередованием фаз приведено на рис. 14.

Безмостовой активный ККМ с Totem-Pole

Топология ККМ без мостового выпрямителя, или, как ее называют, технология ККМ

Totem-Pole, становится все более популярной благодаря своей очень высокой эффективности. Обычно Totem-Pole воспринимают как двухтактный выход, но здесь мы имеем дело с особым случаем, а потому оставим данный термин как есть. Диоды мостового выпрямителя заменены двумя высоковольтными транзисторами, которые для выпрямления входа попеременно переключаются с частотой сети. То есть мы имеем дело с синхронным выпрямителем.

Его важная особенность в том, что таким образом исключаются прямое падение напряжения на диодах моста (остаются только потери проводимости транзисторов), при



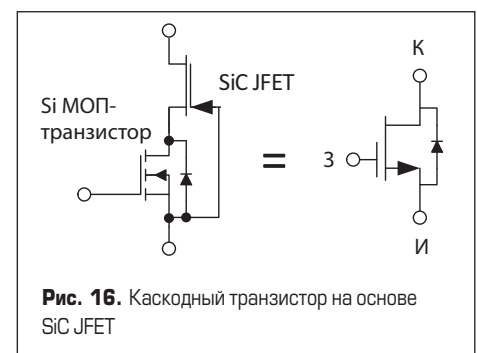
этом внутренние диоды в корпусе транзисторов способствуют прохождению тока. Такое решение повышает общую эффективность AC/DC-источников питания (здесь, как обычно, в первую очередь подразумевается его КПД). Схема безмостового ККМ с Totem-Pole и пути коммутации токов показаны на рис. 15. Для не требующего высокого быстродействия переключения на частоте 50 Гц и высокочастотного переключения коррекции коэффициента мощности, как правило, в схеме безмостового ККМ с целью экономии используются разные типы транзисторов.

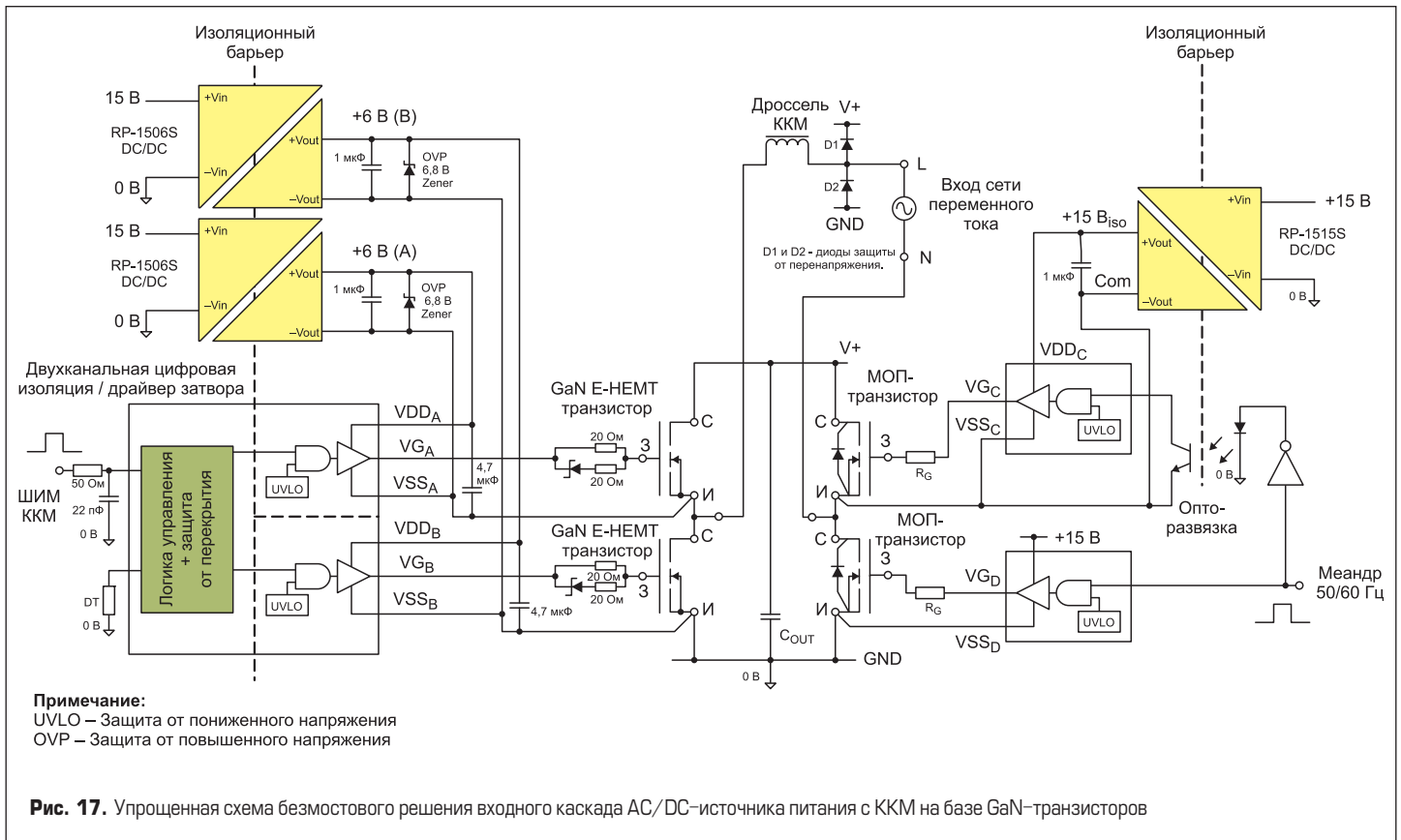
В предыдущих схемах коррекции коэффициента мощности одиночный переключающий полевой транзистор заменен двумя полевыми транзисторами Q1 и Q2. Во время положительного полупериода сети транзистор Q4 включен, Q3 выключен, а Q1 работает с ШИМ-сигналом для повышения выходного напряжения, при этом Q2 работает с инвертированным ШИМ-сигналом, функционируя как выпрямитель. Во время отрицательного полупериода сети транзистор Q3 включен, Q4 выключен, Q2 работает с ШИМ-сигналом для повышения выходного напряжения, а с инвертированным ШИМ-сигналом, чтобы действовать как выпрямитель, работает Q1.

Поскольку Q3 и Q4 переключаются на низкой частоте (50/60 Гц), они не нуждаются в быстром переключении и могут быть обычными полевыми МОП-транзисторами. Диоды размещены параллельно для повышения эффективности за счет разделения пикового тока, но переключение мощности осуществляется с помощью полевых МОП-транзисторов. Таким образом исключаются потери прямого напряжения обычного мостового выпрямителя, соответственно, потери на выпрямление могут быть очень низкими, не превышающими 1%.

Транзисторы Q1 и Q2 уже не могут быть обычными дешевыми полевыми МОП-транзисторами, поскольку при обратном восстановлении потери будут слишком высокими. Задержка переключения может вызвать сквозной ток и большие всплески тока во время перехода тока через ноль и привести к выходу транзисторов из строя. Одно из решений — использование карбидкремнивого (SiC) JFET-транзистора в каскадной конфигурации с кремниевым (Si) МОП-транзистором, которая показана на рис. 16.

И хотя активные устройства, используемые в AC/DC-источниках питания, детально рассматриваются в [5], более полная информация





именно по каскодным транзисторам представлена во второй части серии статей [9], но остановимся на главном. Проблема использования транзисторов SiC JFET в том, что обычно они включены при нулевом напряжении на затворе. Эту проблему (и не только) как раз разрешает каскодное включение. Когда Si МОП-транзистор выключен, его напряжение сток-исток V_{DS} повышается до тех пор, пока в свою очередь напряжение затвор-исток V_{GS} SiC JFET не станет достаточно отрицательным, чтобы его выключить. Тогда напряжение питания оказывается почти полностью приложенным к полевому транзистору. Когда Si МОП-транзистор включен, напряжение V_{DS} падает почти до нуля и SiC JFET включается. Преимущество такой схемы в том, что затвор JFET и напряжения V_{DS} и V_{GS} полевого МОП-транзистора близки к нулю, а значит, обратное восстановление, потери из-за влияния общей выходной емкости в режиме малого сигнала C_{oss} и емкости Миллера также близки к нулю. Соответственно, скорость переключения значительно улучшена [5, 9].

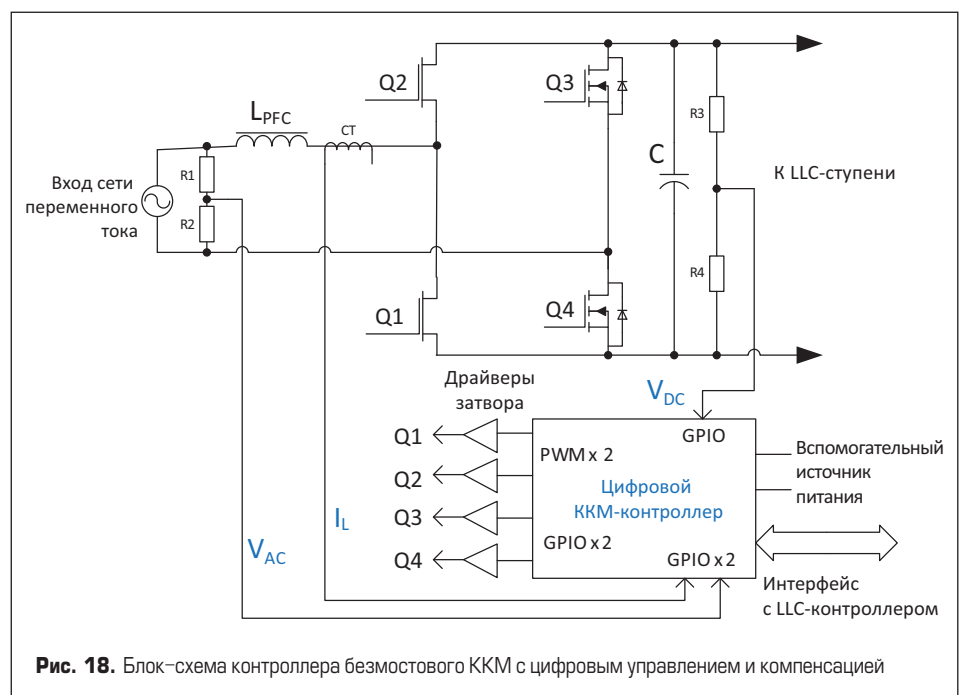
В последнее время для замены каскодной схемы применяют транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT) на основе такого широкозонного полупроводника, как нитрид галлия (GaN) [5]. Они оптимальны, в частности для рассматриваемой топологии Totem-Pole, поскольку отличаются высокой скоростью переключения, отсутствием внутреннего диода и низкой емкостью затвора. Общий КПД безмостового ККМ технологии Totem-Pole с использованием GaN HEMT превышает 99%.

На рис. 17 из [11] представлена схема безмостового ККМ, имеющая два силовых полумостовых каскада для замены мостового выпря-

мителя и повышающих ключей ККМ, которые обычно требуются для приложений с питанием от электросети переменного тока. Синхронный выпрямитель состоит из двух кремниевых МОП-транзисторов, переключаемых поочередно синхронно с входным напряжением при частоте сети 50/60 Гц с рабочим циклом 50%. Это создает выпрямленное напряжение без мостового выпрямителя. Полумостовая схема ККМ работает с более высокочастотным и регулируемым ШИМ-сигналом уже для выполнения функции коррекции коэффициента мощности. Она реализована с помощью GaN-транзисторов

с низкими собственными потерями. Благодаря небольшому количеству элементов компоненты драйвера затвора могут быть размещены ближе друг к другу, а паразитные индуктивности и паразитные емкости сведены к минимуму. Для создания полностью изолированной высокоскоростной полумостовой схемы драйвера затвора GaN-транзисторов используются DC/DC-преобразователь RP-1506S [10] и двухканальный цифровой изолятор. Перечень элементов этого ККМ содержит в сумме всего 20 позиций.

Полумост синхронного выпрямления переменного тока 50/60 Гц работает на гораздо более



низкой частоте, поэтому здесь без ущерба для общей эффективности или производительности можно использовать более дешевые МОП-транзисторы. Питание затвора МОП-транзистора верхней стороны плеча +15 В обеспечивается изолированным DC/DC-преобразователем RP-1515S [10]. Все три используемых в схеме DC/DC-преобразователя обеспечивают изоляцию с электрической прочностью 5,2 кВ напряжения постоянного тока и имеют емкость изолирующего барьера не более 10 пФ. Для драйвера затвора МОП-транзистора нижней стороны предусмотрен источник питания 15 В платы, гальваническая изоляция здесь не требуется.

К недостаткам безмостового ККМ относятся его сложность (требуются четыре изолированных драйвера для управления полевыми транзисторами), довольно высокая точность синхронизации (особенно при переходе через ноль в сети, когда важно избежать сквозных токов ввести достаточную, но не слишком большую паузу, иначе это скажется на эффективности) и сложность синхронизации схемы с источником питания при наличии помех. Кроме того, в ИС контроллера для поддержания высокого КПД во всем диапазоне нагрузки и напряжения питания должен быть вход управления от трансформатора тока или датчик на эффекте Холла. Он необходим, чтобы достаточно точно контролировать двунаправленный ток дросселя. Блок-схема контроллера безмостового ККМ с цифровым управлением и компенсацией представлена на рис. 18.

Цифровой контроллер имеет три контура управления: внешний контур управления напряжением (с использованием входа V_{DC}), опорный контур синусоидальной волны (синхронизированный с входом V_{AC}) и внутренний контур управления током (с использованием входа I_L) для поддержания точного регулирования с помощью высокого коэффициента мощности. Такая сложность управления означает, что для данной топологии в реальной практике подходят только цифровые контроллеры.

Кроме всего сказанного, канал передачи данных к цифровому контроллеру LLC позволяет в интерактивном режиме изменять характеристики отклика в соответствии с условиями нагрузки, что является весьма полезной опцией для мощных AC/DC-источников питания.

Литература

1. Roberts S. M.Sc. B.Sc. AC/DC BOOK OF KNOWLEDGE Practical tips for the User. RECOM Enginnering GmbH & Co.KG. Austria, 2018. www.RECOM-power.com/ru/support/resource-library/book-of-knowledge/book-of-knowledge.html?1
2. Робертс С. Переменный ток — начало начал // Компоненты и технологии. 2021. № 11.
3. Робертс С. Линейные AC/DC-источники питания, полная, реактивная и активная мощность и немного теории // Силовая электроника. 2021. № 6.
4. Робертс С. Пассивные компоненты AC/DC-источников питания // Компоненты и технологии. 2021. № 12.
5. Робертс С. Активные компоненты AC/DC-источников питания // Компоненты и технологии. 2022. № 1.
6. ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2017 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. НОРМЫ. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). www.docs.cntd.ru/document/1200157963
7. ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2021 Межгосударственный стандарт. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). www.docs.cntd.ru/document/1200180540
8. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти. Сб. «Электромагнитная совместимость в электронике-2018». 2018.
9. Бхалла А. (Anup Bhalla). Вы за SiC или кремний? Части 1–6 // Силовая электроника. 2020. № 1–6.
10. RP-xx06 Series. www.RECOM-power.com/ru/products/dc-dc-converters/rec-s-RP-xx06.html?7
11. DC/DC Converters for GaN Gate Drivers. Whitepaper. www.RECOM-power.com/ru/support/technical-resources/whitepaper/whitepaper-dc-dc-gan-gate-drivers/whitepaper-dc-dc-converters-for-gan-gate-drivers.html?25