

Разработка двунаправленного AC/DC-конвертера

МОЩНОСТЬЮ 10 кВт

Передача 10-кВт мощности в обоих направлениях (от AC к DC и обратно) является технической сложной задачей, но понимание существующих топологий и методов значительно облегчает решение данной задачи. В начале любого проекта необходимо задать вопрос: «Будет ли спрос?», а уже затем решать второй: «Как можно реализовать эту идею?». К сожалению, слишком много проектов начиналось неправильно, именно в обратном порядке: «Сначала разработаем, а покупатель найдется!». Несмотря на то, что данная концепция сработала в фильме 1989 года «Поле Чудес», в реальности она, увы, не работает. Итак, давайте сначала определимся, кому необходим двунаправленный AC/DC-преобразователь, и рассмотрим последние разработки и коммерческие аспекты, которые делают его более жизнеспособным, прежде чем углубляться в детали проектирования.

**Стив Робертс
(Steve Roberts)**

Двунаправленная передача энергии

В литературе повсеместно встречаются прототипы и оценочные платы для двунаправленной передачи энергии. Почему же возник такой интерес к подобного рода устройствам? Одна из основных причин — электротранспорт, или, точнее, аккумуляторы как способ хранения для возобновляемой энергии.

В настоящее время тема возобновляемой энергии становится одной из самых обсуждаемых во многих странах: это самый быстрорастущий источник энергии в США, с показателем роста в 100% в период 2000–2018 гг. [1]. Впервые в прошлом году Великобритания произвела больше энергии из источников с нулевым содержанием углерода, чем энергии из топлива, несмотря на то, что еще менее 10 лет назад более 75% электрической энергии производилось при сжигании полезных ископаемых [2]. Австрия, где расположена штаб-квартира компании RECOM, находится в лидерах Европейского проекта по экологически чистой энергии, около 72% поступает из источников с нулевым содержанием углерода [3]. Однако не у каждой страны есть протяженные береговые линии, где вне поля зрения можно разместить атомные станции, или озера и заснеженные места в горах. Большинство стран должны полагаться на энергию ветра, солнечную или малоразмерные речные гидроэлектростанции, которые не всегда служат надежным источником энергии. Низкий уровень воды летом ограничивает выработку энергии, а пиковый спрос часто приходится на безветренные дни или ночи.

Одним из решений обеспечения непрерывности поставок является использование комбинированной электрической энергии, накопленной в аккумуляторах электромобилей (EV), для балансировки спроса

и предложения в системе «электромобиль — сеть» (V2G). В течение следующих 10 лет в одной только Германии будет около 7 млн электромобилей, оборудованных батареями емкостью 20–10 кВт каждый. Если только 20% данной емкости доступно в любой момент времени, этот объем составит 140 ГВт, или более 100 атомных электростанций.

Ключом к успеху систем V2G является комбинация двунаправленного потока энергии и искусственного интеллекта. Большинство транспортных средств более 95% времени проводит на стоянке [4]. Если электромобиль подключен к зарядной станции, пока владелец находится на работе, электромобиль может определить необходимость заряда батареи или высвободить часть энергии в сеть в часы пиковой нагрузки, таким образом адаптируя состояние заряда в зависимости от известных или прогнозируемых сценариев использования. Большинство дневных поездок составляет 37 км, нет необходимости держать батарею полностью заряженной между поездками. Для реализации данного метода необходимо двунаправленное зарядное устройство. При этом сама зарядная станция не обязательно должна быть интеллектуальной, так как системы искусственного интеллекта уже встроены в электромобили.

Установив потенциальную потребность в миллионах двунаправленных AC/DC-источников для предполагаемого увеличения рынка электромобилей к 2030 году, следующим этапом необходимо решить вопрос о коммерческой целесообразности их разработки. Есть два новых аспекта, которые сделали двунаправленные источники существенно более простыми и относительно недорогими в реализации. Первый — внедрение новых топологий, особенно хорошо подходящих для двунаправленных систем, а второй — распространение новых технологий,

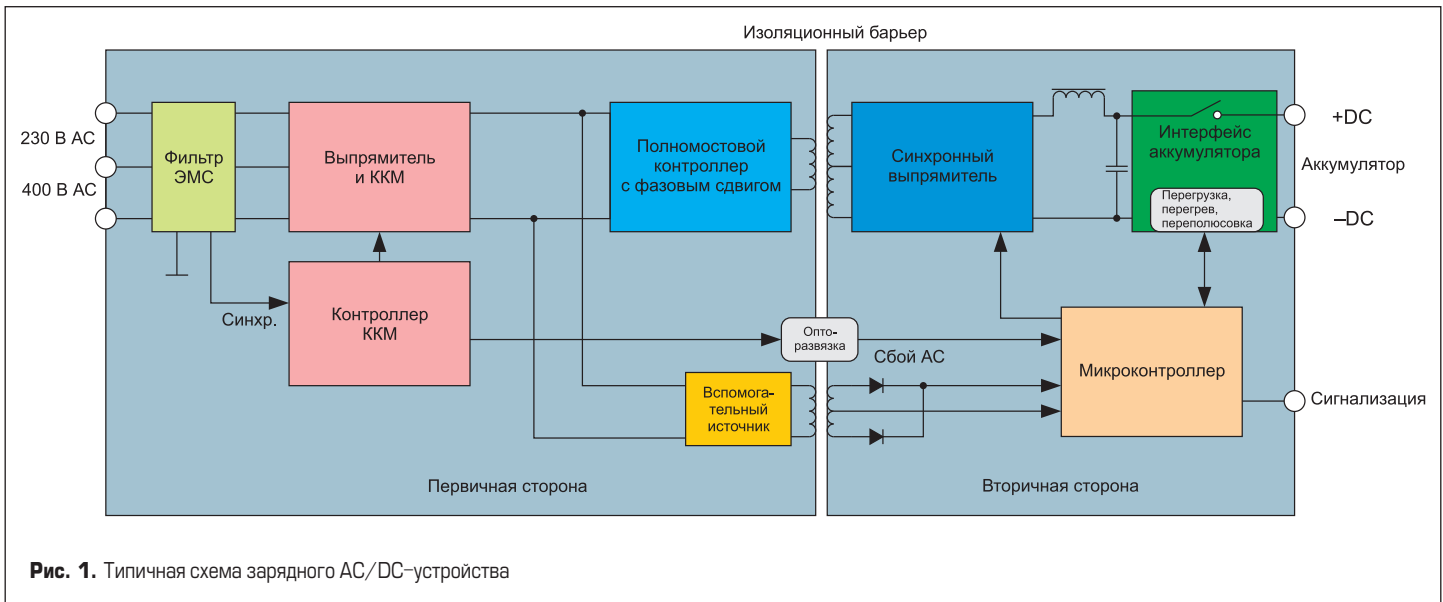


Рис. 1. Типичная схема зарядного AC/DC-устройства

таких как карбид кремния (SiC), и мощных ключей на их основе, конкурентоспособных по цене с давно известной технологией биполярных транзисторов (IGBT), но с существенно лучшими показателями по КПД.

Сравнение одно- и двунаправленных AC/DC-конвертеров

Однонаправленные зарядные устройства AC/DC существуют на рынке уже много лет. Для их построения обычно используется следующая схема с различными запатентованными вариантами (рис. 1).

По сути, зарядное устройство — это AC/DC-преобразователь (с каскадом ККМ), затем DC/AC-конвертер (модуляция трансформатора), за которым следует AC/DC-модуль (выпрямление и фильтрация) и интерфейс для подключения аккумулятора. В зависимо-

сти от напряжения аккумулятора и мощности драйвера трансформатора может использоваться однотактная, двухтактная, полнобразовая с фазовым сдвигом или резонансная топология, но практически для всех приложений с зарядом аккумуляторов необходимы модуль ККМ во входном каскаде и определенный интерфейс для защиты от обратной полярности и согласования требуемого профиля напряжения и тока заряда с типом химического элемента батареи.

Для реализации работы в двунаправленном режиме можно добавить каскад инвертора параллельно существующей схеме (рис. 2).

Однако данный способ реализации двунаправленной работы неэффективен, поскольку требует значительного количества дополнительных компонентов, в том числе двух трансформаторов, что значительно увеличивает стоимость. Если мы говорим о серийности

выпуска в миллионах штук, стоимость единичного изделия становится критически важной. Лучшей реализацией становится двунаправленная топология с одним изолирующим трансформатором (рис. 3).

Для того чтобы рассмотреть конструктивные особенности такой топологии, мы можем поочередно проанализировать каждый этап, проводя сравнение обычной топологии с двунаправленной. Поскольку источник двунаправленный, можно начать анализ с последнего этапа, он же первый, если устройство работает в обратном направлении.

Этап 1. Интерфейс батареи

Каждый тип аккумулятора имеет уникальный химический состав, что предполагает различные профили зарядки. Например, на начальном этапе 48-В литий-ионный ак-

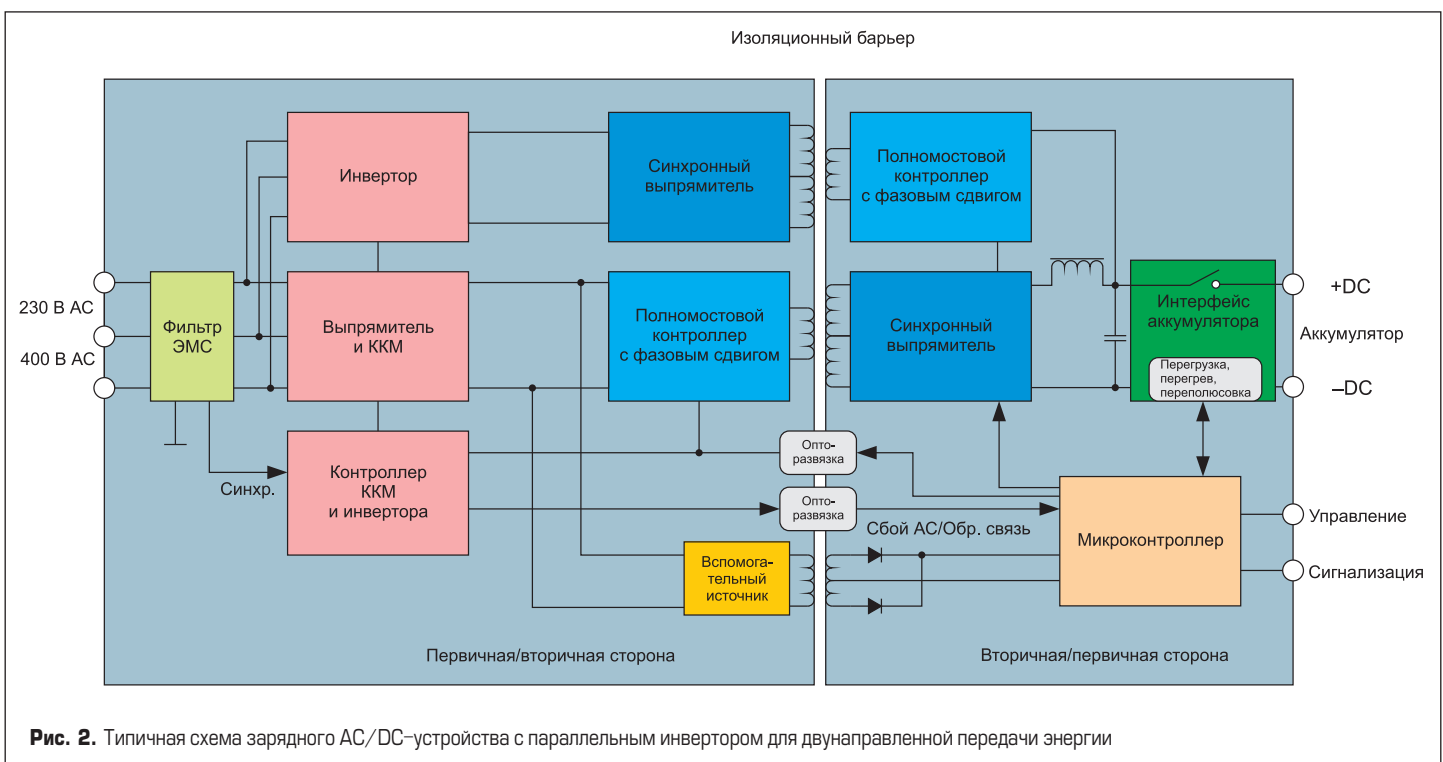


Рис. 2. Типичная схема зарядного AC/DC-устройства с параллельным инвертором для двунаправленной передачи энергии

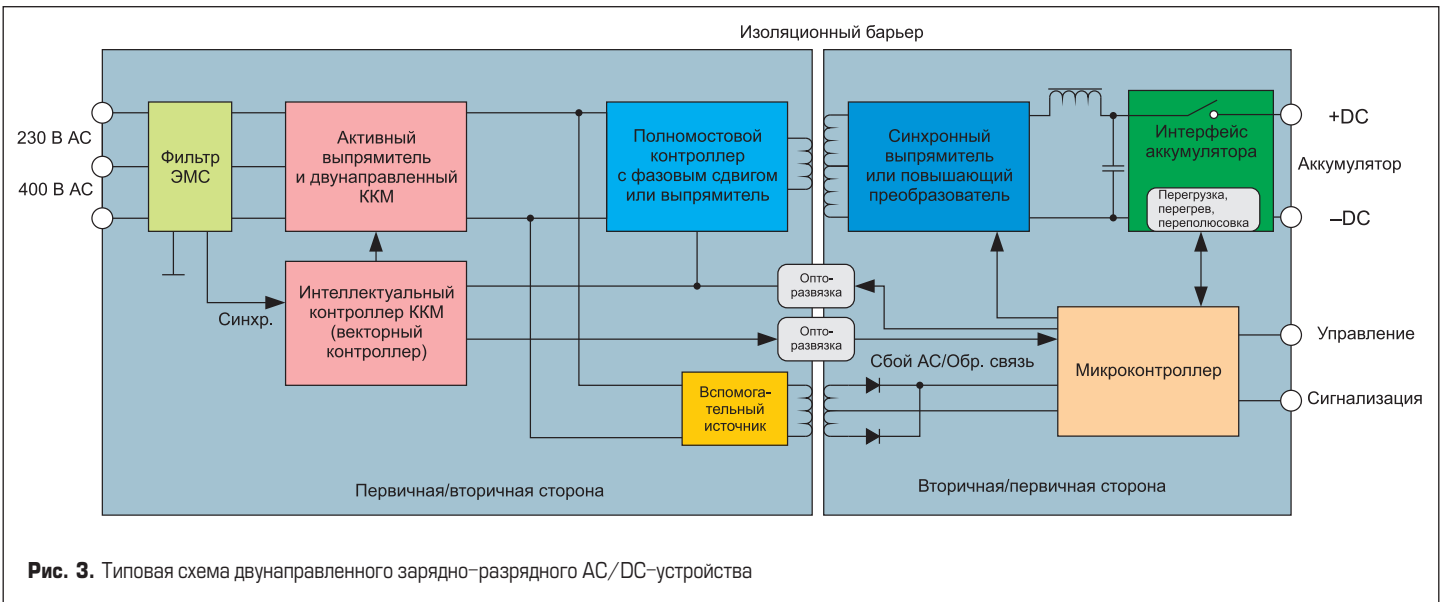


Рис. 3. Типовая схема двунаправленного зарядно-разрядного AC/DC-устройства

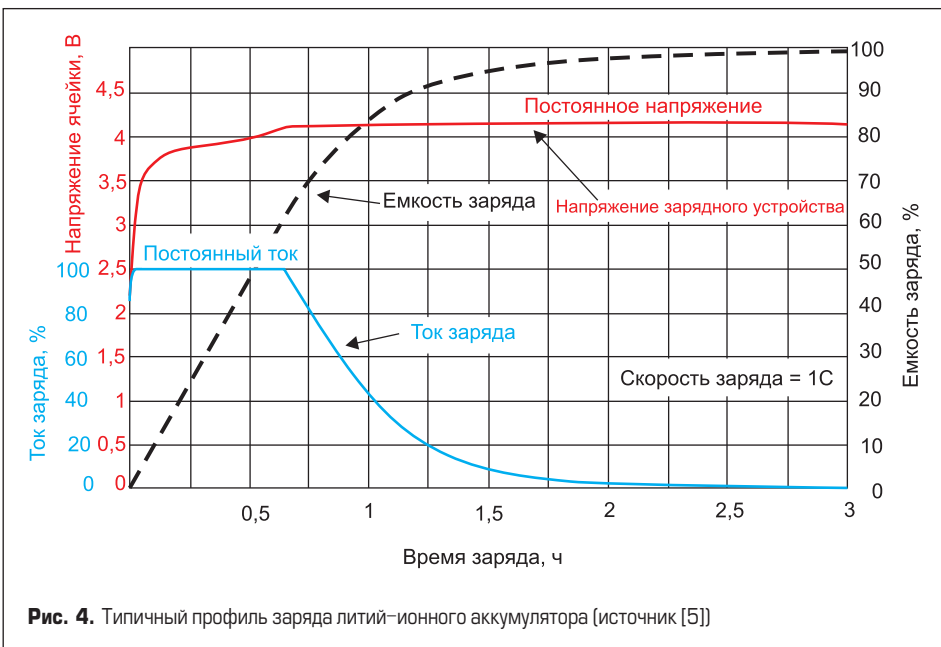


Рис. 4. Типичный профиль заряда литий-ионного аккумулятора (источник [5])

кумулятор должен заряжаться постоянным током, а затем постоянным напряжением до момента насыщения. После этого необходимо прервать зарядку, так как литий-ионные аккумуляторы не выдерживают перезаряда (это приводит к повреждению аккумулятора из-за покрытия анода металлическим литием), но зарядку и не следует прерывать ранее требуемого момента, так как полная емкость достигается значительно позже точки отсечки заряда постоянным током (рис. 4).

Для сценариев зарядки электромобилей необходимо принимать во внимание пользовательский интерфейс и обеспечение дополнительной безопасности. Большинство зарядных кабелей содержат шину данных для обеспечения согласования параметров между электромобилем и зарядной станцией перед подачей питания. Обычно для отображения основной информации, такой как состояние заряда, напряжение и ток,

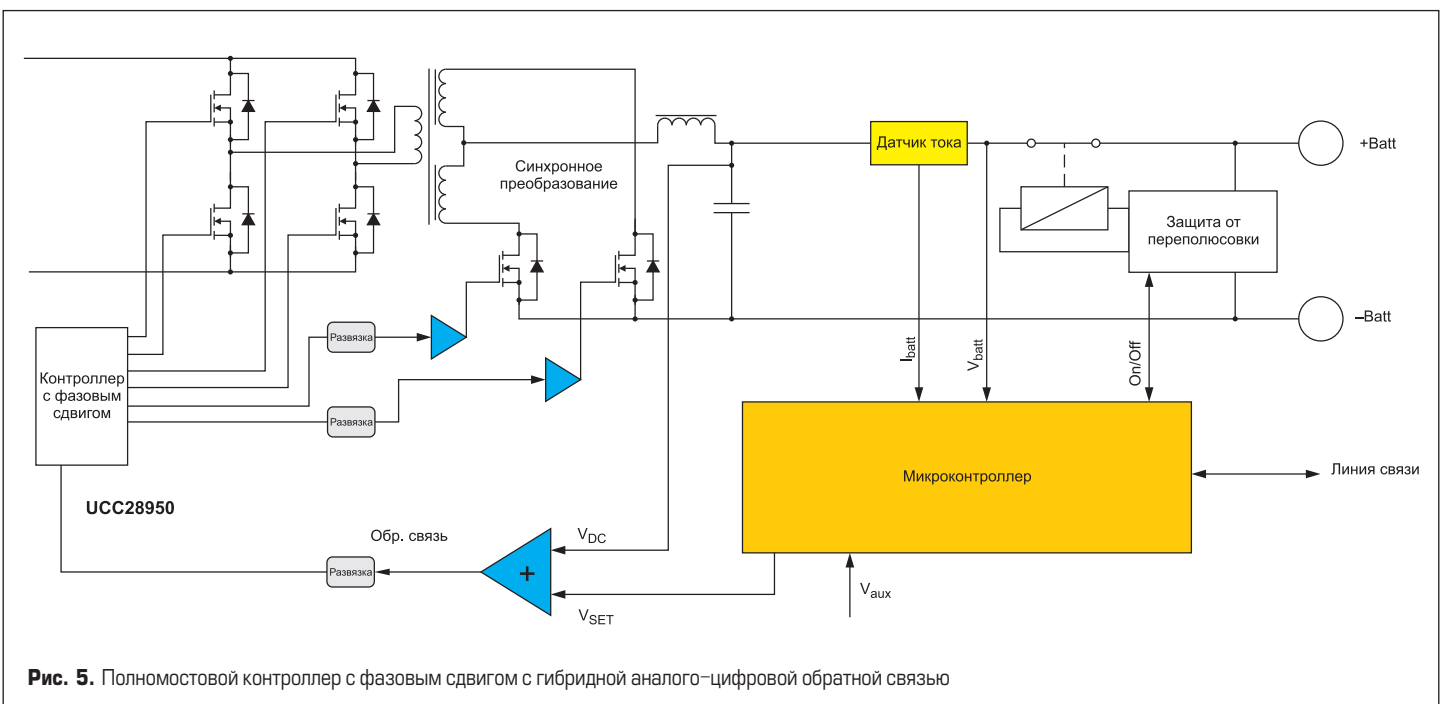


Рис. 5. Полномостовой контроллер с фазовым сдвигом с гибридной аналого-цифровой обратной связью

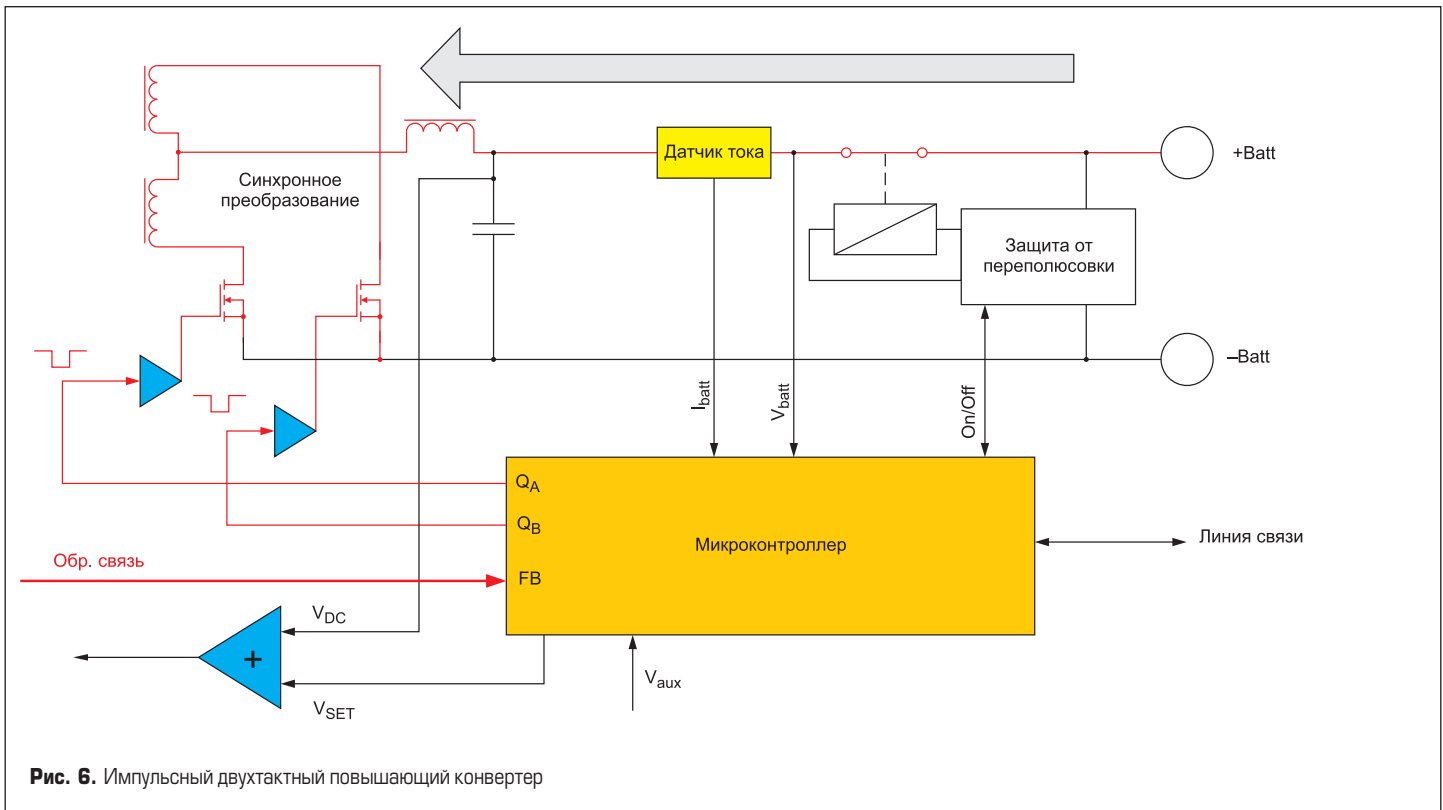


Рис. 6. Импульсный двухтактный повышающий конвертер

ожидаемая продолжительность и стоимость, на зарядной станции дополнительно устанавливается ЖК-дисплей. Поскольку микропроцессорный интерфейс уже установлен, добавка различных функций, например защиты от обратной полярности или адаптивного профиля зарядки, является простой задачей, не требующей больших дополнительных затрат.

Ступень силового трансформатора

«Сердцем» любого силового конвертера служит трансформатор. Если напряжение на аккумуляторе близко к напряжению шины KKM (около 400 В DC), хорошим выбором становится топология CLLC — двунаправленная вариация резонансной LLC-топологии. Поскольку решение на топологии CLLC является симметричным, ток может одинаково хорошо протекать в обоих направлениях, но, так как работа основана на резонансе, топология лучше всего показывает себя при схожих напряжениях на входе и выходе. Однако если напряжение аккумулятора ниже (48 В) или значительно выше (800 В), предпочтительна полностовая схема с фазовым сдвигом (PSFB) по причине малой стоимости. В данном примере используется 48-В литий-ионный аккумулятор, поэтому и была выбрана топология PSFB.

Аналоговый контроллер UCC28950 компании Texas Instruments был использован в прототипе 10-кВт разработки. Подобный выбор может показаться неожиданным, поскольку цифровой контроллер представляется более современным решением, однако использование аналогового решения имеет ряд преимуществ:

1. Контроллер — это признанное решение с известными характеристиками и доказанной надежностью.
2. Встроенный блок ZVS (Zero Voltage Switching — переключение при переходе напряжения через ноль) и работа при малых нагрузках, соответственно, и КПД остается высоким во всем диапазоне нагрузок.
3. Задающие сигналы для синхронного выпрямителя вырабатываются контроллером, сокращая количество необходимой обвязки и стоимость.
4. Встроенная защита. Таким образом, нет необходимости отслеживать наличие аварийных ситуаций и можно освободить микроконтроллер для других задач.
5. Малая стоимость.

Блок-диаграмма источника питания в режиме заряда аккумулятора показана на рис. 5. Обратная связь аналоговая, использующая выходное напряжение для регулирования сдвига фазы. Дополнительно микроконтроллер измеряет напряжение и ток заряда и подстраивает сигнал обратной связи для установки необходимых значений. По сути, это гибридная схема с аналоговой цепью обратной связи и цифровым управлением. Такая схема обеспечивает все преимущества аналогового контура, в том числе стабильность и отказоустойчивость, а также универсальность и точность регулировки систем с микропроцессорным управлением.

Для того чтобы сделать схему, показанную на рис. 5, двунаправленной, микропроцессор должен управлять синхронным выпрямителем в выходном каскаде, а также использовать мощную фильтрующую индуктивность для построения импульсного двухтактного повышающего преобразователя (рис. 6, 7).

В импульсной топологии ток через обмотку трансформатора не должен падать до нуля, поэтому Q_A и Q_B включаются и выключаются попеременно.

Ток источника I_L ограничен индуктивностью. На первичной обмотке (теперь это вторичная) генерируется ступенчатый выход в соответствии с коэффициентом передачи.

На первичной стороне контроллер PSFB выключен из работы управляющим микроконтроллером, и обмотки трансформатора не коммутируются. Тем не менее все SiC-транзисторы содержат два диода (прямой и обратный), за счет чего напряжение обмотки трансформатора выпрямляется двухполупериодным выпрямителем, а энергия запасается

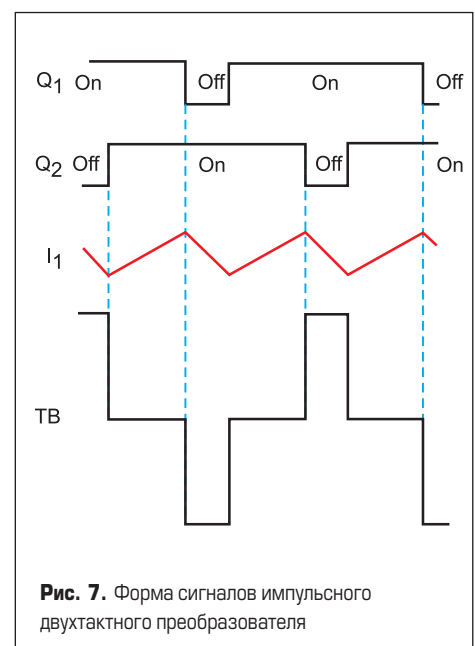


Рис. 7. Форма сигналов импульсного двухтактного преобразователя

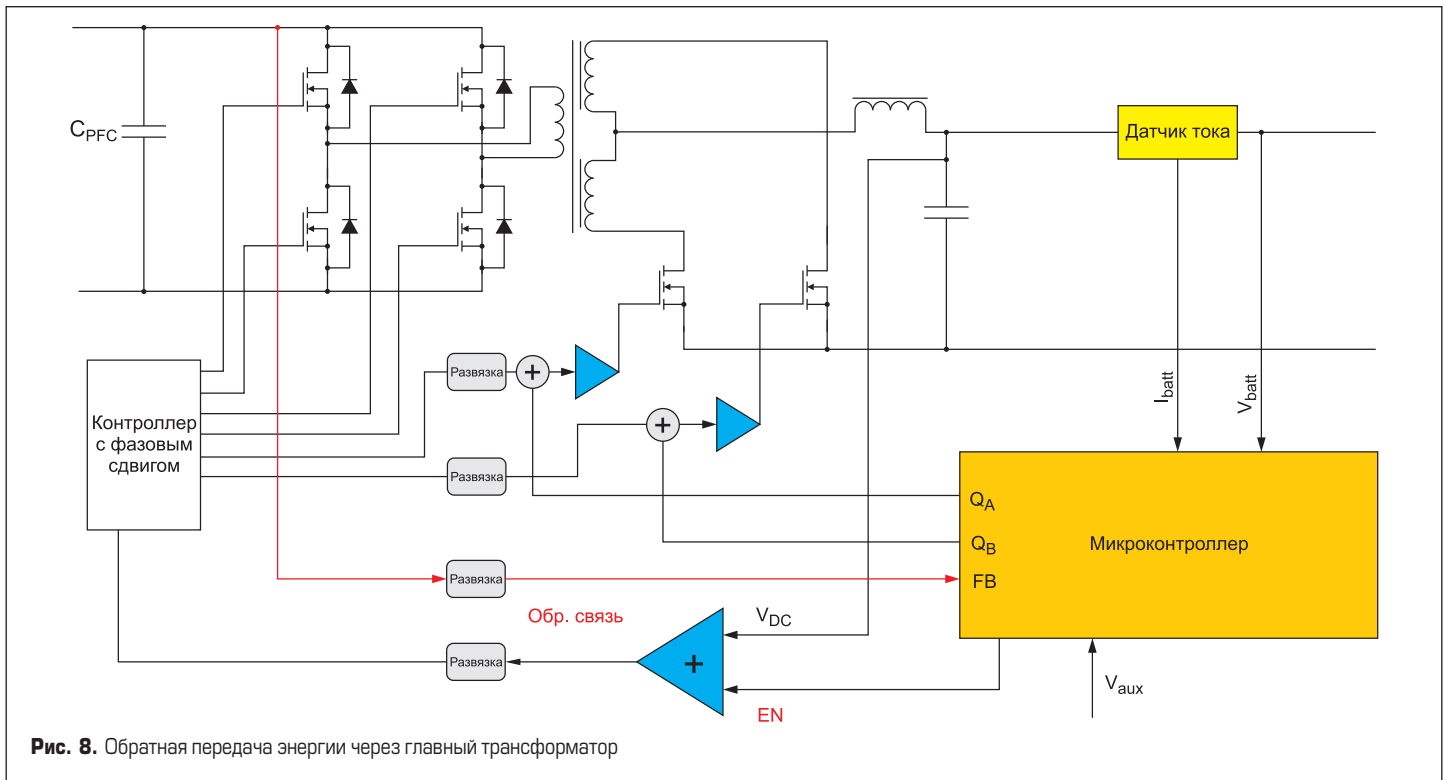


Рис. 8. Обратная передача энергии через главный трансформатор

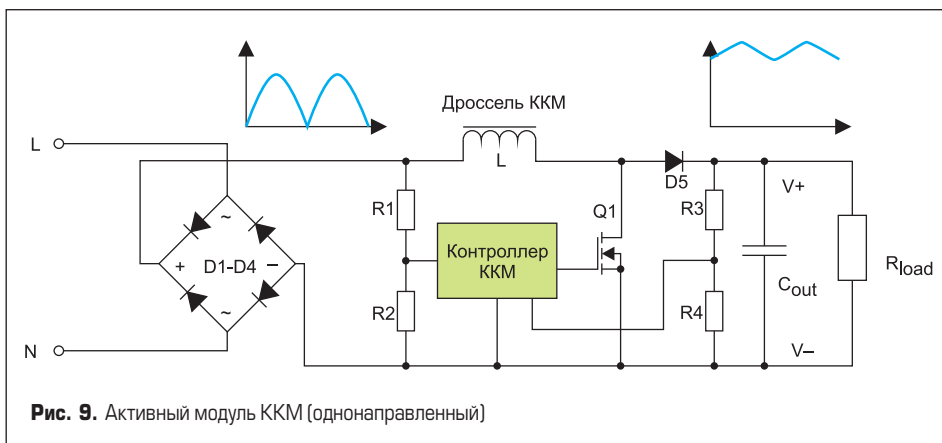


Рис. 9. Активный модуль ККМ (однаправленный)

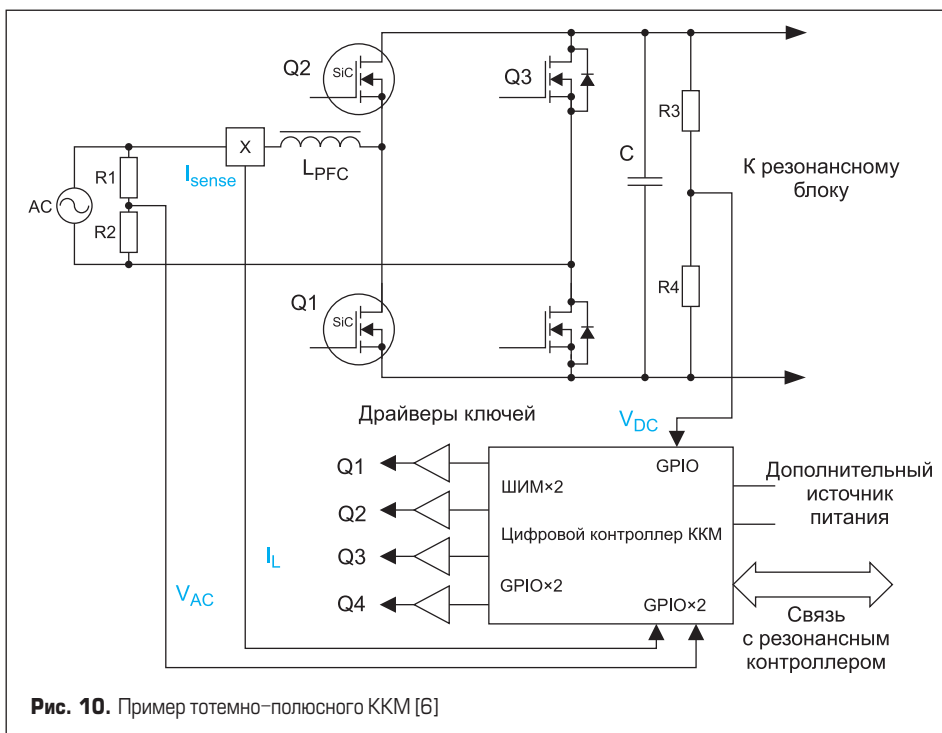


Рис. 10. Пример тотемно-полюсного ККМ [6]

в конденсаторе модуля ККМ. Дополнительная цепь обратной связи по напряжению позволяет микроконтроллеру регулировать передачу энергии в обратном направлении (рис. 8).

Самое большое преимущество данной топологии — ее простота и двойное использование всех основных компонентов при работе в прямом и обратном направлении. Это значительно снижает стоимость по сравнению с многими другими двунаправленными решениями с симметричным расположением, использующими схемы с двумя активными мостами (Dual Active Bridge — DAB) с четырьмя переключающими транзисторами на каждой стороне и двумя силовыми катушками индуктивности в дополнение к трансформатору.

Необходимо отметить, что на первичной стороне следует использовать силовые ключи с надежными встроенными диодами для работы в режиме пассивного выпрямления, даже при установке внешних диодов в параллель. Здесь можно применять только транзисторы на основе карбида кремния (SiC) или IGBT, поскольку встроенный диод в КМОП-транзисторах может выйти из строя при работе в таком режиме.

Ступень ККМ

Модуль коэффициента корректора мощности требуется для однофазных сетевых источников мощностью более 75 Вт. Простейшая топология с активным преобразованием использует повышающий конвертер, чтобы поднять выпрямленное напряжение до пикового входного, таким образом управление током заряда конденсатора в модуле ККМ можно сделать непрерывным и синхронизировать с синусоидальным входным напряжением и сделать коэффициент мощности близким к единице (рис. 9).

В данной схеме наблюдается две основные проблемы. Диоды D1–D5 четко указывают, что схема является однонаправленной, кроме того, потери на диодном мосту и на ступени повышающего преобразователя весьма существенные. Однако относительно стабильное напряжение на DC-шине необходимо для функционирования полномостовых контроллеров с фазовым сдвигом и многих резонансных каскадов, которые не обеспечивают работу в широком диапазоне входных напряжений.

Для мощных источников широко применяется тотемно-полюсная топология ККМ. Название «тотемно-полюсная» (в оригинале — «тотемный столб») связано с американскими индейцами, использовавшими резьбу на стволах деревьев и изображения различных богов и могущественных вождей для защиты от злых духов и привлечения удачи. Поскольку резные фигуры располагались друг над другом на вертикальном столбе, название было заимствовано для описания вертикально расположенных транзисторов в схемотехнике данной топологии. В тотемно-полюсной топологии один набор транзисторов используется для коммутации входного напряжения синхронно с частотой сети 50/60 Гц, а другой — со значительно большей частотой, 100 кГц для повышающего преобразователя. Данная топология не требует наличия выпрямляющих диодов, таким образом исключаются связанные с ними потери.

Карбид-кремниевые транзисторы обладают надежным встроенным обратным диодом и малым обратным зарядом компенсации потерь (Q_{rr}), поэтому они идеально подходят для высокочастотных ключей Q1 и Q2. Малый Q_{rr} и сопротивление открытого канала ($R_{DS_{on}}$) позволяют модулю ККМ работать в режиме постоянной проводимости (constant conduction mode — CCM), что снижает искажение гармоник и увеличивает общий КПД. CCM также

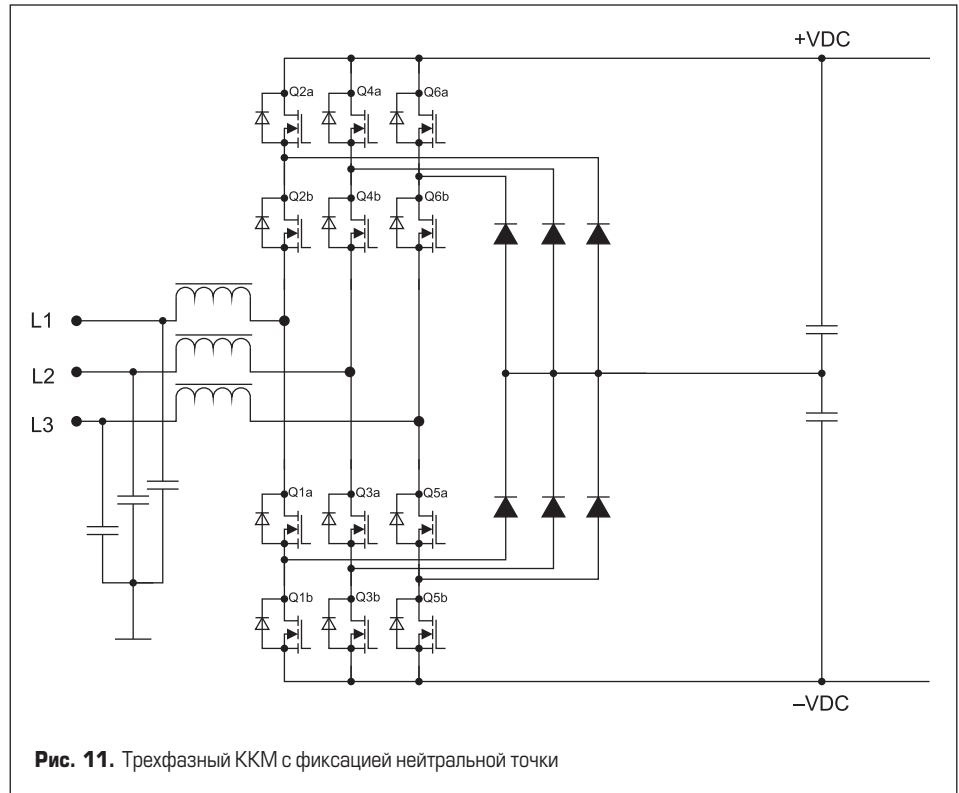


Рис. 11. Трехфазный ККМ с фиксацией нейтральной точки

упрощает построение фильтра электромагнитной совместимости, уменьшая стоимость. Низкочастотные ключи, переключающиеся на частоте сети Q3 и Q4, могут быть кремниевыми транзисторами. Еще одно преимущество тотемно-полюсной топологии — работа в обоих направлениях.

Дальнейшим развитием тотемно-полюсной топологии ККМ является трехфазная версия с фиксацией нейтральной точки (neutral point clamping — NPC). Множество трехфазных источников не имеют непосредственного подключения к нейтрали, а на вход подаются только три фазы и заземление. Добавление нескольких диодов в так называемую вен-

скую топологию создает нейтральную точку, также служащую средней точкой DC-шины. Использование нейтральной точки позволяет сбалансировать токи по фазам, что уменьшает габариты фильтра ЭМС.

Решение, продемонстрированное на рис. 11, является достаточным для множества мощных ККМ, но, тем не менее, оно не совсем оптимально. Для фиксации нейтральной точки диоды могут быть заменены парами транзисторов для повышения общего КПД с увеличением стоимости, но их применение не устранил синфазные напряжения пилообразной формы на выходном конденсаторе ККМ (рис. 12).

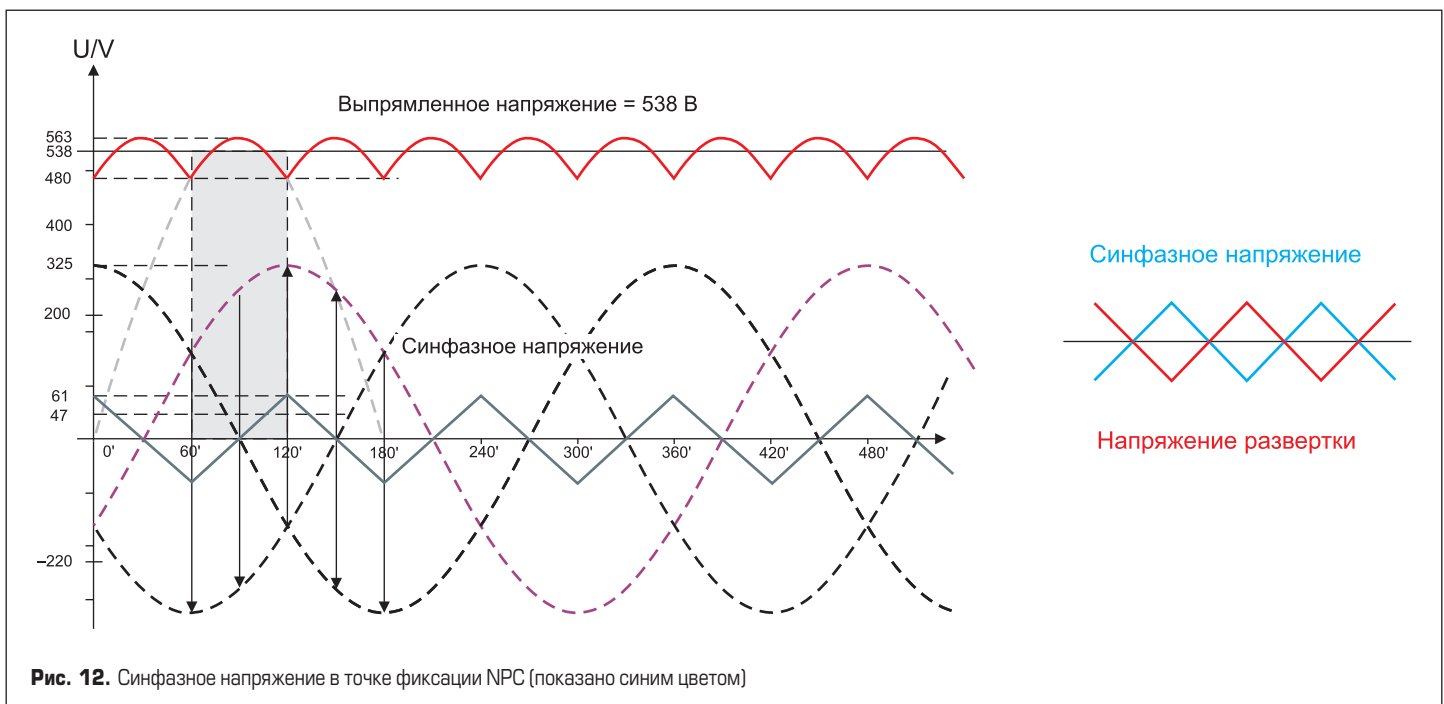


Рис. 12. Синфазное напряжение в точке фиксации NPC (показано синим цветом)

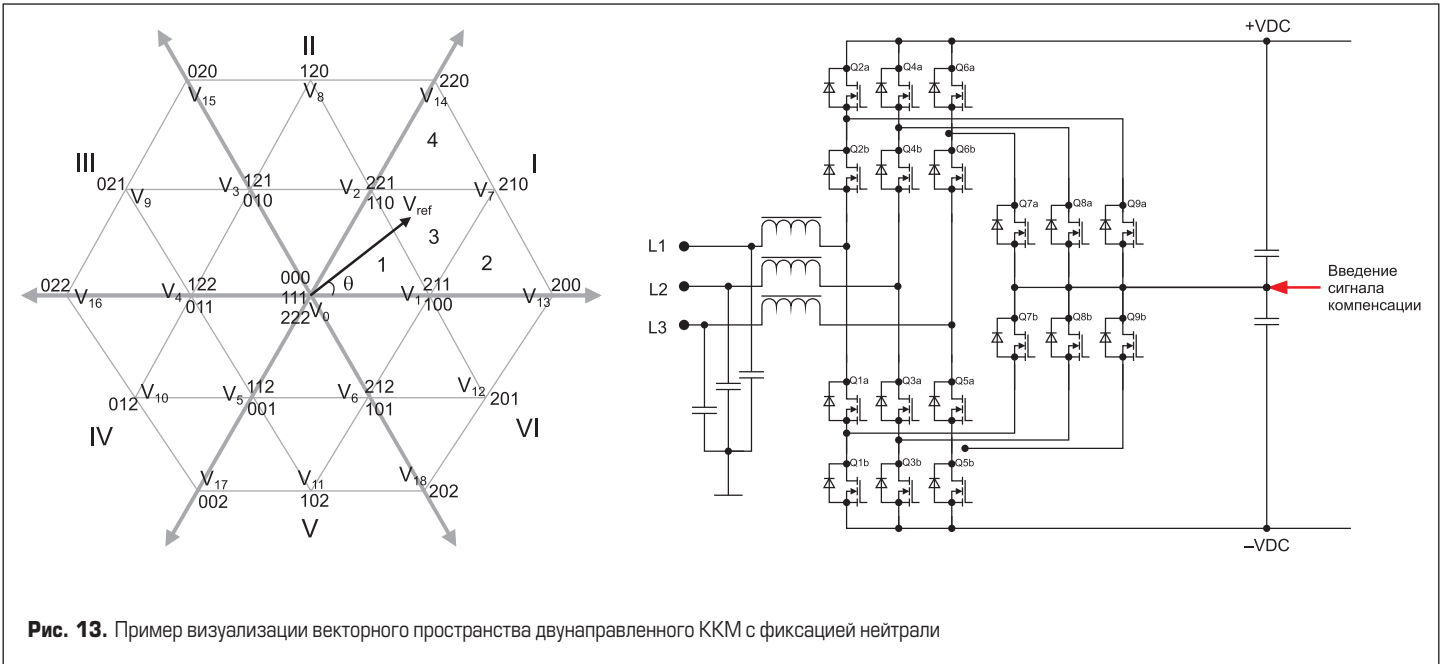


Рис. 13. Пример визуализации векторного пространства двунаправленного ККМ с фиксацией нейтрали

Синфазное напряжение неизбежно вызывает протекание дополнительного тока через ЭМС-фильтр, снижая его эффективность и увеличивая общие потери. Для решения этой проблемы используется метод «развертка» — введение дополнительного сигнала в точку фиксации нейтрали для компенсации синфазного напряжения. Источником данного сигнала служит отдельный понижающий конвертер, работающий от высоковольтной шины.

Для полноценного двунаправленного ККМ требуется сложный контроллер, способный точно скоординировать работу и обеспечить синхронность и точность подачи сигналов. Для решения данной задачи хорошим вариантом станет цифровой векторный контроллер (рис. 13).

Окончательная блок-диаграмма двунаправленного решения может выглядеть следующим образом (рис. 14).

Был сконструирован прототип 10-кВт устройства для тренировки аккумуляторов с целью подтвердить расчеты (рис. 15). Данный модуль не является зарядкой аккумуляторов электромобилей, но используется как составляющая системы тренировки батарей (новые аккумуляторные батареи необходимо зарядить, разрядить и затем снова зарядить для достижения полной емкости — благодаря возврату энергии обратно в сеть этот процесс стал более экономичным), однако базовые принципы, описанные в настоящей статье, остались неизменными. КПД прототипа превышает 96%, а коэффициент коррекции мощности достигает более 0,99 в обоих направлениях.



Рис. 15. 10-кВт двунаправленный AC/DC-источник

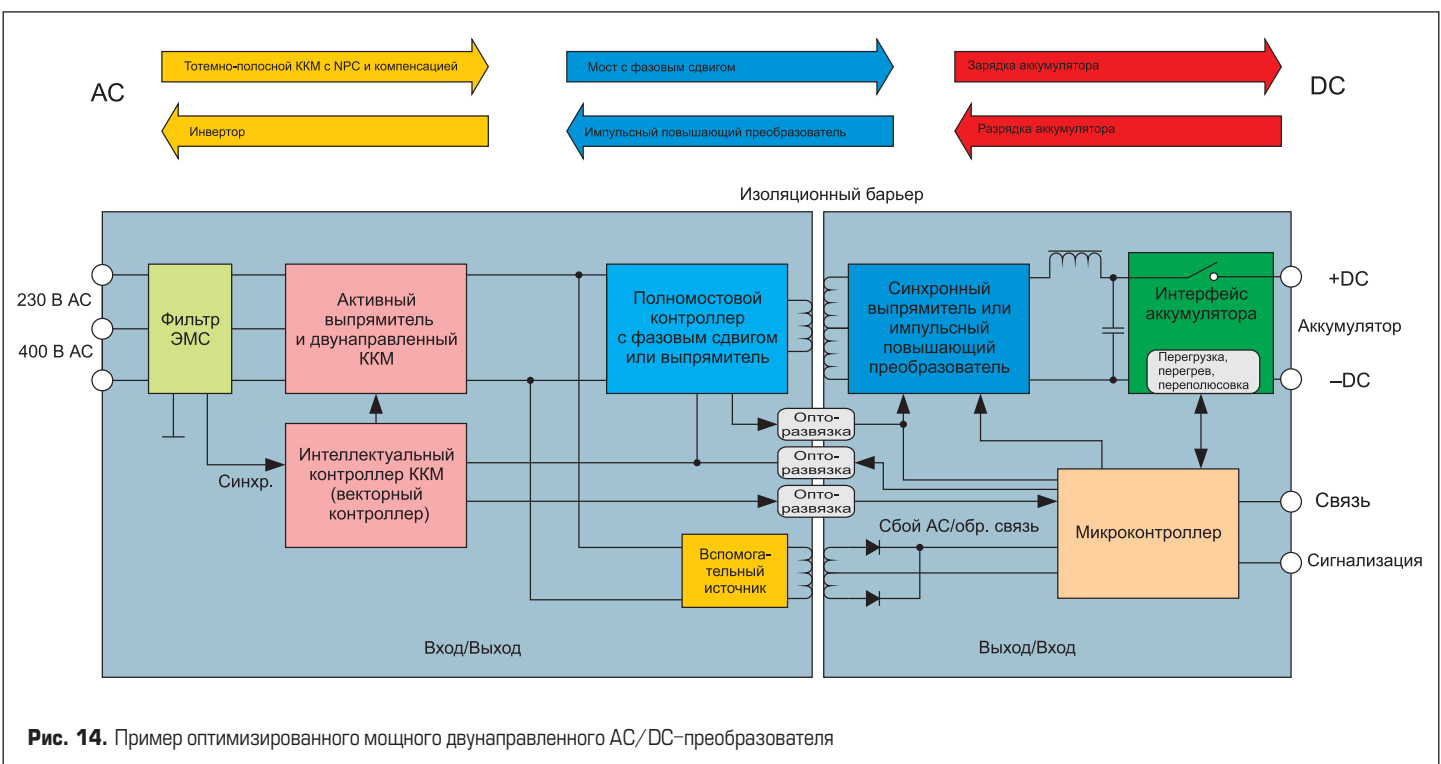


Рис. 14. Пример оптимизированного мощного двунаправленного AC/DC-преобразователя

Выводы

В начале статьи мы задались вопросом: «Кому необходим двунаправленный AC/DC-конвертер?» Ответ: «Наиболее вероятно, миллионам из нас». При таком высоком спросе появится множество решений поставленной задачи. В данной публикации предлагается одно из возможных решений. Для всех применений с большими объемами потребления ключевым фактором, помимо надежности и производительности, является малая стоимость. Множество двунаправленных топологий полно-

стью симметричны: выход становится зеркальным отображением входа. На первый взгляд такой подход логичен, однако внесение определенных модификаций в несимметричную топологию для обеспечения двунаправленной работы обеспечивает снижение затрат, устраняет необходимость дублирования компонентов и снижает их общее количество в перечне используемых материалов.

Литература

1. www.c2es.org/content/renewable-energy/

2. www.carbonbrief.org/analysis-uk-renewables-generate-more-electricity-than-fossil-fuels-for-first-time
3. www.mission2030.info/wp-content/uploads/2018/10/Klima-Energiestrategie_en.pdf
4. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/mobilitaet-in-deutschland.html
5. www.batteryuniversity.com
6. Книга знаний AC/DC. www.recom-power.com/en/support/resource-library/book-of-knowledge/book-of-knowledge.html