

УДК 621.31

АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ

© 2022 г. В. П. Бабенко^а, В. К. Битюков^{а, *}^аМИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),
Просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Россия

*E-mail: bitukov@mirea.ru

Поступила в редакцию 28.03.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 12.05.2022 г.

Снижение потерь энергии в выпрямителях остается серьезной проблемой не только для устройств с питанием от промышленной сети переменного тока, но и для высокопроизводительных систем с высокой плотностью мощности, низковольтных устройств автоэлектроники, авионики, приложений телефонии, “зеленой энергетики”, мобильной аппаратуры с батарейным питанием. Одним из подходов к решению этой проблемы является использование активных выпрямителей на базе MOSFET. Рассмотрены методические вопросы снижения потерь в выпрямительном устройстве, особенности схемотехники активных выпрямителей, существующая элементная база, представленная на рынке электронных компонентов.

Ключевые слова: “идеальный” диод, диод Шоттки, инверсный режим включения MOSFET, системы резервирования источников питания ORING, защита от переплюсовки питания

DOI: 10.31857/S0544126922050039

1. ВВЕДЕНИЕ

Выпрямительные диоды, обеспечивающие пропускание тока в одном направлении и блокирующие обратный, являются самыми массовыми, простыми, надежными и дешевыми полупроводниковыми приборами. Без диодов не обходится, практически, ни одно радиоэлектронное устройство. Их отличает простота включения и огромная область применений. Основные функции диодов – это преобразование переменного сигнала в постоянный, коммутирование электрических цепей. Непрерывно улучшаются предельные параметры диодов, динамические характеристики, расширяются функциональные возможности (силовые модули), растет удельная мощность, частота, расширяется диапазон рабочих температур. Практически неизменным остается лишь параметр, характеризующий падение напряжения при протекании тока в прямом направлении. Для кремниевых слаботочных диодов составляет примерно 0.7–0.8 В, а для силовых достигает 1.0–1.2 В. Повышенное падение напряжения на диодах приводит к снижению эффективности выпрямительных устройств. Это малозаметно у высоковольтных сетевых выпрямителей, но существенно в низковольтных устройствах автоэлектроники, авионики, приложений телефонии, “зеленой энергетики” и мобильной аппаратуры с батарейным питанием. Зачастую, более важным фактором является повышенное выделение тепла при протекании больших токов, что

усложняет, удорожает, увеличивает массогабаритные характеристики системы теплоотвода, а так же снижает КПД конечного устройства [1].

Частично этот недостаток преодолевается за счет использования диодов Шоттки, у которых потери при протекании прямого тока приблизительно вдвое ниже по сравнению с кремниевыми диодами и составляют около 0.4–0.5 В [2]. Однако у них повышенная величина обратного тока (десятки мА). Проблемы с отводом тела, хотя и в меньшей степени, но остаются.

Феноменальный успех активно управляемых MOSFET с низким сопротивлением (до долей мОм) в открытом состоянии обеспечил высокую эффективность преобразователей постоянного и переменного тока. Поэтому естественное желание разработчиков аппаратуры заменить для некоторых приложений диодный выпрямитель успешными MOSFET-аналогами. Однако, в отличие от неуправляемого (асинхронного) диода, MOSFET требует управления с учетом его характеристик, особенностей схемотехники активных выпрямителей, что и является предметом данной статьи.

2. СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Для лучшего понимания процессов и факторов, влияющих на характеристики активных выпрямителей, использовалось схемотехническое моделирование. Выбор программы моделирования

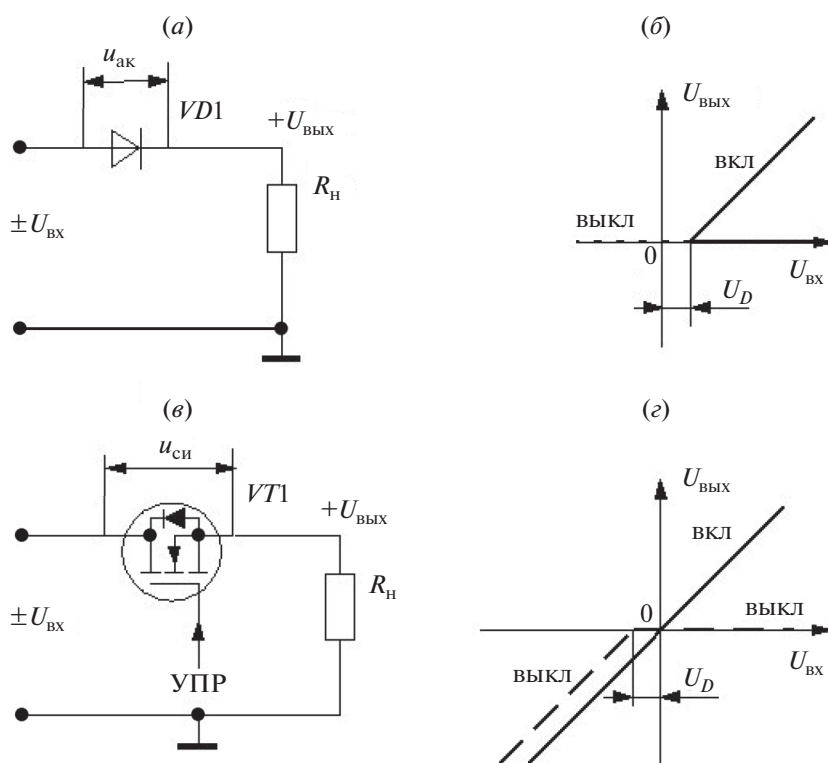


Рис. 1. Выпрямитель: (а) диодная схема; (б) передаточная характеристика диодного ключа; (в) MOSFET-ключ; (г) передаточная характеристика MOSFET-ключа.

достаточно широк, но не критичен. В данном случае использовалась программа Electronics Workbench (EWB). Кроме традиционного SPICE анализа EWB позволяет пользователям подключать к исследуемой схеме виртуальные контрольно-измерительные приборы, приближенные к реальным аналогам. В EWB имеется встроенная обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, большой профессиональный набор методов анализа электронных схем. Накоплен значительный опыт и существует обширная литература по использованию EWB в разных областях аналоговой и цифровой электроники [3–8]. Имеется встроенная библиотека мощных n - и p -канальных MOSFET транзисторов фирм International Rectifier и Zetex Semiconductors, мощных диодов с p - n -переходом и диодов Шоттки (Motorola). Привлекает в EWB возможность моделирования двумя способами:

— имитация электронной лаборатории, когда в электронную схему устанавливаются виртуальные измерительные приборы, подобные приборам реальным, и моделирование запускается выключателем Activate Simulation на рабочей панели;

— квазипрофессиональное моделирование, когда вид анализа задается из меню Analysis, в окне которого устанавливается вид анализа и узлы схе-

мы, для которых просматривается результат моделирования.

Оценить ключевые особенности диода и MOSFET можно, сравнивая их статические четырехквadrантные передаточные характеристики (рис. 1), полученные в результате моделирования в режиме Analysis/DC Sweep [3, 4]. Диод $VD1$ пропускает ток при положительном входном напряжении $U_{вх}$, а напряжение $u_{ак}$ на аноде относительно катода диода превышает пороговое напряжение U_D , то есть при $u_{ак} > U_D$, что соответствует сплошной линии “вкл” в первом квадранте характеристики (рис. 1б). Диод заперт, когда $U_{вх}$ отрицательно и $u_{ак} \leq U_D$ (пунктирная линия “выкл”). Для кремниевых диодов пороговое напряжение около $U_D \approx 0.7$ В.

При подаче отпирающего напряжения “УПР” высокого уровня на n -MOSFET (рис. 1в) канал транзистора проводит ток, как при положительном $+U_{вх}$, так и отрицательном $-U_{вх}$ входном напряжении, что на характеристике (рис. 1г) в первом и третьем квадранте показано сплошной линией “вкл”. Так как сопротивление канала открытого транзистора мало, то характеристика “вкл” проходит практически через начало координат. При подаче запирающего напряжения “УПР” низкого уровня транзистор запирается только в первом квадранте характеристики (рис. 1г) при положи-

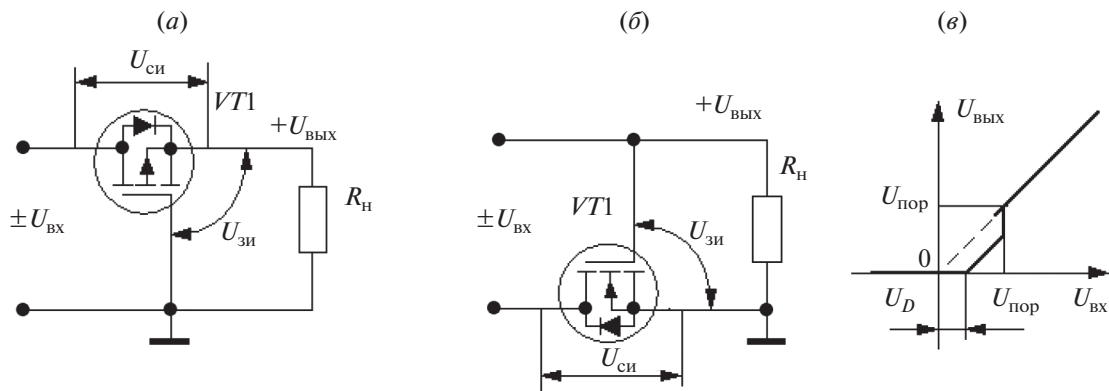


Рис. 2. “Идеальный диод”; (а) схема на *p*-канальном MOSFET; (б) схема на *n*-канальном MOSFET; (в) передаточная характеристика.

тельном входном напряжении $+U_{вх}$ (пунктирная линия “выкл”). При подаче отрицательного входного напряжения $-U_{вх}$ MOSFET остается проводящим в третьем квадранте характеристики, несмотря на запирающий сигнал “УПР”, что вызвано наличием технологического (паразитного) диода, включенного параллельно каналу, как показано на УГО транзистора. Причем характеристика оказывается смещенной на величину напряжения открытия технологического диода $U_D \approx 0.7$ В.

Чтобы обеспечить ключевую характеристику MOSFET, подобную диоду, то есть надежное запираение канала транзистора при любой полярности $U_{вх}$, а управляемое включение только при положительной полярности $U_{вх}$, транзистор обычно включается инверсно [5], так, чтобы технологический диод транзистора VT1 был включен в прямом направлении (рис. 2). Такое включение получило название “идеальный” или “умный” диод и часто используется для защиты нагрузки от ошибочного подключения полярности входной батареи $U_{вх}$ [9].

В схеме “идеального” диода на *p*-MOSFET (рис. 2а) при начальном включении положительного входного напряжения $+U_{вх}$ ток протекает через прямосмещенный диод и сопротивление нагрузки R_H . Падение напряжения на нагрузке равно напряжению между затвором и истоком $U_{зи}$ сравнивается с пороговым напряжением $U_{пор}$ транзистора. При $U_{вх} > U_{пор}$ низкое сопротивление канала $R_{си\ вкл}$ открытого транзистора шунтирует технологический диод и весь ток нагрузки протекает через низкоомный канал, обеспечивая малое падение $U_{си}$. На передаточной характеристике, показанной на рис. 2в, видно, что до напряжения открывания транзистора $U_{вх} < U_{пор}$, когда ток протекает через технологический диод, характеристика смещена на напряжение U_D . При напряжении $U_{вх} > U_{пор}$ со-

противление канала транзистора $R_{си\ вкл}$ становится минимальным, обеспечивая малое падение напряжения протекающему через канал току. Передаточная характеристика проходит практически через начало координат (пунктирная часть линии на рис. 2в).

Если входное напряжение отрицательное $-U_{вх}$, то технологический диод обратно смещен и ток нагрузки равен нулю. При этом потенциалы затвора и истока одинаковы, то есть $U_{зи} = 0$. Канал заперт и блокирует ток при любой полярности входного напряжения.

На участке $U_{вх} > U_{пор}$ передаточная характеристика “идеального диода” подобна характеристике полупроводникового выпрямительного диода с малым падением напряжения в открытом состоянии.

Следует отметить, что схема “идеального диода”, показанного на рис. 2а, годится только для низковольтных решений, пока входное напряжение $U_{вх}$ не превышает допустимого напряжения $U_{зи\ доп}$ между затвором и истоком, обычно на превышающего 20 В. Модификация схемы позволяет применить ее для более высоких напряжений [10]. Другим недостатком описываемой схемы является использование *p*-канального транзистора, которые дороже и хуже по параметрам *n*-MOSFET.

Схема “идеального диода” на *n*-MOSFET (рис. 2б) несколько отличается от рассмотренной ранее. Для обеспечения инверсного режима, транзистор по-прежнему включен инверсно между заземленным выходом нагрузки и отрицательным выводом входного источника $U_{вх}$. Принцип действия и передаточная характеристика “идеального диода” на *n*-MOSFET не отличаются от *p*-MOSFET (рис. 2, а). Достоинство заключается в использовании *n*-канального транзистора, а недостаток — в сложности с звездообразным заземлением нескольких нагрузок, питаемых от одного источника. Область применения обеих схем — защита

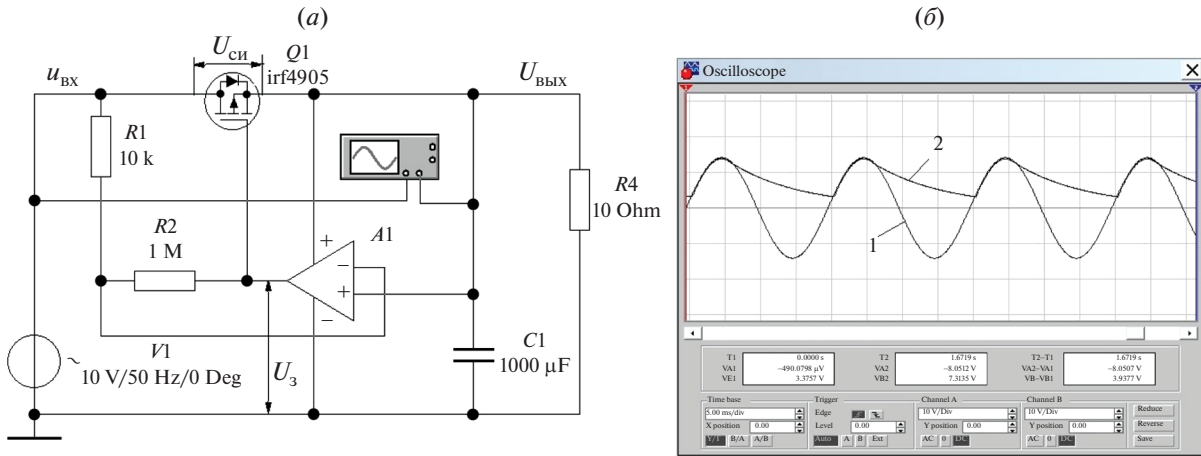


Рис. 3. Активный выпрямитель на p -MOSFET: (а) схема; (б) осциллограммы; 1 – входное напряжение ($u_{\text{ВХ}}$); 2 – выходное напряжение ($u_{\text{ВЫХ}}$).

нагрузки от неправильного подключения батареи питания, а так же системы резервирования источников питания ORing [10].

Преимущество MOSFET по сравнению с диодами очевидно в случае, когда падение напряжения на открытом транзисторе $U_{\text{си вкл}}$ меньше прямого падения напряжения на диоде U_D , то есть при $U_{\text{си вкл}} = I_n R_{\text{си вкл}} < U_D$, где I_n – ток нагрузки, а $R_{\text{си вкл}}$ – сопротивление канала транзистора в проводящем состоянии.

Так для примера при токе нагрузки $I_n = 20$ А на диоде Шоттки с прямым падением напряжения 0.5 В рассеивается мощность равная 10 Вт, а на MOSFET с сопротивлением канала $R_{\text{си вкл}} = 5$ мОм при том же токе нагрузки падение напряжения составляет всего $U_{\text{си вкл}} = 50$ мВ и рассеивается мощность равная 1 Вт, что позволяет обойтись без дополнительного радиатора.

Есть принципиальная разница в работе выпрямительных диодов и ключей MOSFET (рис. 2). Выпрямительный диод представляет собой переключатель, управляющий направлением протекания тока: пропускает ток, когда напряжение на аноде (входное) превышает напряжение на выходном конденсаторе, и блокирует обратный ток, когда входное напряжение ниже напряжения на выходном конденсаторе. В отличие от диодов MOSFET-ключ действует как переключатель, который открывается на время всего полупериода и в это время пропускает ток в любом направлении. Вследствие чего к концу полупериода подаваемой мощности переменного тока конденсатор фильтра выпрямителя будет разряжаться практически до нуля. Поэтому схемы “идеальных” диодов, приведенные на рис. 2, могут работать только на активную нагрузку без сглаживающего конденсато-

ра и не пригодны для использования в качестве выпрямителей.

3. АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА p -MOSFET

Чтобы активный MOSFET выполнял выпрямительные функции необходимо контролировать величину и знак напряжения между стоком и истоком $U_{\text{си}}$ транзистора. Реализовать это можно с помощью компаратора, управляемого сигналом $U_{\text{си}}$. Однако у схемы с компаратором возможен дребезг при переходе входного напряжения через ноль. Лучший результат дает схема с разностным усилителем с заданным коэффициентом усиления, как показано на рис. 3. На входы операционного усилителя (ОУ) А1 подается напряжение с транзистора Q1 таким образом, чтобы при положительной полярности $+U_{\text{си}}$ выходной сигнал ОУ, подаваемый на затвор транзистора, удерживал MOSFET-ключ в открытом состоянии, а при отрицательном $-U_{\text{си}}$, запирает транзистор и блокировал обратный ток. Более простая схемотехника активного выпрямителя реализуется с p -каналом MOSFET (рис. 3), когда транзистор включен инверсно [11, 12], ОУ питается от выпрямленного напряжения, подаваемого с конденсатора фильтра C1.

Входное переменное напряжение $u_{\text{ВХ}}$ от источника V1, выпрямляется активным выпрямителем на p -MOSFET Q1. Нагрузкой выпрямителя является резистор R4, зашунтированный конденсатором фильтра C1. Резисторы R1 и R2 в цепи ООС задают коэффициент усиления. Напряжение на затворе U_3 MOSFET достигнет уровня, достаточного для его переключения, когда выполняется условие

$$U_3 = U_{\text{ВЫХ}} - (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}) R2/R1, \quad (1)$$

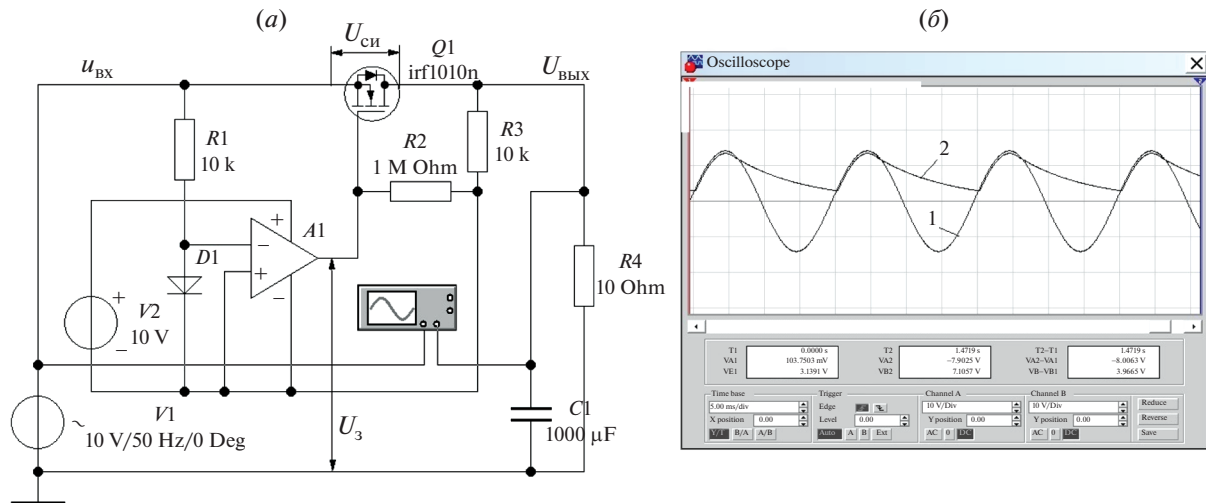


Рис. 4. Активный выпрямитель на *n*-MOSFET: (а) схема; (б) осциллограммы; 1 – входное напряжение ($u_{ВХ}$); 2 – выходное напряжение ($u_{ВЫХ}$).

где U_3 – напряжение на затворе, $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ – входное и выходное напряжение.

Учитывая, что $U_{СИ} = U_{ВХ} - U_{ВЫХ}$, а $U_{ЗИ} = U_3 - U_{ВЫХ}$, где $U_{СИ}$ – напряжение сток-исток, $U_{ЗИ}$ – напряжение затвор-исток, получают

$$U_{ЗИ} = -(R2/R1)U_{СИ}. \quad (2)$$

Если типовое значение напряжения $U_{ЗИ}$ открывания транзистора порядка +4 В, то минимальное напряжение между стоком и истоком $U_{СИ}$, при котором переключится транзистор, согласно выражению (2) составит 40 мВ. Падение напряжения на выпрямителе можно сделать еще меньше, увеличив соотношение между резисторами. Ограничивающим фактором здесь является только напряжение смещения ОУ.

Преимуществом активного выпрямителя (рис. 3а) является простота питания ОУ от выпрямленного напряжения на конденсаторе $C1$. Однако *p*-канальный MOSFET уступает по параметру сопротивление канала/стоимость в несколько раз *n*-канальному MOSFET.

4. АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА *n*-MOSFET

Схема активного выпрямителя на *n*-канальном MOSFET [13–15], как и предыдущая, содержит усилитель на ОУ $A1$, контролирующий величину и знак падения напряжения $U_{СИ}$ на канале транзистора $Q1$. Транзистор включен инверсно, так чтобы при приходе на вход выпрямителя положительной полуволны от источника переменного напряжения $u_{ВХ}$ (генератор $V1$), ток вначале протекал через прямосмещенный технологический диод (см. УГО транзистора). В последующий момент

выходной сигнал ОУ, подаваемый на затвор транзистора, открывает канал, шунтирующий технологический диод. И весь ток с минимальными потерями протекает через канал транзистора.

Если выходное напряжение $u_{ВЫХ}$ станет больше входного напряжения $u_{ВХ}$, то сигнал с выхода ОУ запирает транзистор, а обратносмещенный технологический диод блокирует обратный ток с выхода выпрямителя. Осциллограммы входного и выходного напряжения приведены на рис. 4б. Так как для поддержания низкого сопротивления канала открытого транзистора необходимо напряжение между затвором истоком около +10 В, а напряжение на стоке и истоке открытого транзистора практически одинаковы и равны $u_{ВХ}$, то для питания ОУ необходимо использовать дополнительный незаземленный источник $V2$ с напряжением 10 В. Как и в предыдущей схеме, коэффициент усиления определяется резисторами в цепи ООС $R2$ и $R3$, что в свою очередь определяет чувствительность срабатывания ОУ. Диод $D1$ и резистор $R1$ выполняют функцию защиты ОУ, ограничивая напряжение на его входах. В соответствии с выражением (2), чтобы обеспечить пороговое переключение транзистора $U_{ЗИ} \approx +4$ В при параметрах, показанных на схеме, минимальное напряжение $U_{СИ}$ будет около 40 мВ.

Несомненным достоинством этой схемы является использование более эффективного и доступного *n*-MOSFET с малым сопротивлением канала. Однако схема управления более сложная и, соответственно, более дорогая. Необходим дополнительный источник питания ОУ с плавающим потенциалом относительно “земли”.

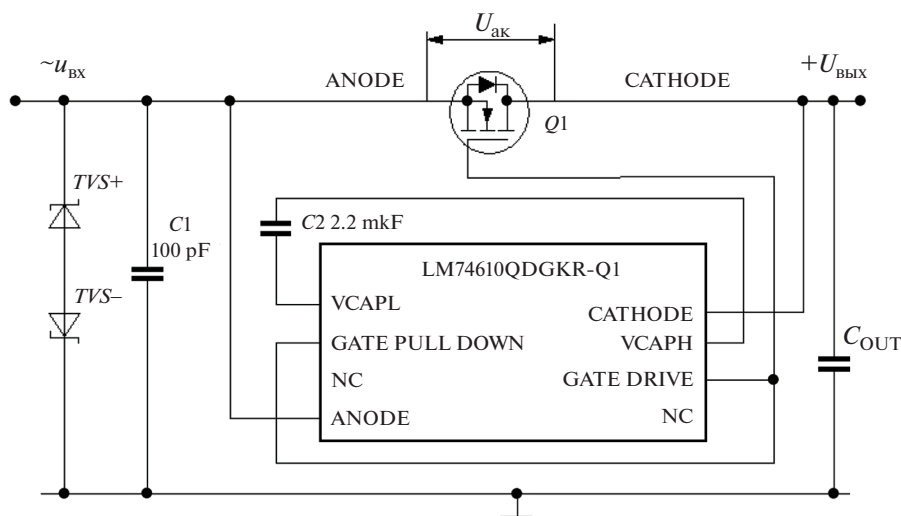


Рис. 5. Схема включения “умного” диода LM744610QGK-Q1.

5. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ НА РЫНКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТ

В настоящее время на рынке компонент достаточно широко представлены MOSFET выпрямители и контроллеры “идеальных” диодов с внешними [16] и встроенными транзисторами [17], с простой схемой двухполюсной схемой включения, подобно полупроводниковому диоду.

Типичной иллюстрацией является драйвер активного выпрямителя LM74610-Q1 (TI) [17], схема которого приведена на рис. 5. Полное название драйвер: Zero IQ Reverse Polarity Protection Smart Diode Controller (контроллер умного диода). Схема выполнена в виде двухполюсника без связи с “землей” и поэтому обладает нулевым током покоя (IQ). Внешний *n*-канальный MOSFET расширяет диапазон мощности до сотен Вт. Встроенный зарядовый насос и конденсатор C2 обеспечивают достаточное напряжение для надежного открытия MOSFET-ключа и питания контроллера.

Работает схема следующим образом. Пока входное напряжение отсутствует, транзистор заперт, ток через нагрузку не течет. Если потенциал анода больше потенциала катода $U_{ак} > 0$, то ток начинает протекать через встроенный технологический диод, показанный в УГО транзистора. Падение напряжения на транзисторе в этот момент определяется напряжением на прямосмещенном диоде. При напряжении около 0.48 В начинает работать зарядовый насос, обеспечивающий зарядку конденсатора VCAP до напряжения 6.3 В, которое обеспечивается питание всей микросхемы и получение управляющего напряжения GATE DRIVE. В следующий момент транзистор открывается, сопротивление канала снижается до минимальной величины. Весь ток протекает че-

рез канал, падение напряжения $U_{ак}$ сокращается до минимума. В таком состоянии устройство может находиться до тех пор, пока конденсатор VCAP не разрядится до 5.1 В или пока не изменится направление тока. В первом случае полевой транзистор закроется и снова заработает зарядный насос, который быстро зарядит VCAP, во втором случае контроллер обнаружит смену полярности на выводах анода и катода (достаточно обратного напряжения 20 мВ) и в течение 2 мкс принудительно закроет транзистор.

Появление контроллеров “умных диодов” стимулировало появление на рынке контроллеров “идеальных мостовых выпрямителей” [18–21] таких компаний, как Microsemi, NXP, TI, Infineon, и, конечно, китайские фирмы. Например, Linear Technology (ныне подразделение Analog Device) представила контроллер LT4320 [19] мостового выпрямителя для управления одновременно четырьмя *n*-MOSFET схема включения которого показана на рис. 6.

По сравнению с традиционным вариантом диодного моста, мост на четырех MOSFET обеспечивает компактную и энергоэффективную конструкцию выпрямителя с низким тепловыделением и малыми размерами. При токе 10 А температура контроллера повышается всего на 16°C, в то время как у классического диодного моста — на 80 градусов.

В контроллере LT4320 предусмотрена задержка при включении одной пары MOSFET для предотвращения обратных токов, оставляя другую пару транзисторов выключенными. Использование внешних MOSFET-ключей расширяет диапазон мощности от единиц до тысяч Вт.

Встроенный зарядовый насос контроллера обеспечивает достаточное напряжение для надежно-

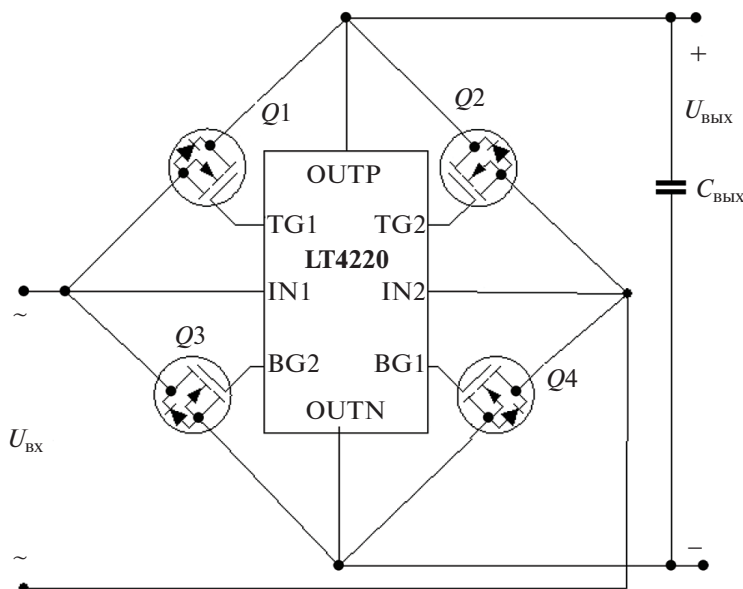


Рис. 6. Мостовой активный выпрямитель.

го отпирания *n*-MOSFET. А ток свыше 425 мкА, развиваемый зарядовым насосом, обеспечивает быстрое переключение MOSFET даже с большим зарядом затвора, что важно для высокочастотных и повышенной мощности приложений [22, 23].

Контроллер LT4320 обеспечивает выпрямление переменного тока до 50 В, коммутацию постоянного тока до 72 В. Рассчитан на промышленный температурный диапазон от -40 до 85°C . Выпускается в компактном 8-выводном корпусе DFN с размерами 3×3 мм и в 12-выводном корпусе MSOP с увеличенным расстоянием между высоковольтными контактами.

На рынке представлены две версии контроллеров:

- низкочастотная версия LT4320 промышленной частоты предназначена для выпрямления от постоянного тока до 60 Гц;

- высокочастотная версия LT4320-1 — от постоянного тока до 600 Гц для бортовой аппаратуры.

LT4320 в первую очередь предназначалась для устройств Power over Ethernet (PoE) с подачей электрической энергии вместе с данными по сетевой инфраструктуре Ethernet.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Замена выпрямительных диодов на MOSFET с увеличением уровня мощности существенно снижает потери энергии, обеспечивает низкое тепловыделение и повышает эффективность преобразования энергии. Активные выпрямители, реализованные в виде специализированной схемы контроллера с минимальным количеством внешних элементов, представляют интерес для новых

высокопроизводительных приложений. Проведено схемотехническое моделирование и рассмотрены особенности схемотехники на базе *p*- и *n*-канальных MOSFET, существующая элементная база активных выпрямителей на рынке электронных компонент. Безусловно, полупроводниковые диоды и структуры Шоттки сохранят свои позиции в промышленной аппаратуре. Но в новых разработках высокопроизводительных систем с повышенной плотностью мощности рекомендуется обратить пристальное внимание на активные выпрямители. Относительно высокая стоимость объясняет недостаточную популярность этих компонентов у разработчиков аппаратуры. Однако цены на полупроводниковые компоненты непрерывно снижаются по мере развития технологий их производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Siran Wang, Walter Yeh*. Активные коммутаторы в мосте переменного тока увеличивают КПД // РадиоЛоцман. Май-июнь 2021(114). С. 47–49. <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=641915>
2. *Why You Should Consider Ideal Diodes in Your Designs* // By ELE Times Research Desk. February 11, 2019. <https://www.eletimes.com/why-you-should-consider-ideal-diodes-in-your-designs>
3. *Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С.* Силовой MOSFET-ключ переменного тока // Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем” (“Радиоинфоком-2021”). М.: РТУ МИРЭА. 2021. С. 305–308.

4. *Бабенко В.П., Битюков В.К.* Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе Electronics Workbench // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 2. С. 199–205. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=radel&y=2019&v=64&n=2&a=RadE11902002Babenko>
5. *Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С.* Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключах // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 1. С. 20–39. <https://www.rti-mirea.ru/jour/article/view/98>
6. *Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П.* Источники вторичного электропитания. 4-е изд., перераб. и доп. Вологда: Инфра-Инженерия. 2020. 376 с.
7. *Бабенко В.П., Битюков В.К.* Энергетические и шумовые характеристики конверторного преобразователя SEPIC/СUCK с биполярным выходом // Микроэлектроника. 2021. Т. 50. № 5. С. 394–400.
8. *Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С.* Понижающе-повышающий DC/DC преобразователь с единственной индуктивностью // Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 1. С. 60–70.
9. Basics of Ideal Diodes. Application Note // Texas Instruments. SLVAE57B. October, 2021. <https://www.ti.com/lit/an/slvae57b/slvae57b.pdf?ts=1639001451460>
10. *Ratoka M.* Fundamentals of power system ORing // Texas Instruments. March 21, 2007. <https://www.edn.com/FUNDAMENTALS-OF-POWER-SYSTEM-ORING/>
11. *Camilo Quintáns Graña, Jorge Marcos Acevedo.* Замена выпрямительного диода MOSFET транзистором снижает потери в источнике питания // РадиоЛоцман. Июнь 2011. С. 42–43. <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=105520>
12. *Martin Tomasz.* ОУ без внешнего источника питания превращает MOSFET транзистор в выпрямитель с малыми токами утечки // РадиоЛоцман. Октябрь 2011. <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=112905>
13. *Jiří Chytil.* Practical realization of ideal diode full-wave rectifiers // Informatyka Automatyka Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. December 2014. № 4(4). P. 81–84. https://www.researchgate.net/publication/287865323_PRACTICAL_REALIZATION_OF_IDEAL_DIODE_FULL-WAVE_RECTIFIERS
14. Brad Peeters. Rectifier bridge with no 2V_F drop // Theta Engineering. <http://www.thetaeng.com/designIdeas/FETBridge.html>
15. Crutschow. A simple and inexpensive ideal-diode MOSFET circuit // Power Electronic Tips. September 26, 2017. <https://www.powerelectronicstips.com/inexpensive-ideal-diode-mosfet-circuit/>
16. Создан идеальный диод // LiveJournal. 2017-09-20. <https://stone-guest.livejournal.com/46078.html>
17. LM74610-Q1 0.48-V to 42-V, zero IQ automotive ideal diode controller. <https://www.ti.com/product/LM74610-Q1>
18. Steev Buch. Active diodes for bridge rectifiers cut that pesky 0.6V drop // Electronics Weekly. 24 марта 2021. <https://www.electronicweekly.com/news/products/analog/active-diodes-bridge-rectifiers-cut-pesky-0-6v-drop-2021-03/>
19. Datasheet Ideal Diode Bridge Controller LT4320/LT4320-1. <https://www.farnell.com/datasheets/1780637.pdf>
20. PD70224 Datasheet IdealBridge™ Dual MOSFET-based Bridge Rectifier August 2019. https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/131677-pd70224-datasheet
21. *Давиде Джакомини, Луиджи Чине.* Высокоэффективный подход к построению входных диодных мостов // РадиоЛоцман. 22-10-2009. № 10. С. 22–25. <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=61045>
22. *Бабенко В.П., Битюков В.К.* Топология безындуктивных DC/DC преобразователей с гальваническим разделением цепей // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 2. С. 66–77.
23. *Бабенко В.П., Битюков В.К.* Энергетические и шумовые характеристики повышающе-понижающего преобразователя SEPIC с униполярным и биполярным выходом // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 4. С. 9–19.