

# Микросхемы импульсных понижающих стабилизаторов. Эволюция схемотехники

Если еще совсем недавно разработка вторичного источника электропитания с импульсным преобразованием считалась чем-то вроде шаманства, которым занимались специалисты с большим опытом работы в этой области, то с бурным расширением номенклатуры микросхем импульсных преобразователей зачастую уже не требуется углубленных знаний в этой специфической области схемотехники. Производители микросхем в справочных данных и руководствах по применению предлагают различные проверенные варианты схемотехники, вплоть до указания конкретных типов пассивных компонентов и их производителей. И, тем не менее, существует непростая задача выбора оптимальной для конкретного проекта микросхемы преобразователя из огромной номенклатуры, предлагаемой производителями. Характеристики и функциональные возможности разрабатываемого источника питания не в последнюю очередь зависят от схемотехники и методов регулирования, использованных в выбранной микросхеме импульсного преобразователя.

Михаил ПУШКАРЕВ  
pmm@midaus.com

Рассмотрим схемотехнику и функциональные возможности микросхем понижающих импульсных стабилизаторов в их развитии.

Схема импульсного понижающего стабилизатора напряжения изображена на рис. 1. Детальное рассмотрение процесса работы стабилизатора можно найти в специальной литературе, например в [1]. Напомним только, что без учета потерь в элементах схемы выходное напряжение определяется следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = t_{\text{он}}/T \times U_{\text{вх}}$$

где  $t_{\text{он}}$  — время открытого состояния ключа,  $T$  — период следования импульсов.

Это позволяет путем изменения соотношения времени открытого состояния ключа и периода следования импульсов регулировать выходное напряжение, а при наличии

цепи отрицательной обратной связи и стабилизировать его.

В качестве ключа VT используются как биполярные, так и полевые транзисторы, а вместо диода VD в стабилизаторах с синхронным выпрямлением применяется полевой транзистор.

Первой реализацией импульсного понижающего стабилизатора напряжения был релейный (гистерезисный) импульсный преобразователь, имеющий очень простое схемотехническое решение.

Если для большинства схем импульсных преобразователей практически неизбежно наличие пульсаций выходного напряжения, то для релейного преобразователя наличие пульсаций, приведенных к входу обратной связи, равных напряжению гистерезиса компаратора, — обязательное условие нормальной работы.

Упрощенная схема релейного преобразователя показана на рис. 2. Характерная и «ма-

лоприятная» особенность схемы — зависимость частоты преобразования от параметров элементов схемы и режима работы стабилизатора:

$$f = (U_{\text{вых}} \times (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \times R_C) / (U_{\text{вх}} \times L \times U_{\text{гис}})$$

Как следует из вышеприведенной формулы, частота зависит от входного и выходного напряжений, эквивалентного последовательного сопротивления выходного конденсатора, индуктивности дросселя и напряжения гистерезиса компаратора. Изменение частоты в широких пределах не позволяет оптимизировать по габаритам дроссель и выходной конденсатор, усложняет борьбу с излучаемыми помехами.

На рис. 3 изображена практическая схема релейного преобразователя, в которую входит микросхема линейного стабилизатора

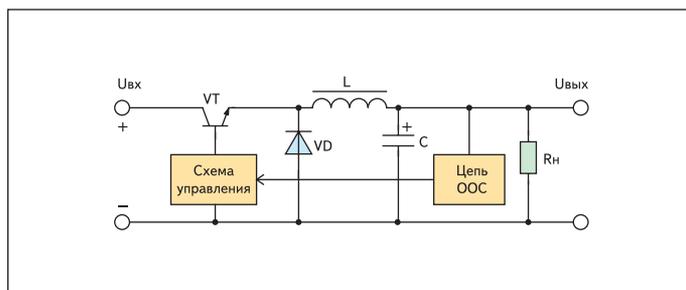


Рис. 1. Структурная схема импульсного понижающего стабилизатора напряжения

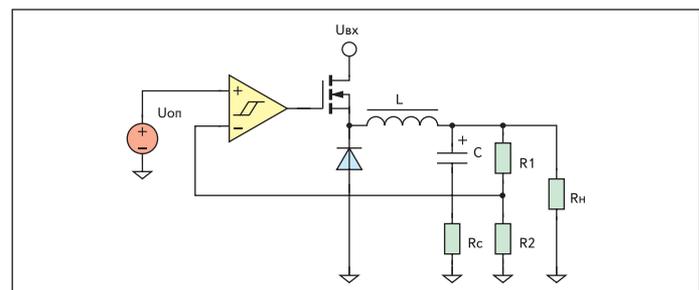


Рис. 2. Упрощенная схема релейного стабилизатора

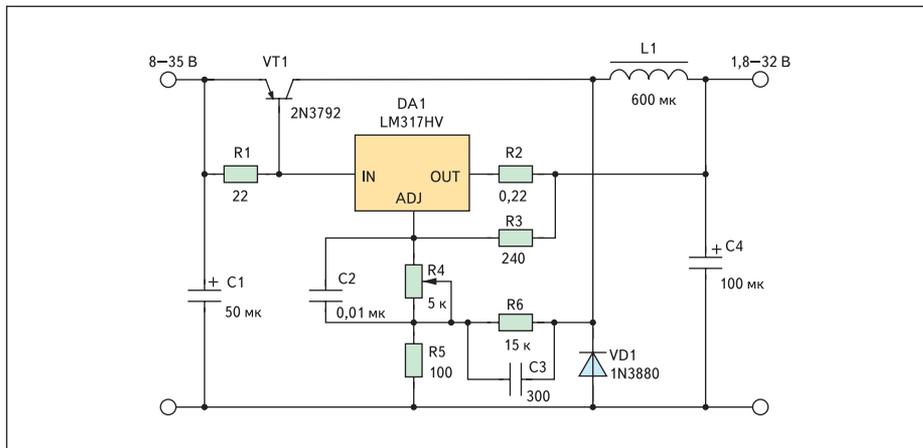


Рис. 3. Практическая схема релейного стабилизатора

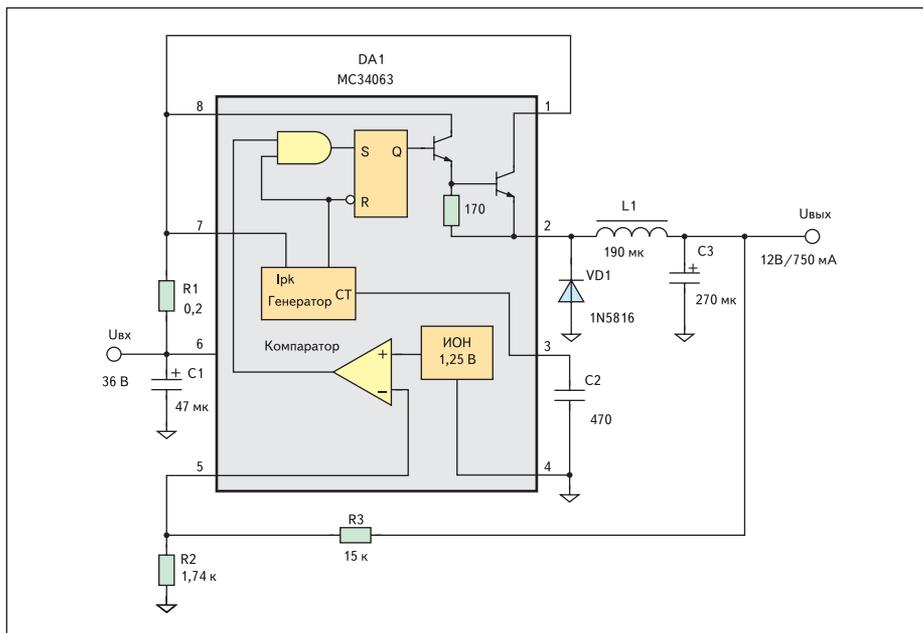


Рис. 4. Релейный стабилизатор на MC34063

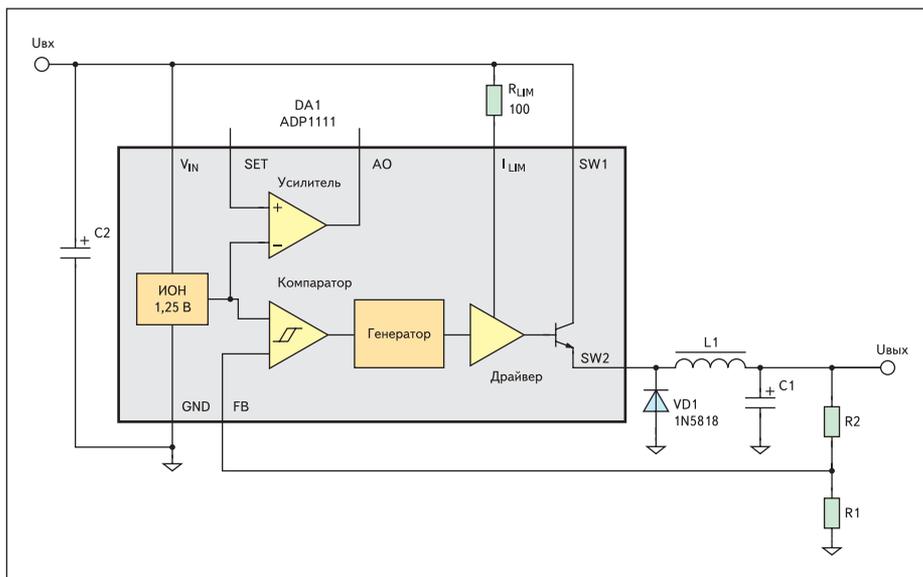


Рис. 5. Релейный стабилизатор на ADP1111

LM317. Такое решение — использование недорогих интегральных схем линейных стабилизаторов — применялось на первых порах при отсутствии специализированных микросхем импульсных стабилизаторов.

Хотя в настоящее время релейный способ регулирования в чистом виде практически не применяется, такие несомненные его достоинства, как малое время переходного процесса и отсутствие элементов коррекции частотной характеристики в цепи обратной связи, заставляют разработчиков искать новые конструктивные решения с его использованием.

На рис. 4 изображена схема стабилизатора с популярной микросхемой MC34063 фирмы Motorola. Частота собственных колебаний генератора задается емкостью конденсатора C2, частота вынужденных колебаний генератора выше и зависит от максимального тока ключа, устанавливаемого резистором ограничения тока R1. Поскольку скоростью нарастания тока в индуктивности зависит от разности входного и выходного напряжений, частота преобразования увеличивается с ростом входного напряжения. Когда напряжение на выводе обратной связи 5 становится равным опорному напряжению, компаратор через логический элемент и триггер запрещает управление выходным ключом на один или несколько периодов частоты генератора. Таким образом, стабилизатор работает в режиме генерации пакетов импульсов. Коэффициент полезного действия стабилизатора не превышает 70%, основные потери — из-за большого падения напряжения на составном транзисторе ключа и резисторе ограничения тока.

Обновленная версия MC34063 — микросхема NCP3063 фирмы ON Semiconductor — имеет более совершенную схему ограничения максимального тока ключа, работающую только в переходных и аварийных режимах, и дополнена температурной защитой.

Температурная защита, предусматриваемая во многих современных микросхемах, предназначенных для силовой электроники, переводит мощные выходные каскады в выключенное состояние при незначительном превышении температуры кристалла относительно максимально допустимой. Тем самым существенно повышается эксплуатационная надежность аппаратуры.

В микросхеме ADP1111 (схема, в состав которой она включена, показана на рис. 5) частота генератора фиксирована и равна 72 кГц. Регулирование выходного напряжения обеспечивается остановкой генератора по достижении выходным напряжением номинального значения, то есть, как и в предыдущей схеме, стабилизатор работает в режиме генерации пакетов импульсов. При остановленном генераторе собственное потребление микросхемы составляет всего 300 мкА, что делает работу схемы весьма эффективной. Дополнительный усилитель предназначен

для построения схем детектора напряжения, усилителя ошибки, либо дополнительного линейного стабилизатора. Версии микросхем с фиксированным выходным напряжением имеют встроенный делитель в цепи отрицательной обратной связи. У микросхем есть встроенная защита по току ключа с возможностью уменьшения тока срабатывания защиты внешним резистором  $R_{LIM}$ , чем обеспечивается регулировка максимального выходного тока стабилизатора.

Ограничение максимального выходного тока стабилизатора установкой пользователем максимального тока ключа допускает ограниченную номенклатура микросхем. При необходимости можно воспользоваться техническим решением с применением микросхемы — измерителя тока, предлагаемым в [2].

Используя современные конденсаторы на выходе стабилизатора, пульсации на частоте работы генератора можно сделать весьма малыми. Пульсации же, вызванные прекращением работы выходного ключа, не могут быть меньше гистерезиса компаратора, типовое значение которого равно 2 мВ для MC34063 и 8 мВ для ADP1111, умноженного на отношение выходного напряжения к опорному напряжению.

Модифицированный релейный метод управления используется в одном из последних семейств от National Semiconductor — LM5007, LM5008, LM5010. Схема импульсного стабилизатора на LM5007 показана на рис. 6. В этой схеме время открытого состояния ключа, обратно пропорциональное входному напряжению, устанавливается резистором R1. При выходном токе более 50 мА стабилизатор работает в режиме с непрерывным током дросселя и постоянной частотой переключения, определяемой по формуле:

$$f = U_{\text{вых}} / (1,42 \times 10^{-10} \times R1).$$

Частота преобразования не зависит от входного напряжения и нагрузки.

При низком выходном токе преобразователь работает в режиме прерывистого тока дросселя и на пониженных частотах, что позволяет минимизировать потери. Рабочая частота в этом режиме определяется выражением:

$$f = (U_{\text{вых}}^2 \times L) / (1 \times 10^{-20} \times R_H \times R1^2).$$

Чтобы гарантированно обеспечить нормальную работу стабилизатора с современными конденсаторами, имеющими, как правило, низкие значения эквивалентного последовательного сопротивления, последовательно с конденсатором C2 включают резистор R6. Пульсации выходного напряжения велики, поскольку для работы стабилизатора рекомендуется напряжение пульсации на выводе обратной связи в пределах 25÷50 мВ. При необходимости более низкого уровня пульсации выходного напряжения нагрузку можно подключать параллельно конденсатору C2, либо потребуются включение на выходе стабилизатора дополнительного LC-фильтра, не охваченного цепью отрицательной обратной связи.

Для питания затвора *n*-канального МОП-транзистора использована схема «зарядового насоса». Конденсатор C4, подключенный к выводу BST, на этапе закрытого состояния ключа заряжается через встроенный диод. На этапе открытого состояния ключа напряжение на конденсаторе суммируется с входным напряжением, что и обеспечивает большее напряжение на затворе транзистора, чем на его стоке.

Как видно из функциональной схемы LM5007, микросхема существенно сложнее рассмотренных выше, и включает в себя узлы, повышающие надежность работы. Защита от пониженного входного напряжения предотвращает отпирание выходного транзистора при входном напряжении менее 6,3 В, когда схема управления уже не способна к адекватным действиям. Тем самым предотвращается выход микросхемы из строя в аварийной ситуации. Защита от повышения выходного напряжения немедленно запирает выходной ключ, если напряжение на выводе FB превысит порог в 2,875 В при внезапном увеличении входного напряжения или отключении нагрузки. Схема ограничения тока устанавливает максимальный ток ключа на уровне 0,725 А и, кроме того, регулирует время открытого состояния ключа, устанавливаемое резистором R2, при включении и перегрузке. При замыкании вывода SD/Ron на «землю» стабилизатор можно выключить, при этом ток, потребляемый от источника питания, равен сумме тока собственного потребления микросхемы 100 мкА и тока через резистор R1.

Более высокие качественные характеристики преобразования обеспечивает техника ШИМ-регулирования, используемая в подавляющем большинстве микросхем понижающих стабилизаторов. Частота преобразования, как правило, постоянна, что позволяет оптимизировать параметры дросселя и конденсатора выходного фильтра и упрощает задачу фильтрации помех на частоте преобразования. Величина пульсаций выходного напряжения существенно меньше, чем в релейных стабилизаторах, но реакция на скачкообразное изменение нагрузки или входного напряжения заметно хуже. Для обеспечения устойчивости обязательна частотная коррекция в цепи отрицательной обратной связи.

Рис. 7 поясняет принцип ШИМ-регулирования с управлением по напряжению. Выходное напряжение или его часть поступает на вход усилителя ошибки, другой вход которого подключен к источнику опорного напряжения  $V_{ref}$ . Усиленная разность напряжений подается на вход ШИМ-компаратора, на дру-

Рис. 7 поясняет принцип ШИМ-регулирования с управлением по напряжению. Выходное напряжение или его часть поступает на вход усилителя ошибки, другой вход которого подключен к источнику опорного напряжения  $V_{ref}$ . Усиленная разность напряжений подается на вход ШИМ-компаратора, на дру-

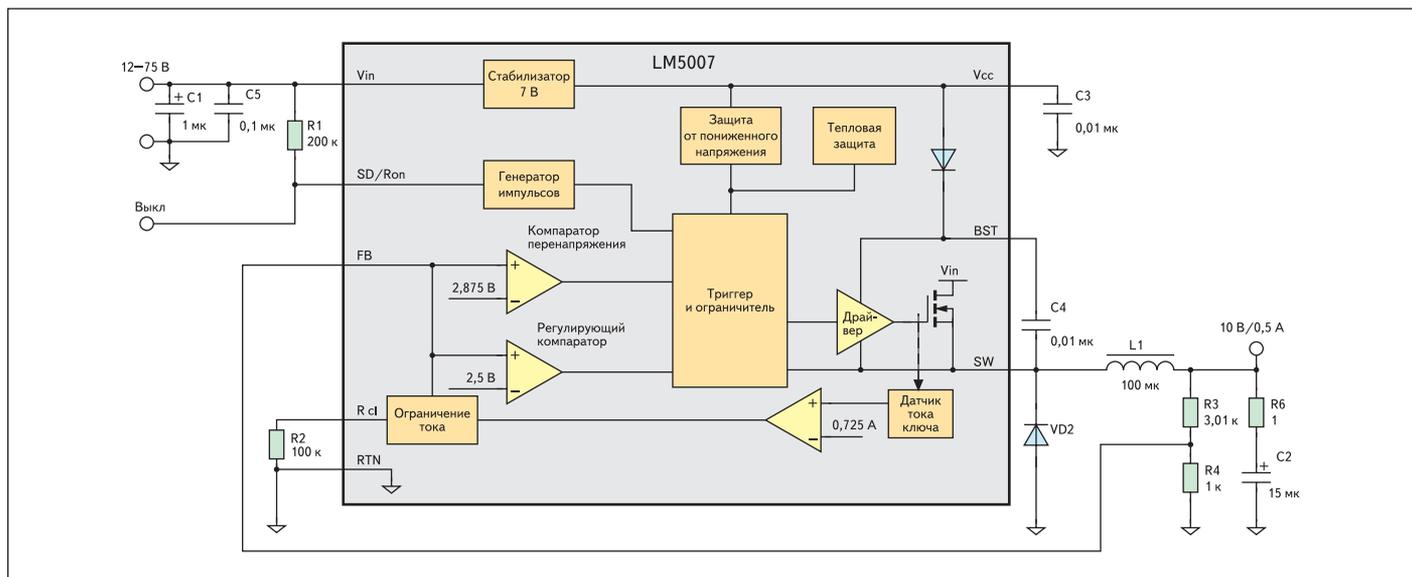


Рис. 6. Релейный стабилизатор на LM5007

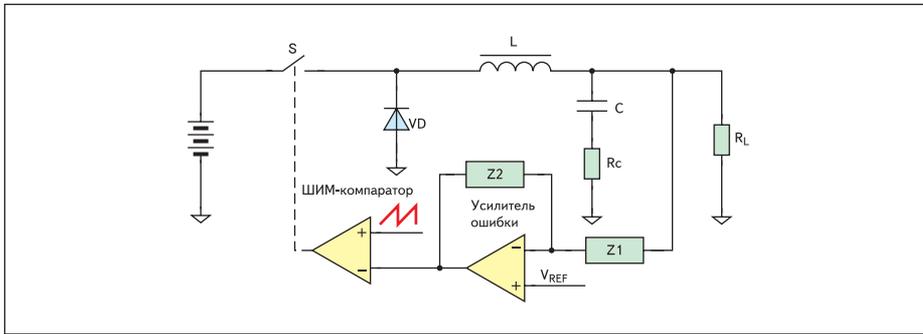


Рис. 7. Структурная схема ШИМ-стабилизатора с управлением по напряжению

гой вход которого поступает пилообразное напряжение с частотой задающего генератора. Сравнивая эти два напряжения, компаратор модулирует длительность импульсов, управляющих ключом S. Цепи частотной коррекции условно показаны в виде комплексных сопротивлений Z1 и Z2.

Практическая схема ШИМ-стабилизатора с применением микросхемы TPS5430 из серии Swift™ от Texas Instruments показана на рис. 8. Благодаря высокой частоте задающего генератора — 500 кГц, корректирующие конденсаторы имеют небольшие номиналы, и элементы частотной коррекции интегрированы в микросхему. Использована наиболее сложная из применяемых частотная коррекция типа 3, подробнее о которой можно узнать из публикации [3], посвященной частотной коррекции импульсных стабилизаторов.

На рис. 9 схема изображена с керамическим выходным конденсатором C3. При использовании электролитических конденсаторов элементы коррекции C4, C6, C7, R3 не нужны, достаточно внутренней коррекции.

Микросхема включает в себя схему формирования повышенного напряжения питания драйвера *n*-канального МОП-транзистора, защиту от пониженного входного напряжения, защиту от повышенного выходного напряжения и тепловую защиту. В качестве датчика тока в схеме ограничения максимального тока ключа используется сопротивление канала открытого МОП-транзистора. При достижении током стока порогового значения ключ выключается до конца текущего периода тактовой частоты. В случае серьезной перегрузки, например, при коротком замыкании на выходе, по сигналу

HISSUP источник опорного напряжения закорачивается на «землю» на 10–20 мс с последующим плавным пуском стабилизатора и повторением цикла до устранения перегрузки. Схема плавного пуска обеспечивает линейное нарастание напряжения на входе усилителя ошибки от нуля до величины опорного напряжения за 8 мс. При замыкании вывода ENA на «землю» стабилизатор можно выключить, при этом потребляемый ток не превышает 50 мкА.

Изменение амплитуды пилообразного напряжения обратно пропорционально изменению входного напряжения, что обеспечивает лучшую стабильность и меньшее время реакции на возмущение в виде изменения входного напряжения.

На рис. 9 изображена схема стабилизатора на микросхеме NCV8842 фирмы ON Semiconductor, в которой использована патентованная технология V<sup>2</sup> управления.

Обычная, относительно медленная, отрицательная обратная связь через усилитель ошибки обеспечивает высокую точность поддержания выходного напряжения в статическом режиме. Частотную коррекцию обеспечивает фильтр нижних частот, образованный большим выходным сопротивлением усилителя ошибки, около 8 МОм, и внешним конденсатором C4. Отсутствие усилителя в цепи быстрой отрицательной обратной связи обеспечивает ей широкую полосу пропускания, что существенно улучшает динамические характеристики стабилизатора.

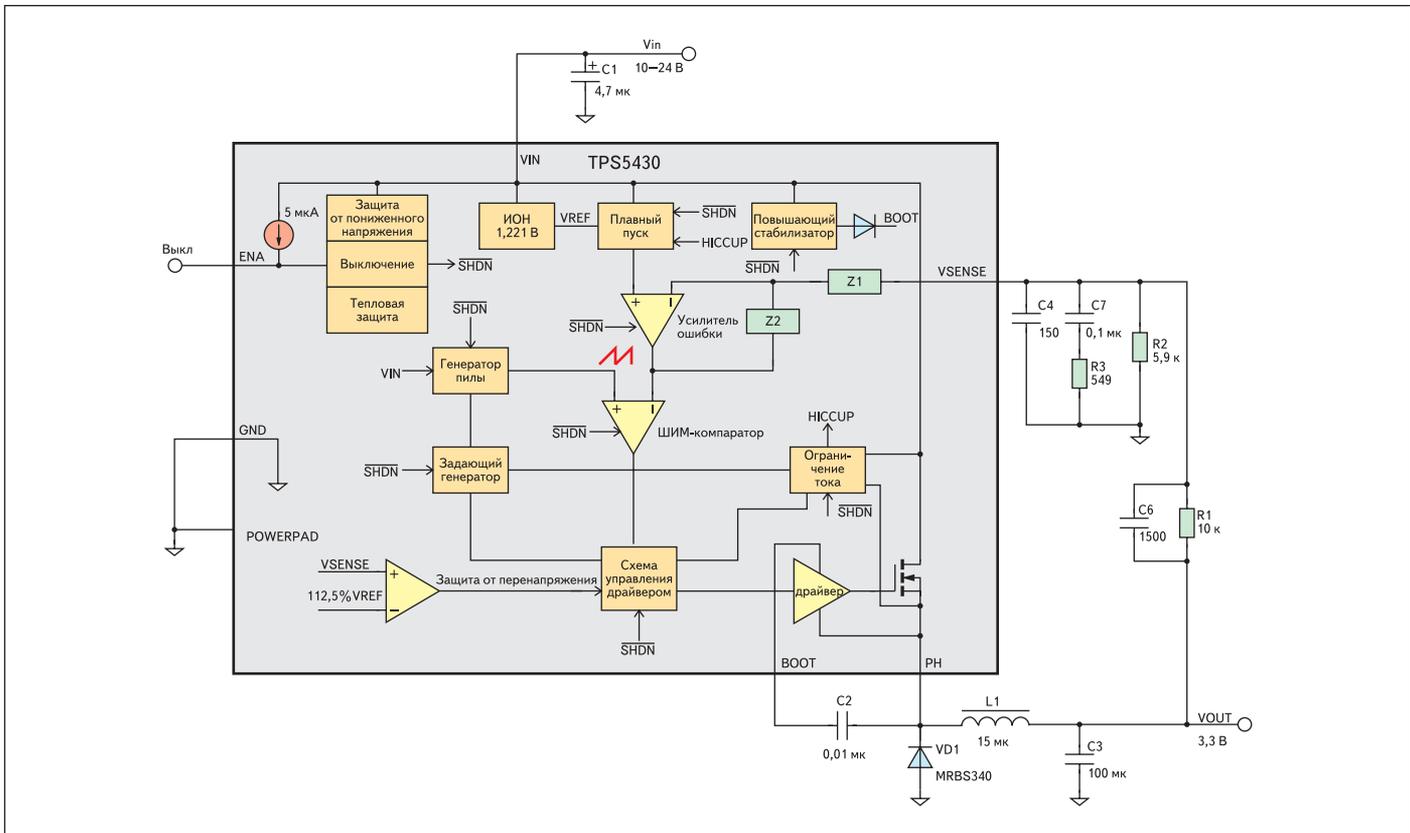


Рис. 8. ШИМ-стабилизатор на TPS5430

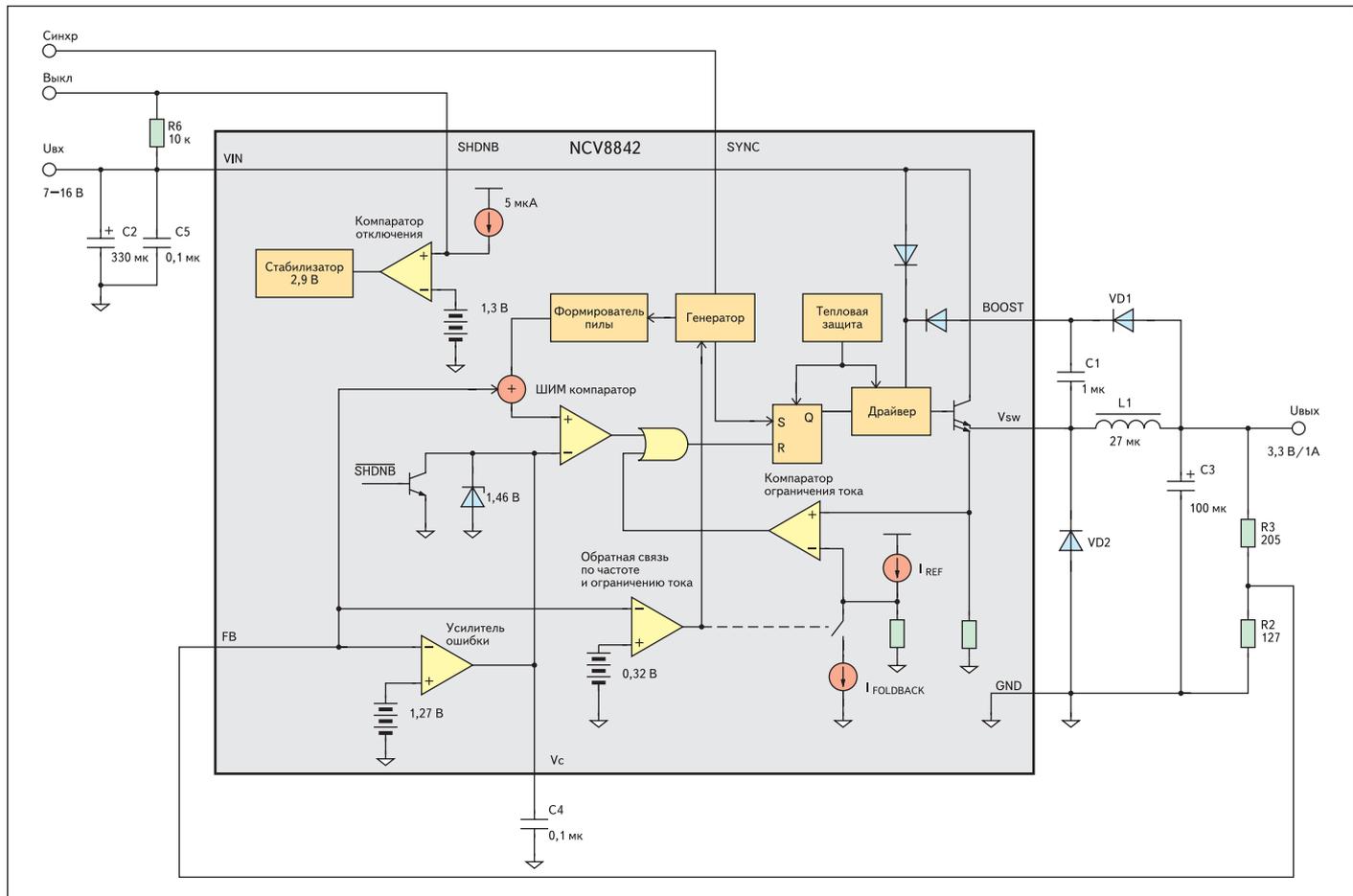


Рис. 9. ШИМ-стабилизатор на NCV8842

Драйвер биполярного транзистора-ключа питается повышенным напряжением, что позволяет поддерживать транзистор при открытом состоянии выходного ключа в насыщении. Ключевой транзистор двухэмиттерный, ко второму эмиттеру меньшей площади подключен резистор — датчик тока.

Частота преобразования фиксирована и равна 170 кГц. При помощи импульсов внешней синхронизации, подаваемых на вывод SYNC, можно повысить частоту преобразования до 355 кГц и синхронизировать работу нескольких микросхем в устройстве. При этом можно организовать работу двух

или более стабилизаторов со сдвигом фазы для уменьшения импульсного тока через конденсатор на входе стабилизатора, что снижает требования к конденсатору и упрощает его выбор.

Особенность микросхемы — в уменьшении тактовой частоты генератора до четверти от номинального значения, с одновременным уменьшением порога срабатывания защиты по току до 40% от номинального значения, пока напряжение обратной связи не достигнет порога срабатывания в цепи обратной связи по частоте, что обеспечивает уменьшение рассеиваемой мощности в ми-

кросхеме и внешних компонентах во время включения и при перегрузках.

Более совершенные динамические характеристики по сравнению со стабилизаторами с управлением по напряжению имеют ШИМ-стабилизаторы с управлением по току, обладающие к тому же лучшей устойчивостью. В дополнение к отрицательной обратной связи по напряжению их схема включает в себя быстродействующую цепь обратной связи по току, как показано на рис. 10. Сигнал обратной связи по току поступает с датчика тока ключа, выделяется на токоизмерительном резисторе  $R_i$  и суммируется с сигналом обратной связи по напряжению.

Практическая схема стабилизатора с управлением по току на микросхеме SC4518H фирмы Semtech изображена на рис. 11. Частота преобразования фиксированная — 600 кГц, в режиме с внешней синхронизацией — до 1,2 МГц.

Сигнал обратной связи по току снимается с датчика тока, резистора 0,04 Ом, включенного в коллектор ключевого транзистора. Падение напряжения на токоизмерительном резисторе увеличивается услителем тока, суммируется с пилообразным напряжением, формируемым задающим генератором, и поступает на вход ШИМ-компаратора, становясь опорным сигналом для сигнала обрат-

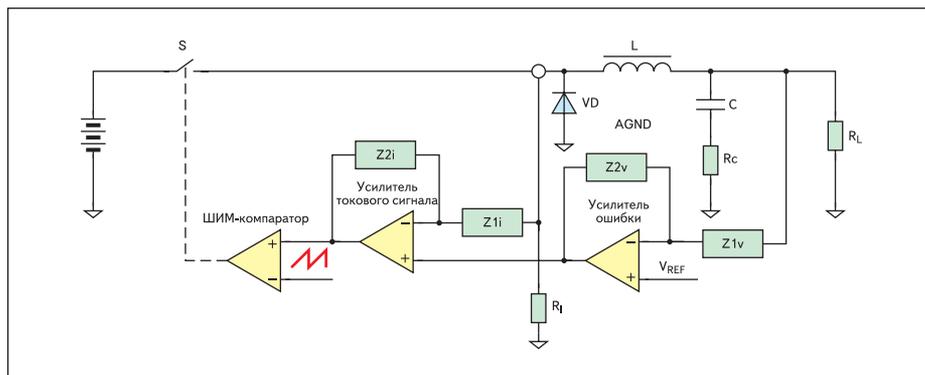


Рис. 10. Структурная схема ШИМ-стабилизатора с управлением по току

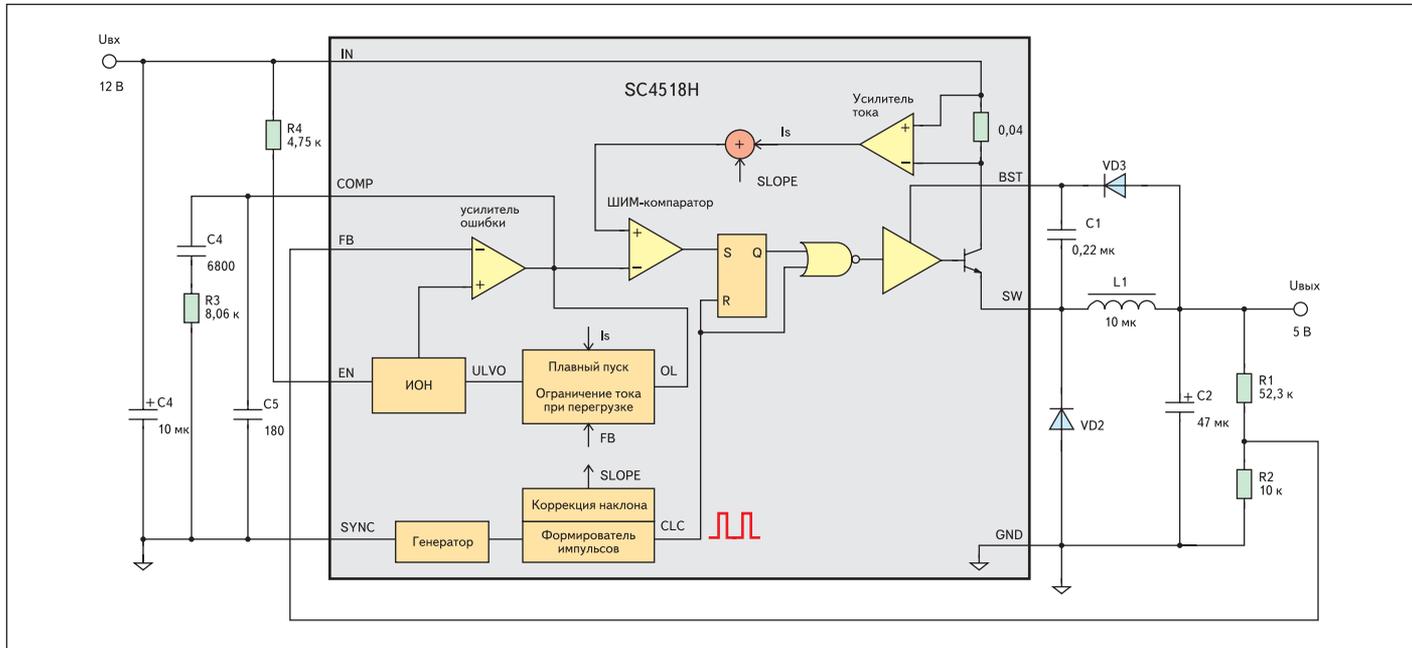


Рис. 11. Стабилизатор с управлением по току на SC4518H

ной связи по напряжению, поступающего с выхода усилителя ошибки. Сигнал с усилителя тока поступает также в схему ограничения тока при перегрузке.

Устойчивость стабилизатора обеспечивается внешними элементами коррекции R3, C4, C5. Схема коррекции наклона пилообразного напряжения устраняет возможность самовозбуждения стабилизатора на субгармониках при коэффициенте заполнения более 50%, к чему склонны стабилизаторы с обратной связью по току. Подробнее о сути явления и способе его устранения — в [4].

Максимальный ток ключа ограничен схемой защиты от перегрузки по току на уровне 2 А. При длительной перегрузке или коротком замыкании на выходе предпринимаются периодические попытки плавного пуска.

В микросхеме LM25005 использовано так называемое «кваситокое» управление. Как видно из функциональной схемы LM25005 на рис. 12, сигнал обратной связи по току снимается с резистора, включенного последовательно с диодом VD1. Микросхема имеет широкий диапазон входного напряжения — 7–42 В и оптимизирована для применений

с высоким входным напряжением. При большом отношении входного напряжения к выходному коэффициент заполнения становится очень мал, и неизбежные из-за наличия паразитных элементов в схеме искажения формы тока ключа на датчике тока ухудшают характеристики регулирования. Напротив, длительность импульса тока через диод в таком случае составляет значительную часть периода, и искажения на фронтах импульса сказываются в меньшей степени. Схема выборки и хранения формирует на выходе постоянное напряжение, пропорциональное

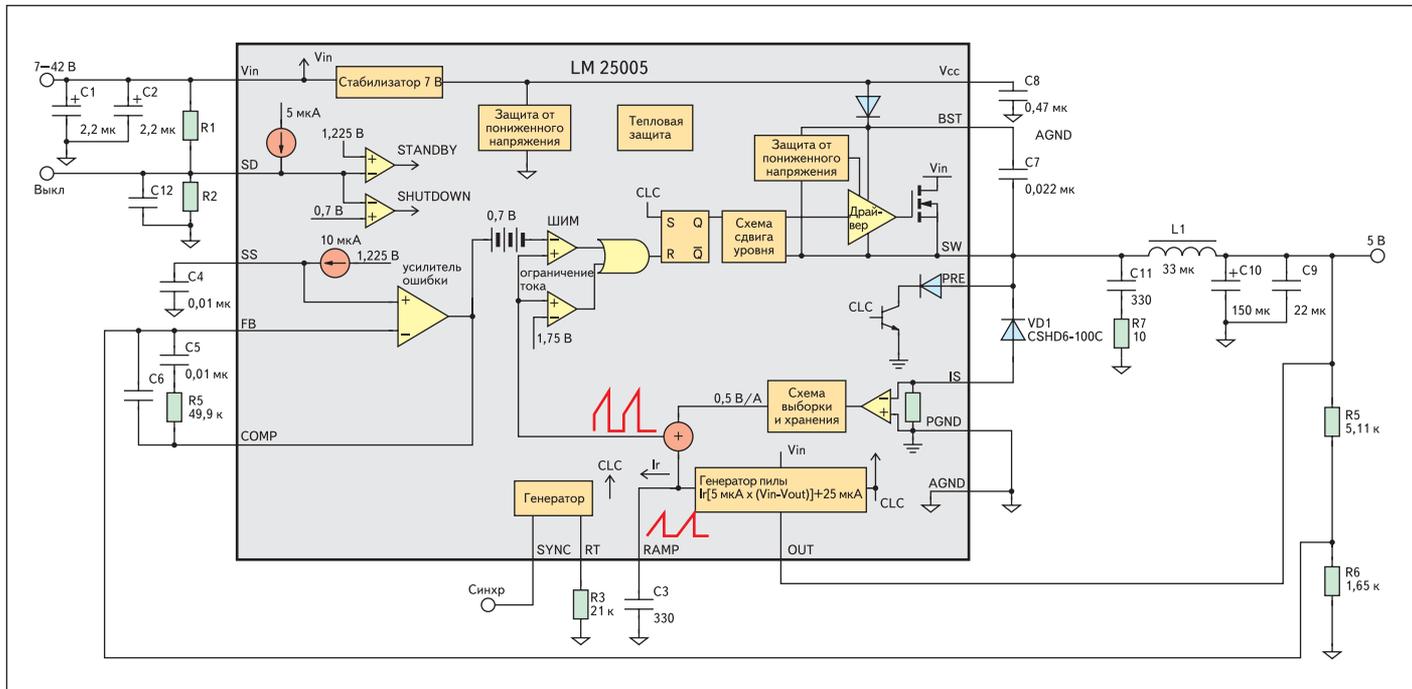


Рис. 12. Стабилизатор с управлением по току на LM25005

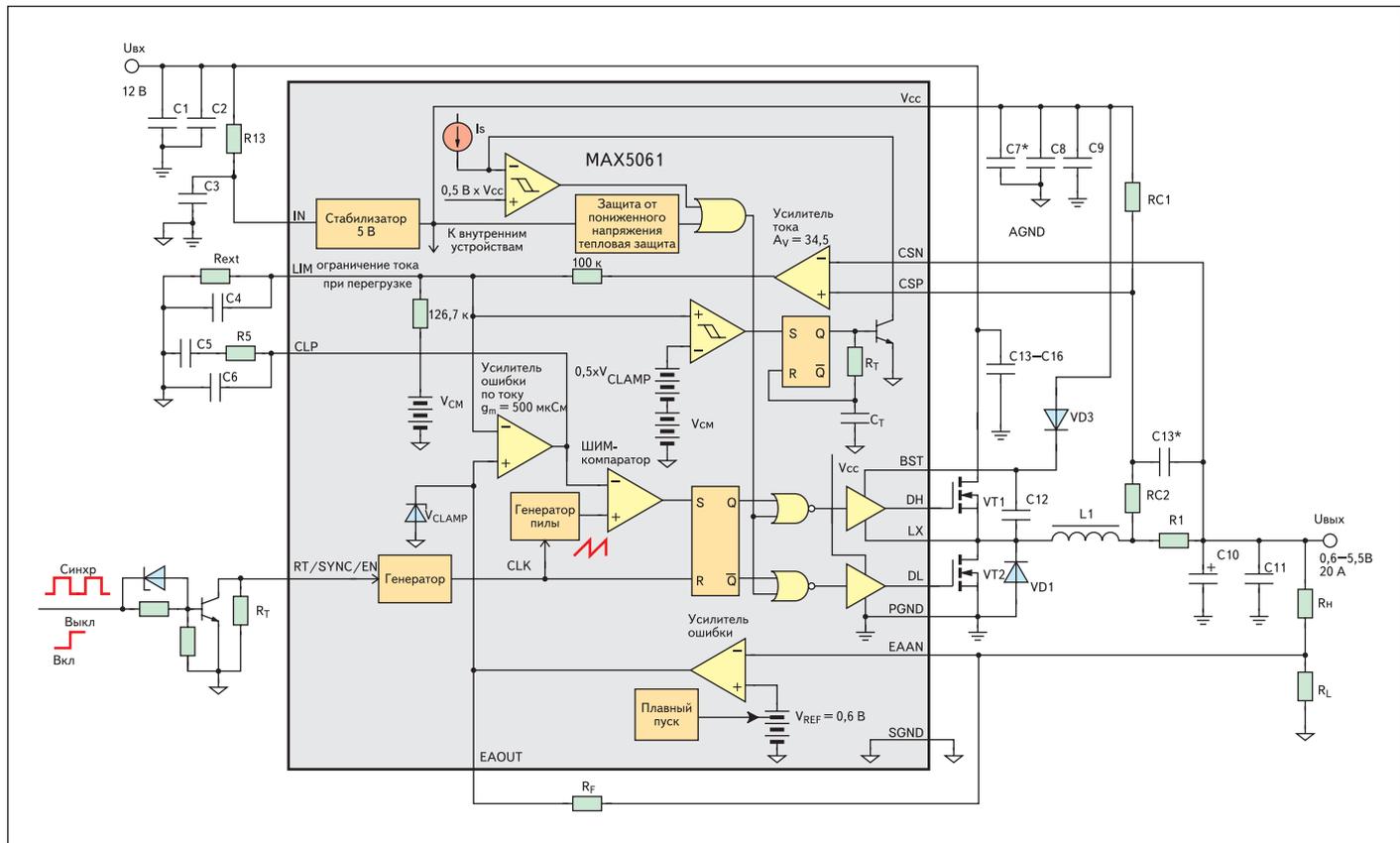


Рис. 13. Стабилизатор с управлением по среднему току на MAX5061

амплитуде тока через токоизмерительный резистор, а в сумматоре восстанавливается пилообразная составляющая. Ток, заряжающий конденсатор C3, на котором формируется пилообразный сигнал, зависит от входного и выходного напряжений, а для устранения колебаний на субгармониках в зарядном токе присутствует постоянная составляющая, корректирующая наклон «пилы».

Уникальна схема контроля тока ключа и защиты от перегрузки. При корректной работе восстановленный сигнал пропорционален току ключа и, если его амплитуда превышает порог компаратора ограничения тока (1,75 В), ключ немедленно запирается. При малой индуктивности дросселя или высоком входном напряжении ток через ключ может превысить допустимую величину из-за задержки распространения в компараторе. При подобной перегрузке схема выборки/хранения детектирует чрезмерное значение тока на этапе открытого состояния ключа, ключ запирается, и пропускается несколько импульсов, пока напряжение на выходе сумматора не станет меньше 1,75 В.

Еще одна особенность микросхемы — в гарантированной зарядке конденсатора вольтодобавки C7 при малой нагрузке через ключ, подключенный к выводу PRE, открывающийся на 250 нс в каждом цикле на этапе закрытого состояния выходного ключа.

Частота задающего генератора устанавливается резистором R3 в пределах 50–500 кГц,

подачей синхронизирующих импульсов на вывод SYNC генератор можно заставить работать на частоте более высокой, чем частота собственных колебаний.

Плавный пуск обеспечивается зарядкой до опорного напряжения конденсатора C4, подключенного к выводу SS, а в итоге — к неинвертирующему входу усилителя ошибки, при постоянном токе 10 мкА. Изменяя емкость конденсатора, можно изменить время задержки выхода стабилизатора в номинальный режим.

На рис. 13 показана схема стабилизатора с синхронным выпрямлением и управлением по среднему току дросселя с применением микросхемы контроллера MAX5061 фирмы Maxim. Управление по среднему току дросселя свободно от проблем, связанных с усилением коротких импульсов тока, маскированием помех на их фронтах, задержками распространения сигнала, присущих методу управления по максимальному току ключа.

Поскольку стабилизатор рассчитан на большой выходной ток, мощные выходные транзисторы — внешние. Энергия передается в нагрузку и запасается в индуктивности, когда открыт транзистор верхнего плеча. В это время транзистор нижнего плеча закрыт. И, наоборот, при открытом транзисторе нижнего плеча, транзистор верхнего плеча закрыт, а энергия, запасенная в индуктивности, ретранслируется в нагрузку. Схемы с синхронным выпрямлением особенно эф-

фективны при низких выходных напряжениях. Потери в транзисторе нижнего плеча многократно меньше, чем в диоде, который он заменяет.

Цепь обратной связи по току состоит из резистора датчика тока R1, включенного последовательно с дросселем, прецизионного дифференциального усилителя тока, усилителя ошибки по току и ШИМ-компаратора. Выходное напряжение усилителя ошибки по току представляет собой усиленную разность между выходным напряжением усилителя ошибки по напряжению и усилителя тока. Этим обеспечивается регулировка тока дросселя в соответствии с выходным напряжением. Частотная характеристика усилителя ошибки по току имеет спад на высоких частотах, что ослабляет влияние шумов и помех в сигнале с датчика тока. Внешние элементы коррекции частотной характеристики, требующие тщательного расчета, подключены к выводу CLP, соединенному с выходом усилителя ошибки по току.

Плавный пуск организован подачей линейно нарастающего напряжения 0–0,7 В с 5-разрядного ЦАП на третий (неинвертирующий) вход усилителя ошибки по напряжению. Пока напряжение на выходе ЦАП меньше опорного напряжения 0,6 В, схема работает под управлением ЦАП, далее переходит в режим работы с опорным напряжением.

Частота преобразования устанавливается в пределах от 125 кГц до 1,5 МГц внешним

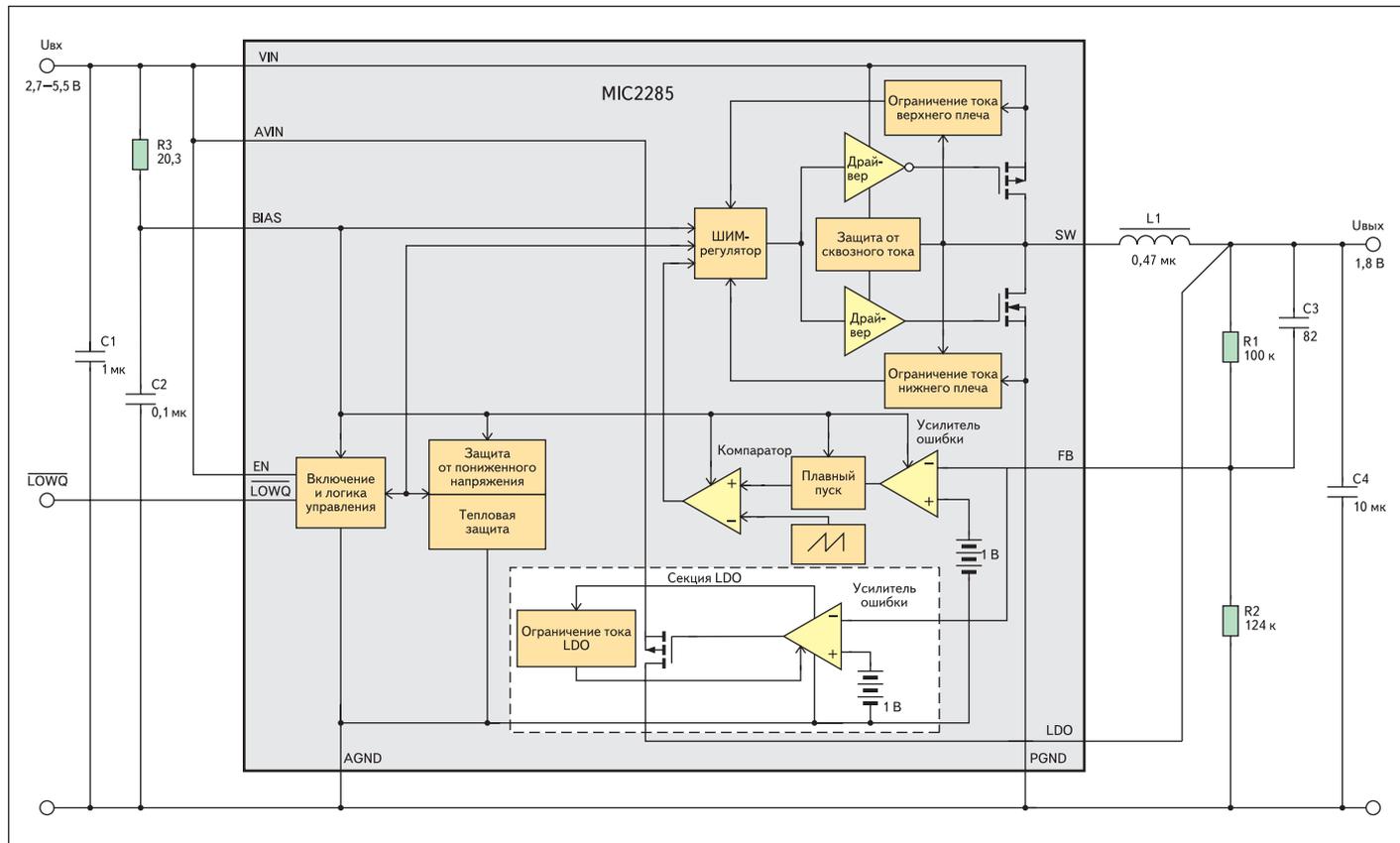


Рис. 14. Стабилизатор с синхронным выпрямлением на MIC2285

резистором  $R_T$ , подключенным к многофункциональному выводу RT/SYNC/EN. Соответствующими сигналами, подаваемыми на этот вывод, стабилизатор можно синхронизировать от внешнего генератора или выключить.

При максимально допустимом входном напряжении 27 В выходное напряжение не может превышать 5,5 В, максимального входного синфазного напряжения усилителя тока, ограниченного напряжением встроенного стабилизатора, питающего все узлы микросхемы.

Еще один пример стабилизатора с синхронным выпрямлением с использованием микросхемы MIC2285 фирмы Micrel, работающей с частотой преобразования 8 МГц, изображен на рис. 14. Коэффициент полезного действия конкретной схемы стабилизатора достигает 90%. Транзистор верхнего плеча  $p$ -канальный, соответственно отсутствует схема вольтодобавки для питания его драйвера.

При выходном токе, не превышающем 60 мА, при подаче высокого логического уровня на вывод  $\overline{LOWQ}$  схему можно перевести в режим LDO-стабилизатора, что позволит уменьшить собственное потребление схемы и снизить уровень шумов в выходном напряжении.

Похожими возможностями обладает микросхема NCP1500, которая работает в качестве понижающего стабилизатора с синхронным выпрямлением при наличии импульсов синхронизации, автоматически переключа-

ясь в режим с пропусками импульсов при малой нагрузке, а при отсутствии импульсов синхронизации схема переключается в режим линейного LDO-стабилизатора.

Микросхемы импульсных преобразователей, предназначенные для применения в компьютерах и портативной аппаратуре, имеют сложные функциональные схемы, включают в себя по несколько каналов импульсных и линейных стабилизаторов с управляемым по цифровым входам выходным напряжением, определенным порядком их включения и другими дополнительными функциями. Пример подобной микросхемы — MPC18730 от Freescale Semiconductor, управляемая микроконтроллером по трехпроводному интерфейсу и включающая в себя два понижающих импульсных стабилизатора с синхронным выпрямлением, один повышающий импульсный преобразователь и три линейных LDO-стабилизатора.

Производители микросхем стремятся максимально интегрировать в кристалл компоненты и функции стабилизатора, но не все возможно. Мала номенклатура микросхем со встроенным диодом, технология быстросрабатывающих диодов плохо сочетается с технологией интегральных микросхем, да и площадь, занимаемая диодом на кристалле, слишком велика. В их числе одна из первых микросхем импульсного стабилизатора фирмы Motorola —  $\mu A78S40$ , медленный встроенный диод которой сам производитель ре-

комендует заменять внешним быстросрабатывающим, и LT1572 от Linear Technology со встроенным диодом Шоттки (1 А, 20 В). Эзотикой остается и микросхема MIC33050 от Micrel, 0,5-А стабилизатор с интегрированным дросселем, работающий на частоте 4 МГц.

Облегчают выбор подходящей микросхемы интерактивные таблицы, размещенные на сайтах производителей, позволяющие осуществлять сортировку по выбранным параметрам. Бесплатные программы, такие как Webench от National Semiconductor, Swift Designer Tool и SwitcherPro™ от Texas Instruments, LTSpice/SwitcherCAD III от Linear Technology, содержат большое количество примеров схем преобразователей различной конфигурации, позволяют рассчитать параметры внешних компонентов, моделировать схему стабилизатора и наблюдать сигналы в различных цепях схемы.

## Литература

1. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005.
2. Maxim/Dallas. Application Note 478. Current-Limit Circuit for Buck Regulator.
3. A General Approach for Optimizing Dynamic Response for Buck Converter. Application Note AN8143/D, ON Semiconductor.
4. Modelling, Analysis and Compensating of the Current Mode Controller. Application Note U-97, Unitrode. slua101.pdf. Texas Instruments.