

DC/DC-преобразователь и устройство зарядки конденсаторов

с диапазоном входных напряжений 4,75–400 В

В статье представлен компонент LT3751 от Analog Devices, обладающий большим количеством функциональных возможностей, а также рассмотрено несколько схем на его основе.

**Роберт Милликен
(Robert Milliken)**

Питер Лью (Peter Liu)

Перевод: Михаил Русских

tau68@rambler.ru

Введение

Высоковольтные источники питания и устройства зарядки конденсаторов можно найти в различных областях применения, в том числе в профессиональных фотовспышках, системах безопасности, импульсных радиолокационных системах, системах спутниковой связи и детонаторах взрывчатых веществ. LT3751 позволяет разработчикам удовлетворить строгие требования, предъявляемые к этим устройствам, а именно требования по обеспечению высокой надежности, относительно низкой стоимости, безопасной работе, минимизации размеров платы и высоким рабочим характеристикам.

LT3751 представляет собой контроллер обратного преобразователя общего назначения, который можно использовать как стабилизатор напряжения или как устройство зарядки конденсаторов. Контроллер работает в граничном режиме, между режимом непрерывной проводимости и режимом прерывистой проводимости. Работа в граничном режиме позволяет использовать трансформатор относительно небольшого размера, а также в целом сократить площадь печатной платы. Граничный режим также позволяет повысить стабильность высоковольтных сигналов, которые могут возникнуть при использовании режима с управлением по напряжению или методов ШИМ. Стабилизация достигается с помощью двойной переключаемой модуляции, в рамках которой используется как модуляция пикового тока первичной цепи, так и широтно-импульсная модуляция, что значительно снижает слышимый шум трансформатора.

LT3751 имеет ряд функций, обеспечивающих безопасность и надежность работы, в том числе два входа блокировки питания при пониженном напряжении (UVLO), два входа блокировки питания при повышенном напряжении (OVLO), функцию работы без нагрузки (в режиме холостого хода), функцию блокировки питания при повышенной температуре (OTLO), встроенные

стабилитроны на всех высоковольтных линиях, а также схему ограничения напряжения внутреннего драйвера затвора с выбираемыми уровнями 5,6 или 10,5 В (внешние компоненты не требуются). LT3751 также имеет схему защиты при запуске/коротком замыкании, необходимую для обеспечения защиты от повреждений трансформатора или внешнего полевого транзистора. При использовании LT3751 в качестве стабилизатора напряжения его контур обратной связи задействует внутреннюю компенсацию для обеспечения стабильности. LT3751 доступен в двух корпусах: в 20-выводном корпусе QFN и в 20-выводном корпусе TSSOP.

Новый драйвер затвора с внутренним ограничением напряжения не требует внешних компонентов

При использовании драйверов затвора следует учитывать четыре основных параметра: выходной ток управления, пиковое выходное напряжение, потребляемую мощность и задержку распространения. LT3751 имеет в своем составе двухтактный основной драйвер с выходным током 1,5 А. В LT3751 также встроен дополнительный P-канальный МОП-драйвер с выходным током 0,5 А, который используется параллельно с основным драйвером при напряжении питания (V_{CC}) 8 В и ниже. Такой дополнительный драйвер обеспечивает работу компонента в полном диапазоне питания (rail-to-rail). При напряжении выше 8 В дополнительный драйвер должен быть отсоединен путем подключения его стока к V_{CC} .

Большинство дискретных полевых транзисторов имеют предел по напряжению база-исток (V_{GS}), равный 20 В. При подаче напряжения свыше 20 В в оксидном слое внутреннего затвора может произойти короткое замыкание, приводящее к необратимому выходу из строя компонента. Чтобы не допустить этого, в LT3751 предусмотрена встроенная схе-

ма ограничения напряжения драйвера затвора с выбираемыми уровнями 5,6 или 10,5 В. При этом для ее работы не требуется никаких внешних компонентов, даже конденсатора. Просто нужно подключить линию CLAMP к «земле» для работы с уровнем напряжения 10,5 В либо подключить ее к V_{CC} для работы с уровнем напряжения 5,6 В. На рис. 1 показано, как напряжение драйвера затвора ограничивается на уровне 10,5 В при напряжении V_{CC} равном 24 В.

Встроенная схема ограничения напряжения не только защищает полевой транзистор от повреждения, но и сокращает количество энергии, направляемой в затвор. Благодаря этому повышается суммарный КПД и снижается энергопотребление схемы драйвера затвора. Перерегулирование напряжения драйвера затвора в этом случае очень незначительно, как показано на рис. 1. Для еще большего снижения перерегулирования следует размещать полевой транзистор как можно ближе к выводу HVGATE микросхемы LT3751.

Высоковольтное изолированное устройство зарядки конденсаторов с диапазоном входного напряжения 10–24 В

LT3751 может быть настроен для работы в качестве полностью изолированного устройства зарядки конденсаторов с использованием дифференциального компаратора режима прерывистой проводимости (DCM), который применяется для определения состояния граничного режима, и дифференциального компаратора выходного напряжения (V_{OUT}). Дифференциальный характер компаратора DCM и компаратора V_{OUT} позволяет LT3751 работать с высокой точностью



Рис. 1. Осциллограмма сигнала драйвера затвора в рамках стандартного случая применения

при высоких входных напряжениях, превышающих 400 В. Аналогичным образом, компаратор DCM и компаратор V_{OUT} в составе LT3751 могут работать с входным напряжением до 4,75 В. Это позволяет существенно расширить диапазон входных напряжений.

На рис. 2 представлена схема устройства зарядки высоковольтных конденсаторов с диапазоном входного напряжения 10–24 В. Для организации работы LT3751 в качестве устройства зарядки конденсаторов необходимо всего пять резисторов. Выходное напряжение срабатывания можно плавно изменять в диапазоне 50–450 В, меняя значения сопротивления R_9 в соответствии с формулой:

$$R_9 = \left(\frac{0,98N}{V_{ВЫХ(СРАБ)} + V_{ДИОДА}} \right) \times R_8.$$

LT3751 прекращает зарядку выходного конденсатора после достижения запрограммиро-

ванной точки срабатывания по выходному напряжению ($V_{ВЫХ(СРАБ)}$). Цикл зарядки повторяется переключением линии CHARGE. Максимальная скорость заряда/разряда выходного конденсатора ограничивается температурой трансформатора. В схеме, представленной на рис. 2, для ограничения температуры поверхности трансформатора до +65 °С при отсутствии воздушного потока требуется, чтобы средняя выходная мощность составляла ≤ 40 Вт, эта мощность определяется по формуле:

$$P_{CP} = \frac{1}{2} C_{ВЫХ} \times ЧАСТОТА \times (2V_{ВЫХ(СРАБ)} \times V_{ПУЛЬС} - V_{ПУЛЬС}^2) \leq 40 \text{ Вт}.$$

Здесь $V_{ВЫХ(СРАБ)}$ — выходное напряжение срабатывания, $V_{ПУЛЬС}$ — пульсирующее напряжение на выходном узле, а ЧАСТОТА — частота заряда/разряда. Для повышения доступной выходной мощности используется два метода: увеличение воздушного потока через трансформатор или увеличение размера самого трансформатора. На рис. 3 показана осциллограмма сигнала зарядки и средний входной ток для выходного конденсатора емкостью 100 мкФ, заряжаемого до 400 В менее чем за 100 мс ($R_9 = 976 \text{ Ом}$).

Для работы с выходными напряжениями, превышающими 450 В, трансформатор, представленный на рис. 2, необходимо заменить на трансформатор с более высокой индуктивностью первичной обмотки и большим коэффициентом трансформации. Чтобы получить более подробную информацию о необходимых процедурах проектирования трансформатора, следует изучить техническую документацию на LT3751.

Высоковольтный стабилизированный источник питания с диапазоном входных напряжений 10–24 В

LT3751 также можно использовать как преобразователь небольшого входного напряжения в гораздо более высокое выходное напряжение. Установка резистивного делителя между выходным узлом и линией FB позволяет LT3751 работать в качестве стабилизатора. На рис. 4 представлена схема стабилизированного источника питания с выходным

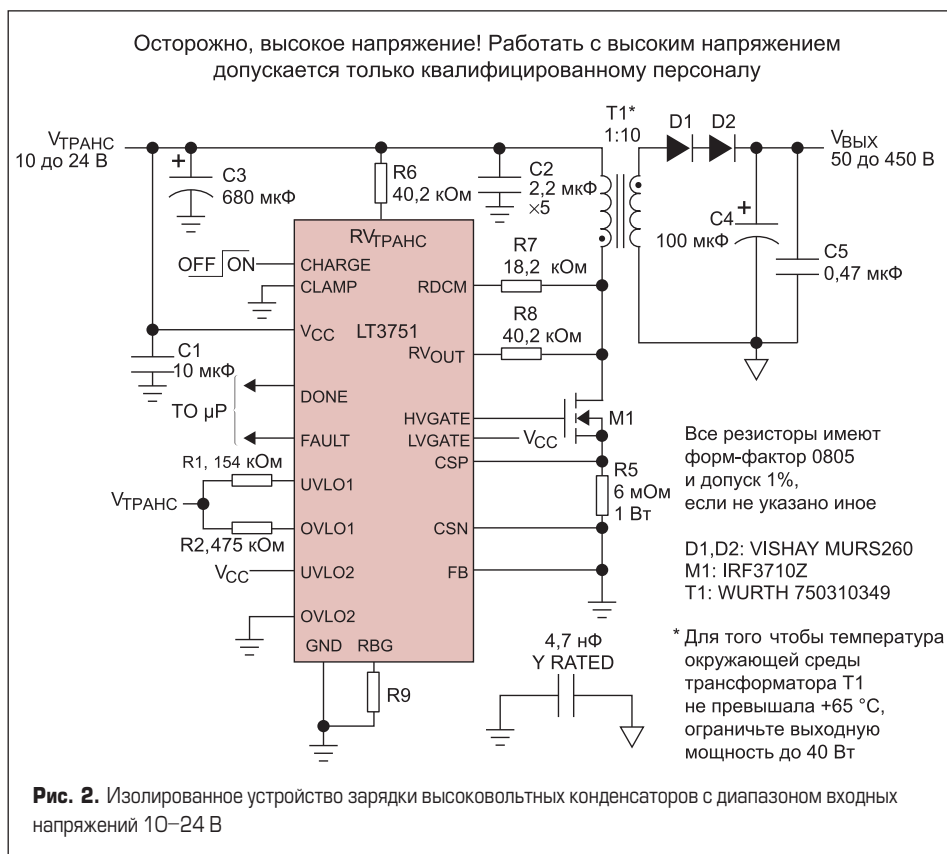


Рис. 2. Изолированное устройство зарядки высоковольтных конденсаторов с диапазоном входных напряжений 10–24 В

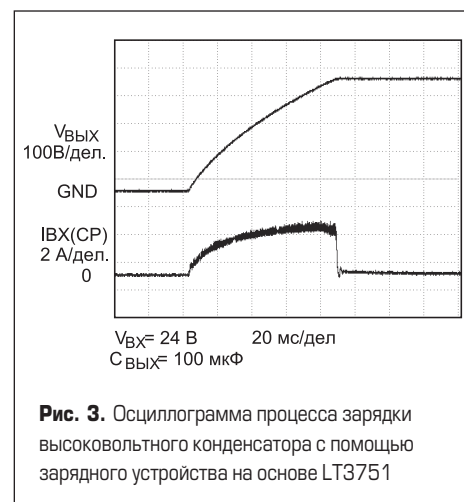


Рис. 3. Осциллограмма процесса зарядки высоковольтного конденсатора с помощью зарядного устройства на основе LT3751

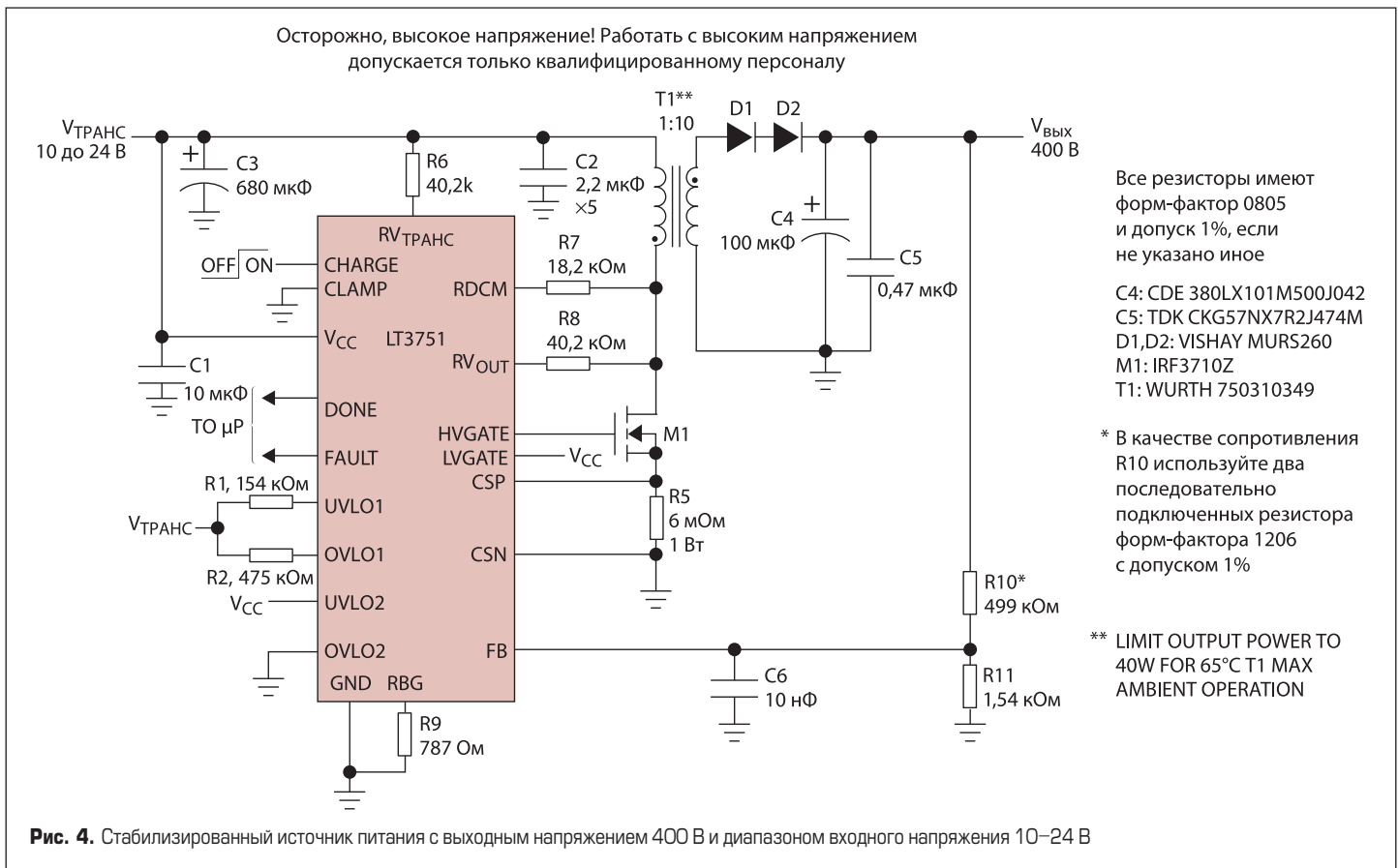


Рис. 4. Стабилизированный источник питания с выходным напряжением 400 В и диапазоном входного напряжения 10–24 В

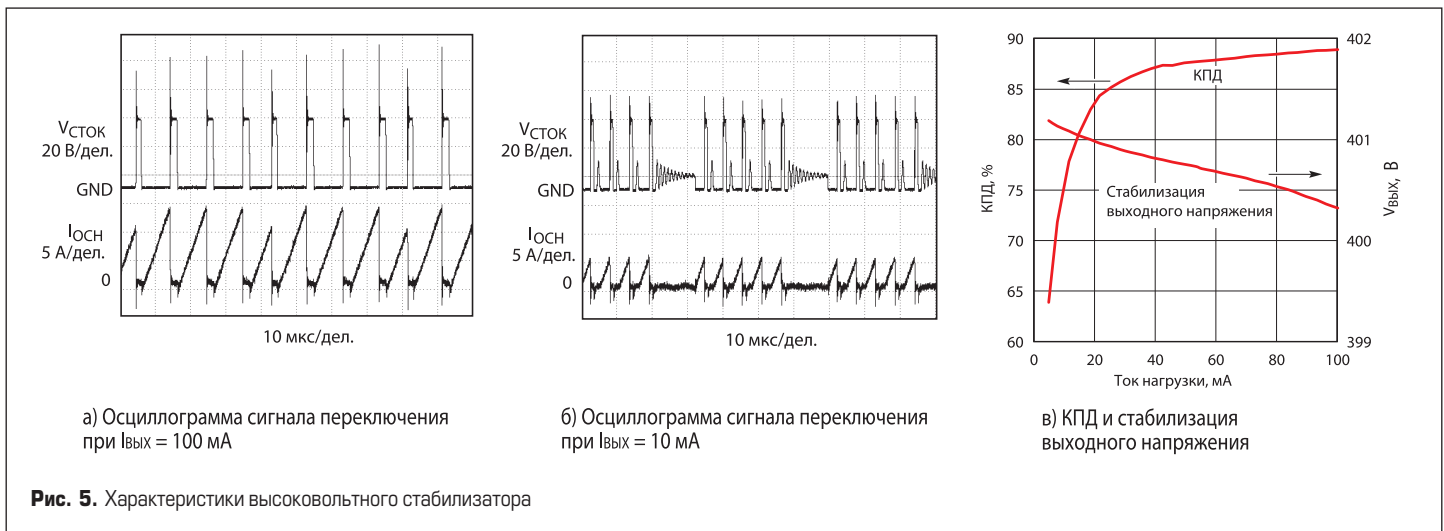


Рис. 5. Характеристики высоковольтного стабилизатора

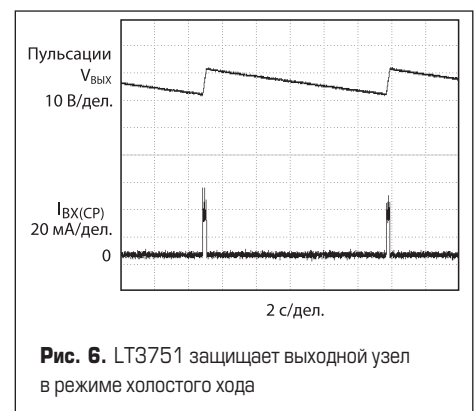
напряжением 400 В и диапазоном входного напряжения 10–24 В.

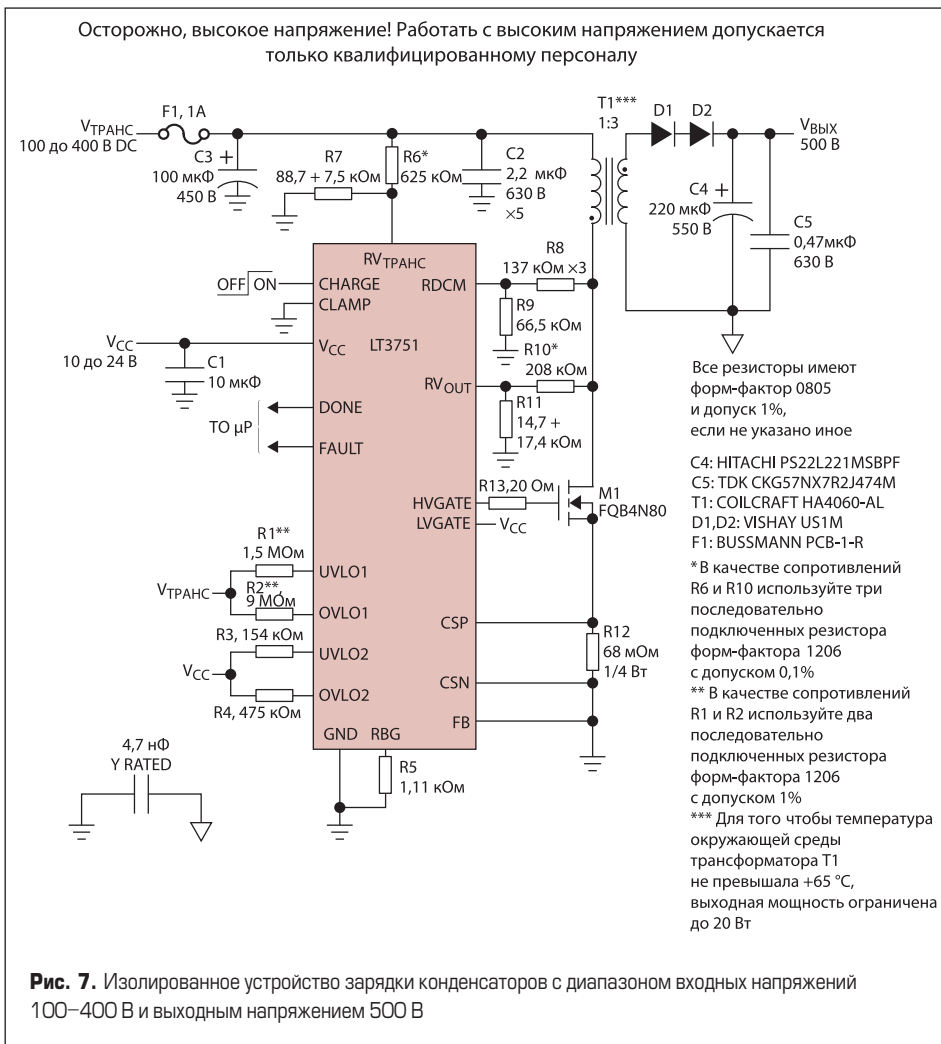
В LT3751 предусмотрена схема управления стабилизацией, значительно снижающая акустический шум в трансформаторе, а также во входных и выходных керамических конденсаторах большой емкости. Это достигается за счет применения внутренней системы тактирования с частотой 26 кГц, предназначенной для синхронизации циклов переключения первичной обмотки. В течение периода тактовой частоты LT3751 модулирует как пиковый первичный ток, так и количество циклов переключения. На рис. 5а, б показаны осциллограммы сигналов при большой и малой нагрузке соответственно, а на рис. 5в — график КПД в большей части рабочего диапазона для схемы, показанной на рис. 4.

Система тактирования генерирует по крайней мере один цикл переключения каждый период, что приводит к перезарядке выходного конденсатора в режиме холостого хода (без нагрузки). LT3751 адекватно работает в режиме холостого хода и защищает выходной узел от перезарядки. На рис. 6 показан принцип работы защиты, обеспечиваемой LT3751 в режиме холостого хода.

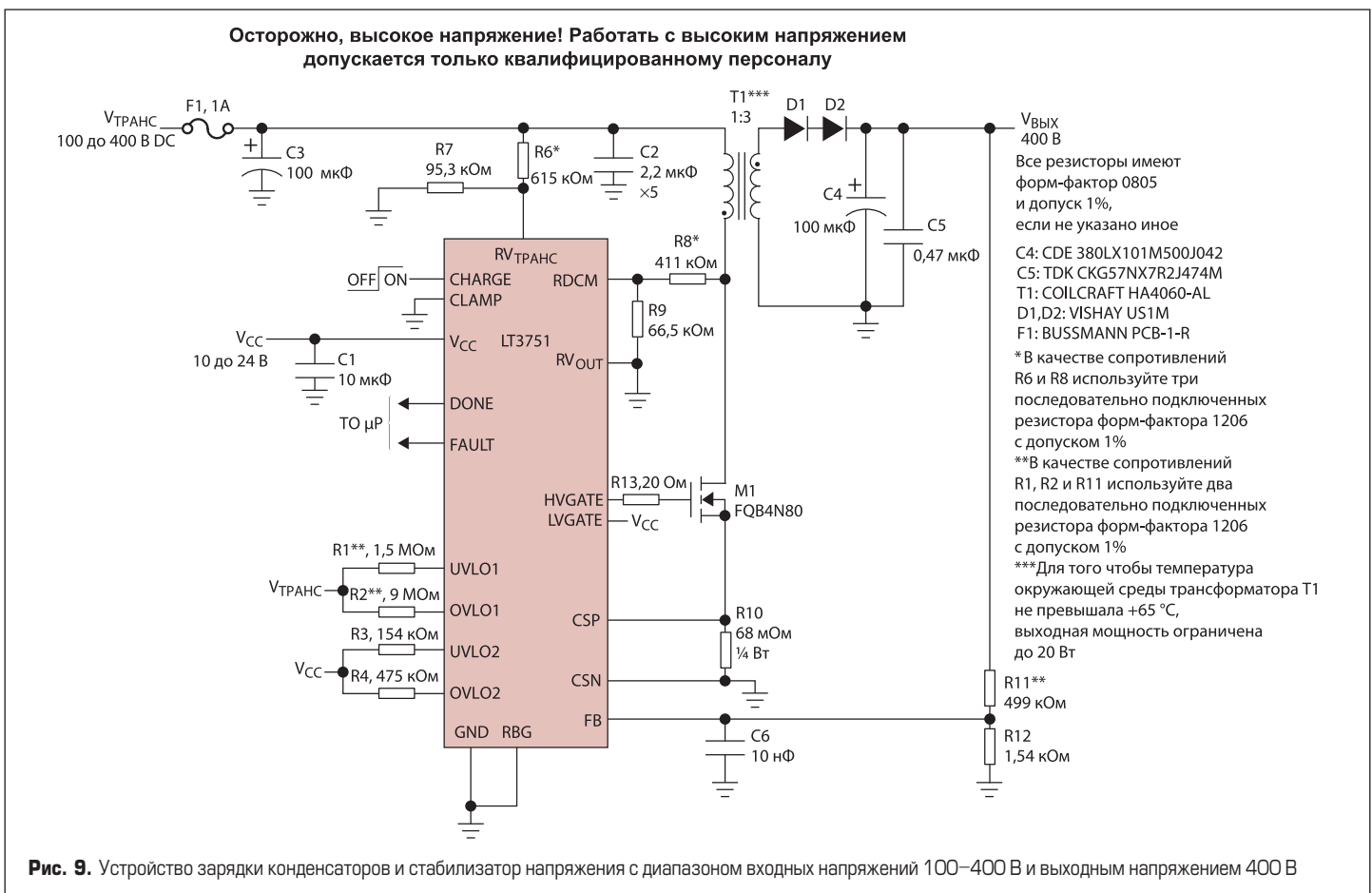
Для того чтобы обеспечить второй уровень защиты, к линиям RV_{OUT} и $R_{\text{ВС}}$ следует подключить резисторы, но их можно не подключать, чтобы сократить количество используемых компонентов, а соединить эти линии с «землей». Уровень срабатывания компаратора V_{OUT} как правило, устанавливается на 20% выше номинального значения стабилизированного напряжения. Если резистивный делитель выйдет

из строя, компаратор V_{OUT} запретит переключение, когда выходное напряжение поднимется на 20% выше номинального.





Следует обратить внимание, что вывод FB микросхемы LT3751 также можно использовать для зарядки конденсатора. LT3751 работает как устройство зарядки конденсаторов, пока напряжение на выводе FB не достигнет 1,225 В, после чего LT3751 будет работать как стабилизатор напряжения. То есть конденсатор может оставаться заряженным до тех пор, пока системе не потребуется его энергия. Выходной резистивный делитель образует путь утечки от выходного конденсатора на «землю». В случае падения выходного напряжения цепь обратной связи LT3751 будет поддерживать заряд на конденсаторе за счет подачи небольших низкочастотных импульсов заряда, как показано на рис. 6.



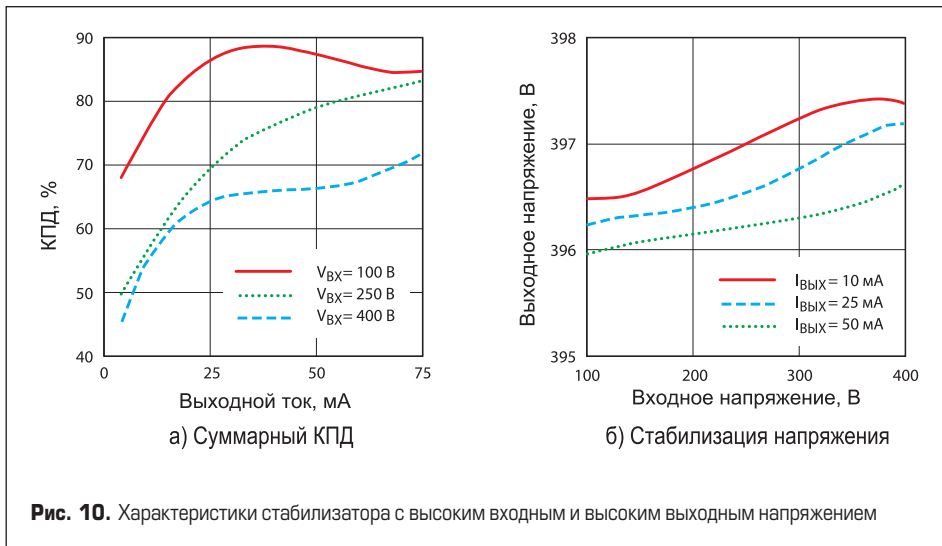


Рис. 10. Характеристики стабилизатора с высоким входным и высоким выходным напряжением

рабочем диапазоне при использовании резистивных делителей с допуском 0,1%. На рис. 8 показаны графики зависимости $U_{ВЫХ(СРАБ)}$ и времени зарядки от входного напряжения для схемы, представленной на рис. 7.

Неизолированное устройство зарядки конденсаторов/стабилизатор с высоким входным напряжением

Вывод FB микросхемы LT3751 также можно настроить для зарядки конденсатора от высокого входного напряжения. Для этого достаточно подключить резистивный делитель между выходным узлом и выводом FB. Делители, подключаемые к линиям R_{VTRANS} и R_{DCM} , могут состоять из резисторов с допуском 5%, а к линиям $R_{V(OUT)}$ и R_{BG} не нужно подключать никаких резисторов. Это позволяет сократить количество требуемых компонентов, увеличить их допуск, уменьшить занимаемую на плате площадь, а также снизить общие затраты на проектирование. Представленная на рис. 9 схема с резистивным делителем на выходе представляет собой полнофункциональный высокоэффективный стабилизатор напряжения с погрешностью стабилизации выходного напряжения менее 1%. Графики КПД и качества стабилизации выходного напряжения схемы, представленной на рис. 9, показаны на рис. 10а, б соответственно.

В качестве другого варианта можно подключить V_{OUT} к линии OVLO1 или OVLO2. Это позволяет имитировать работу компаратора V_{OUT} останавливая заряд при достижении требуемого напряжения. Вывод FB должен быть заземлен. На линию CHARGE должен быть подан

Изолированное устройство зарядки конденсаторов с высоким входным напряжением

Как упоминалось ранее, компаратор DCM и компаратор V_{OUT} позволяют устройству работать с высокой точностью при очень высоких входных напряжениях. Устройство зарядки конденсаторов, схема которого представлена на рис. 7, может работать при входном напряжении 100–400 В. Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку цепи входного напряжения от выходного узла, при этом не требуются никакие дополнительные магнитные компоненты.

При входном напряжении более 80 В с компараторами DCM и V_{OUT} необходимо использовать резистивные делители (только в режиме зарядного устройства). Точность порога

срабатывания компаратора V_{OUT} повышается за счет увеличения тока I_Q , протекающего через R_{10} и R_{11} , но при этом соотношение R_6/R_7 должно довольно точно соответствовать соотношению R_{10}/R_{11} с допусками, приближающимися к 0,1%. Хитрость здесь заключается в том, что для получения желаемого соотношения можно использовать резистивные сборки. В этом случае допуска всей сборки, равного 0,1%, добиться гораздо легче по сравнению с подбором отдельных резисторов с допуском 0,1%. Обратите внимание, что абсолютное значение каждого резистора не важно, важны только соотношения R_6/R_7 и R_{10}/R_{11} . Компаратор DCM не так чувствителен и позволяет использовать сопротивления с допуском более 1%.

Устройство зарядки конденсаторов с диапазоном входных напряжений 100–400 В имеет общую точность $U_{ВЫХ(СРАБ)}$ лучше 6% во всем

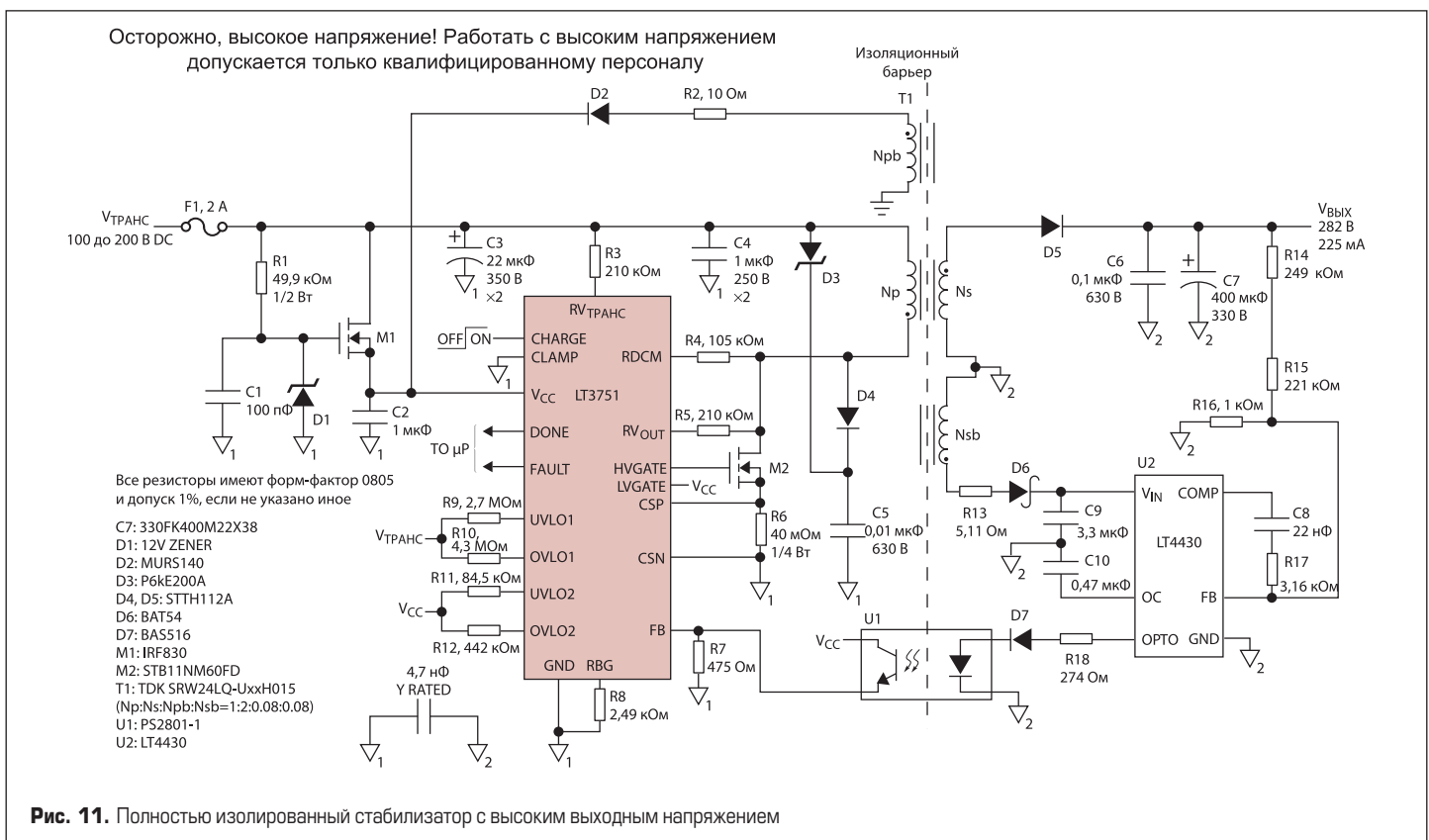


Рис. 11. Полностью изолированный стабилизатор с высоким выходным напряжением

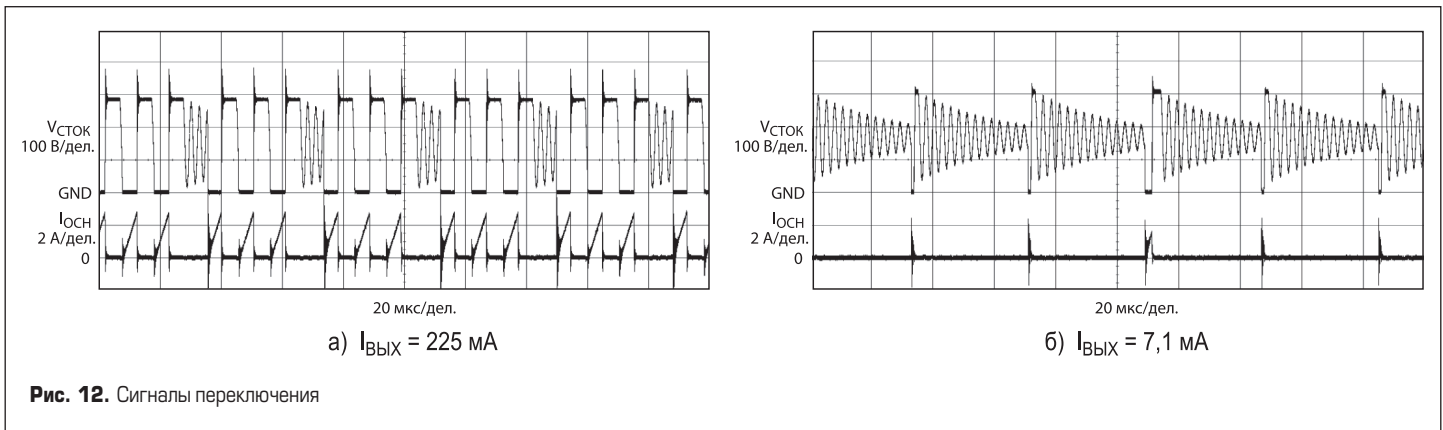


Рис. 12. Сигналы переключения

сигнал противоположного логического уровня, чтобы инициировать другую последовательность зарядки, таким образом, LT3751 будет работать только как устройство зарядки конденсаторов. Представленный на рис. 9 резистор R₁₂ убирается, а резистор R₁₁ устанавливается между V_{OUT} и линией OVLO1 или OVLO2. R₁₁ рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{11} = \frac{V_{ВЫХ(СРАБ)} - 1,225}{50\text{ мкА}}$$

Учтите, что при таком подключении к линии OVLO1 или OVLO2 линия FAULT будет выдавать сигнал о сбое, когда будет достигнуто целевое выходное напряжение V_{ВЫХ(СРАБ)}.

Изолированный стабилизатор с высоким входным и высоким выходным напряжением

Использование резистивного делителя между выходным узлом и выводом FB позволяет стабилизировать выходное напряжение, но не обеспечивает гальваническую развязку. В схеме, представленной на рис. 11, трансформатор имеет две вспомогательные обмотки для управления выводом FB, контроллером LT3751 и оптопарой, подключенной к резистивному делителю в цепи обратной связи. Вспомогательные обмотки позволяют реализовать желаемую гальваническую развязку, обеспечивая при этом изолированную цепь обратной связи от выходного узла к выводу FB микросхемы LT3751. На рис. 12 и 13 показаны характеристики стабилизатора.

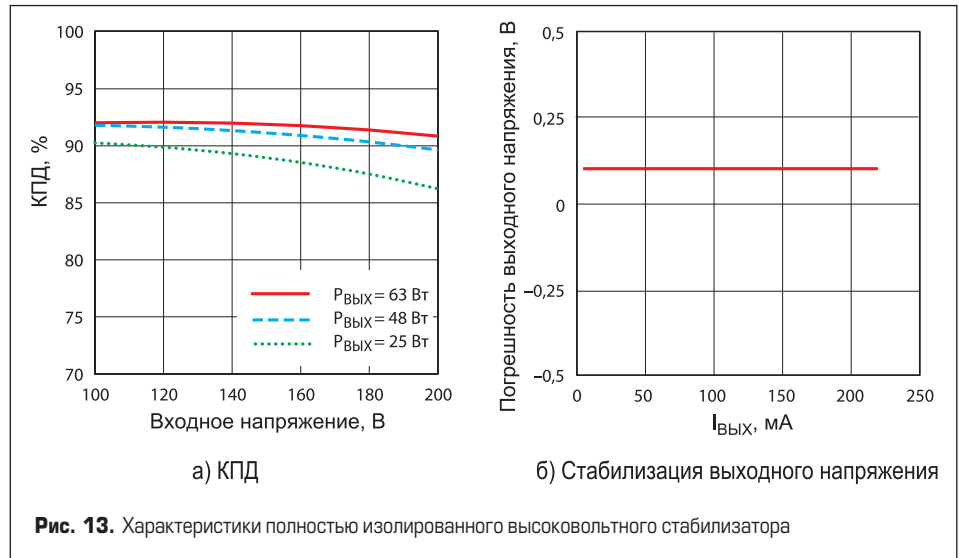


Рис. 13. Характеристики полностью изолированного высоковольтного стабилизатора

КПД этого полностью изолированного стабилизатора с высоким входным и выходным напряжением составляет более 90%. Как показано на рис. 13б, достигается высокое качество стабилизации выходного напряжения в основном благодаря дополнительному усилению цепи оптопары.

Благодаря возможности работы при любом входном напряжении в диапазоне 4,75–400 В и ряду встроенных функций безопасности LT3751 является отличным вариантом для создания устройств зарядки конденсаторов или высоковольтных стабилизированных источников питания. На данный момент LT3751 является фактически единственным контроллером зарядки конденсаторов, функционирующим

в граничном режиме, который может работать с высокой точностью при очень высоких входных напряжениях. LT3751 упрощает проектирование за счет большого количества встроенных функций, которые в случае реализации на другой компонентной базе привели бы к значительному увеличению стоимости и занимаемой на плате площади. Хотя в данной статье было представлено несколько схем на основе LT3751, этот компонент обладает значительно большим количеством функциональных возможностей, которые невозможно рассмотреть в рамках одной статьи. Мы рекомендуем ознакомиться с технической документацией на LT3751 для получения более подробной информации обо всех доступных функциях.