

Интеграция GaN в LYTSwitch-6 —

путь к повышению эффективности

В 2019 году компания Power Integrations анонсировала пополнение своих популярных квазирезонансных контроллеров семейства LYTSwitch, объединяющих первичную и вторичную стороны, а также цепь регулирующей обратной связи, в монолитном компактном корпусе InSOP- 24D для поверхностного монтажа. Новые микросхемы потребляют в режиме покоя всего 30 мВт мощностью и обеспечивают свободное от мерцаний свечение светодиодов мощностью до 110 Вт при КПД, достигающем 94%, и поддерживают конфигурации для двух или однокаскадных корректоров коэффициента мощности (ККМ). Особенность новых контроллеров — силовой ключ на основе нитрида галлия, заменивший кремниевый МОП- транзистор. Учитывая растущую популярность светодиодных продуктов и уникальность новых микросхем серии LYTSwitch –6, они требуют более детального рассмотрения. Предлагаемая статья является логическим продолжением публикации [1].

Владимир Рентюк

Александр Жеухин

power@macrogroup.ru

Введение

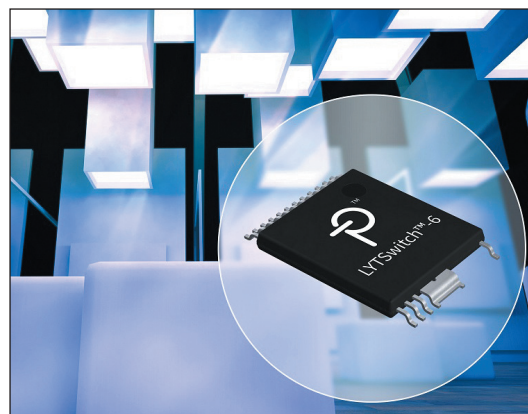
Причина успеха интегральных микросхем семейств LYTSwitch-6 [2] на рынке преобразователей для светодиодного освещения связана с тем, что эти устройства предлагают чрезвычайно эффективные решения и исключают необходимость использования традиционных дополнительных элементов и радиаторов в таких приложениях, как компактные или герметичные светодиодные балласты и драйверы с незначительной конвекцией.

Архитектура микросхем LYTSwitch-6 революционна в своем роде и объединяет в корпусе размером 9,4×10,8×1,45 мм контроллер первичной стороны с силовым ключом, контроллер вторичной стороны с токовым сенсором и уникальную систему обратной связи FluxLink [3]. Это исключает многие вопросы согласования и управления, которые возникали, например, в ранних семействах TOPSwitch (автор статьи обнаружил, что в условиях соблюдения выходной мощности,

но при токах выше 8 А, в TOP249Y из-за паразитной связи ключа и ШИМ-контроллера происходил сбой управления), а также проблемы переходных процессов и, соответственно, электромагнитной совместимости (ЭМС). Кроме сказанного, еще более высокие технические характеристики рассматриваемых в рамках настоящей статьи новых контроллеров семейств LYTSwitch-6 обеспечены тем, что в них используется встроенный нитрид-галлиевый ключ PowiGaN [4] от компании Power Integrations, что позволило увеличить максимальную мощность с 65 до 110 Вт.

Для LYTSwitch-6 гарантируется высокая эффективность преобразования энергии, точность стабилизации и быстрая ответная реакция. Микросхемы LYTSwitch-6 защищены системой прогрессирующего теплового ограничения тока, не допускающей перегрева кристалла и обеспечивающей излучение максимального количества света, возможного в конкретных условиях при заданных характеристиках. Кроме того, они имеют полный набор функций защиты по линиям питания и нагрузки, а также своих внутренних схем.

Целевыми областями применения LYTSwitch-6 являются высокоэффективные обратноходовые преобразователи для систем освещения — балласты и драйверы. Новые микросхемы поддерживают точную стабилизацию в режимах CV (стабилизация напряжения) и CC (стабилизация тока) вне зависимости от внешних компонентов. Они обеспечивают широкий диапазон регулировки яркости (димминг) посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и могут включаться в системы «умного дома» с регулировкой по проводной или беспроводной локальной сети или по обратной связи, а также индивидуально, например через Bluetooth смартфона.



Микросхемы LYTSwitch-6 предназначены для интеллектуальной осветительной арматуры жилых и коммерческих помещений и низкопрофильных современных потолочных светильников (рис. 1), присущая им высокая скорость реакции гарантирует отличную перекрестную стабилизацию в параллельных цепочках светодиодов без помощи дополнительного регулирующего оборудования, позволяя производителям осветительных приборов и систем сократить число вариантов схемотехнических решений и в конечном счете снизить затраты на разработку, производство и логистику.

Доступные в настоящее время контроллеры с силовым ключом на основе нитрида галлия в семействе LYTSwitch-6 приведены в таблице [2].

Кроме нитрид-галлиевых компонентов в рассматриваемом семействе доступны контроллеры с силовым ключом в виде кремнивого МОП-транзистора, гарантирующие в тех же условиях мощность 12–65 Вт, — LYT6063C/6073C, LYT6065C/6075C, LYT6067C/6077C и LYT6068C. Рассматриваемые контроллеры имеют следующие преимущества:

- Собственное потребление мощности менее 30 мВт (без нагрузки, включая чувствительность линии, но без корректора коэффициента мощности).
- Конструкции с использованием LYTSwitch-6 в полной мере соответствуют категории Energy Star и всем мировым нормам энергоэффективности освещения.
- Низкое собственное тепловыделение.
- Встроенная защита по входу от повышенного напряжения с автоматическим перезапуском.
- Защита по выходу от повышенного/пониженного напряжения с автоматическим перезапуском.
- Обнаружение обрыва цепи затвора ключа синхронного выпрямителя (SR FET).
- Отслеживание входного напряжения с точным определением состояния пониженного напряжения.



Рис. 1. LYTSwitch-6 компании Power Integrations — универсальное решение для «умного дома»

Таблица. Семейство контроллеров LYTSwitch-6 от компании Power Integrations

Наименование параметра	LYT6079C	LYT6070C
Мощность при номинальном напряжении:		
227 В (AC) ±15%	85 Вт	95 Вт
85–305 В (AC)	75 Вт	85 Вт
380 В (DC)/450 В (DC)	100 Вт	110 Вт
Рабочее напряжение силового ключа	650/725/750 В	
Пиковый ток ключа	10 А	14 А
Температура полупроводникового перехода	–40...+150 °С	
Температура рабочей среды	–40...+105 °С	
Рабочая частота	25 кГц (тип.)	

Примечания.

1. Мощность указана как гарантированная непрерывная в типичном неветилируемом открытом приложении (open frame) на типовой печатной плате.
2. Мощность измерена при температуре окружающей среды +40 °С.
3. Максимальная выходная мощность зависит от конструкции и при условии, что температура корпуса не должна превышать +125 °С.

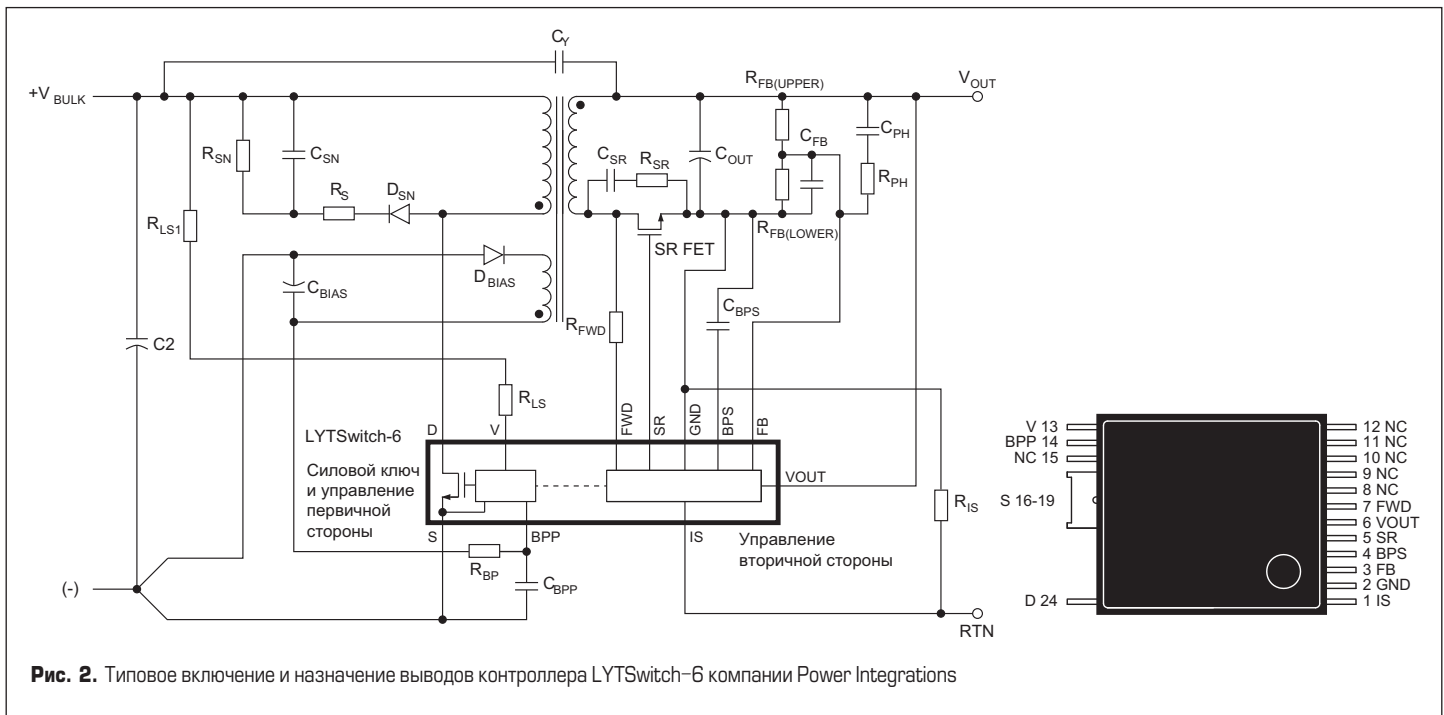


Рис. 2. Типовое включение и назначение выводов контроллера LYTSwitch-6 компании Power Integrations

- Тепловая обратная связь гарантирует, что мощность продолжает поступать (с понижением) при повышенных температурах.
- Полная безопасность и соответствие нормативным требованиям.
- Усиленная изоляция.
- Электрическая прочность изоляции не менее 4000 В напряжения переменного тока.
- 100%-ное тестирование повышенным напряжением изоляции на устойчивость.
- Сертификаты UL1577 и TUV (EN 60950).
- Не содержит галогенов и соответствует требованиям RoHS.

Типовая схема включения контроллера и конфигурация выводов контроллера LYTSwitch-6 показаны на рис. 2 (назначение и описание будут представлены ниже), а упрощенные блок-схемы контроллера, ответственные за управление первичной и вторичной сторонами, изображены на рис. 3 и 4 соответственно.

Описание и назначение выводов контроллера LYTSwitch-6

Контакты вторичной стороны

Контакт 1 (IS — ISENSE) — вывод подключения датчика тока. Предназначен для организации контроля (управления) тока на выходе вторичной стороны. Между этим выводом

и выводом GND должен быть подключен внешний резистор — R_{IS} . Если стабилизация тока не требуется, то этот вывод должен быть подключен к выводу GND (общий) вторичной стороны.

Контакт 2 (GND — SECONDARY GROUND) — заземление вторичной стороны. Является общим проводом для вторичной стороны преобразователя. Обратите внимание, что в случае использования датчика тока (из-за наличия резистора между этим и выводом IS) этот вывод не становится общей точкой (заземлением) для питаемого устройства.

Контакт 3 (FB — FEEDBACK) — вход обратной связи. Предназначен для подключения к внешнему резисторному делителю, служит для установки выходного напряжения преобразователя относительно опорного $V_{REF} = 1,265$ В.

Контакт 4 (BPS — SECONDARY BYPASS) — байпас вторичной стороны. Точка подключения внешнего байпасного конденсатора C_{BPS} для вторичной стороны контроллера.

Контакт 5 (SR — SYNCHRONOUS RECTIFIER DRIVE) — выход драйвера синхронного выпрямителя. Предназначен для подключения затвора внешнего МОП-транзистора (SR FET).

Контакт 6 (VOUT — OUTPUT VOLTAGE) — вход напряжения питания. Подключается непо-

средственно к выходу преобразователя, предназначен для формирования питания внутренних цепей вторичной стороны контроллера.

Контакт 7 (FWD — FORWARD). Подключается непосредственно к вторичной обмотке трансформатора. Основная функция — предоставляет контроллеру информацию о цикле переключения ключа первичной стороны. Дополнительная функция — обеспечивает питание контроллера вторичной стороны, когда напряжение V_{OUT} находится ниже порогового значения.

Контакты 8–12 (NC). Не используются. Должны оставаться свободными, не подключаются ни к каким контактам и цепям.

Контакты первичной стороны

Контакт 13 (V — UNDER/OVER INPUT VOLTAGE) — вход контроля за входным напряжением. Вывод должен быть подключен к стороне переменного или постоянного тока входного моста и необходим для определения условий нарушения допустимых уровней напряжения на входе преобразователя. При необходимости отключить защиту этот вывод должен быть подключен к истоку силового ключа (выводы S).

Контакт 14 (BPP — PRIMARY BYPASS) — байпас первичной стороны. Точка подклю-

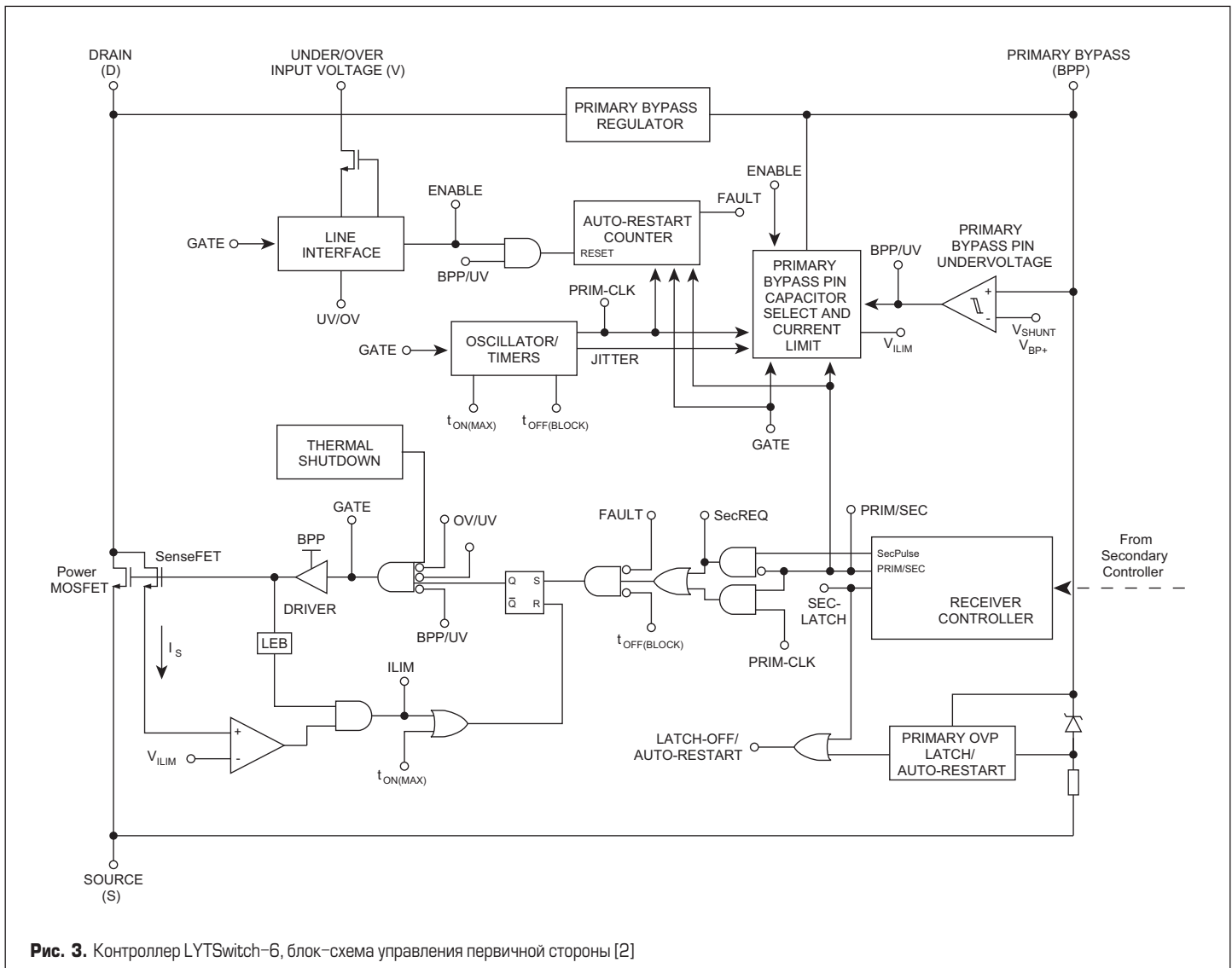


Рис. 3. Контроллер LYTSwitch-6, блок-схема управления первичной стороны [2]

чения внешнего байпасного конденсатора C_{BPP} первичной стороны. Этот вывод также используется для выбора тока ограничения I_{LIM} — стандартного I_{LIM} или повышенного $I_{LIM}+1$.

Контакт 15 (NC). Остается открытым или может быть подключен к контакту S (источку силового ключа) или контакту BPP.

Контакты 16–19 (S — SOURCE). Эти контакты соединены с истоком внутреннего силового ключа контроллера. Они также являются заземляющими контактами для байпаса первичной стороны.

Контакт 24 (D — DRAIN). Сток внутреннего силового ключа контроллера.

Функциональное описание контроллера LYTSwitch-6

Контроллер LYTSwitch-6 объединяет в одном устройстве высоковольтный силовой ключ (Power MOSFET), а также контроллер первичной (рис. 3) и вторичной стороны (рис. 4).

Для точного прямого измерения выходного напряжения и выходного тока на вторичной стороне и передачи управления на первичную сторону контроллер содержит новейшую схему с индуктивной обратной связью.

Использованное решение вместе с оригинальным корпусом позволяет проектировать и изготавливать безопасные, надежные и недорогие устройства для управления освещением.

В общем случае LYTSwitch-6 — это квазирезонансный (QR) контроллер обратного преобразователя, который может работать в режиме непрерывной проводимости (continuous conduction mode, CCM). Контроллер использует схемы управления как с переменной частотой, так и с переменным током. Схема первичной стороны контроллера состоит из генератора (OSCILLATOR/TIMERS) с джиттером (JITTER), схемы приемника (RECEIVER CONTROLLER), которая имеет индуктивную связь с вторичной стороной контроллера, схему управления ограничением тока (PRIMARY BYPASS PIN CAPACITOR SELECT AND CURRENT LIMIT), стабилизатор напряжения на 5 В (PRIMARY BYPASS REGULATOR), подключенный к выводу BPP, схему для снижения акустических шумов при работе с малой нагрузкой, схему обнаружения перенапряжения, схему считывания входного напряжения без потерь (LINE INTERFACE), схему выбора предела ограничения тока (через специальный транзистор — датчик тока SenseFET), защиту от перегрева (THERMAL SHUTDOWN), схему подавления (бланки-

рования) переднего фронта (LEB) и силовой ключ на номинальное рабочее напряжение 650 В при максимальном 750 В (особенности GaN-ключей, использованных в LYTSwitch-6, подробнее см. в [1, 2, 4]).

Схема вторичной стороны контроллера LYTSwitch-6 состоит из схемы передатчика обратной связи (FEEDBACK DRIVER), которая индуктивно связана с приемником первичной стороны, цепи управления стабилизацией напряжения (режим CV) и стабилизацией тока (режим CC), стабилизатора на 4,4 В (REGULATOR V_{BPS}), чей выход подключен к выводу BPS, драйвера МОП-транзистора синхронного выпрямителя (вывод SR), схемы организации квазирезонансного режима, генератора-осциллятора (OSCILLATOR/TIMER) и схем синхронизации, тепловой защиты с обратной связью (THERMAL FOLDBACK) и множества встроенных функций защиты.

Как уже было сказано, контроллер LYTSwitch-6 — это квазирезонансный контроллер с переменной частотой преобразования и режимом работы CCM, использованным для повышения эффективности и увеличения выходной мощности. Далее мы рассмотрим основные особенности его функционирования.

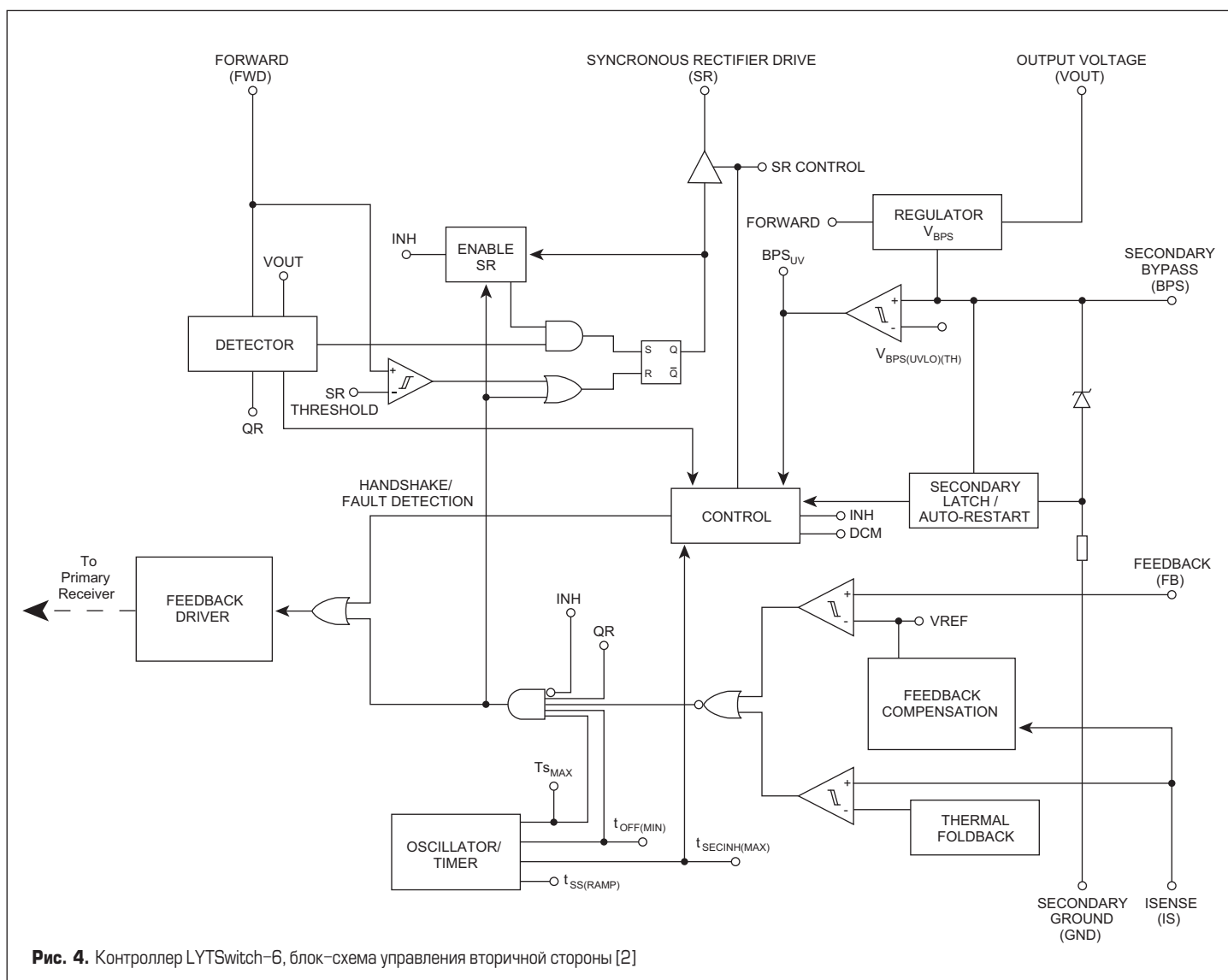


Рис. 4. Контроллер LYTSwitch-6, блок-схема управления вторичной стороны [2]

Особенности функционирования контроллера LYTSwitch-6

Первичная сторона контроллера

Питание первичной стороны контроллера осуществляется через внутренний стабилизатор напряжения, чей выход подключен к выводу BPP, через который напряжением V_{BPP} заряжается конденсатор C_{BPP} . Стабилизатор берет напряжение со стока силового транзистора (контакт DRAIN) при каждом выключении силового ключа. Вывод BPP является точкой выхода напряжения питания внутренних каскадов первичной стороны контроллера. Когда силовой ключ активирован, устройство работает от энергии, накопленной в конденсаторе C_{BPP} , в качестве которого может использоваться керамический конденсатор, необходимый и как конденсатор фильтра, обычный по выходу стабилизатора. Однако следует учитывать, что емкость этого конденсатора влияет на ограничение тока, о чем и пойдет речь далее.

Дополнительно к стабилизатору имеется параллельная цепь питания, когда питание на вывод BPP подается через внешний резистор R_{BP} . В этом случае система сравнивает напряжение на выводе BPP с напряжением V_{SHUNT} . Управление выполняет узел PRIMARY BYPASS PIN CAPACITOR SELECT AND CURRENT LIMIT (рис. 3). Такое решение облегчает внешнее питание LYTSwitch-6 через вспомогательную обмотку обратного трансформатора и позволяет снизить потребление энергии на холостом ходу до уровня, не превышающего 30 мВт.

Контроллер LYTSwitch-6 имеет настройки программируемого пользователем предела ограничения тока (ILIM) посредством выбора значения емкости конденсатора C_{BPP} первичной стороны. Схемным решением контроллера предусмотрено две программируемые настройки с использованием конденсаторов C_{BPP} емкостью 0,47 и 4,7 мФ. Они предназна-

чены для стандартных (ILIM) и увеличенных (ILIM+) настроек соответственно.

Схема контроля за недопустимо пониженным напряжением на контакте BPP отключает питание в случае, когда в стационарном режиме напряжение на этом контакте падает ниже, примерно, 4,5 В ($V_{BPP} - V_{BP(H)}$). Как только напряжение на выводе BPP упадет ниже этого порога, питание первичной стороны контроллера, для того чтобы снова обеспечить включение силового ключа, должно снова вернуться к питанию от V_{SHUNT} .

Для обнаружения перенапряжения через вспомогательную обмотку (напряжение подается через внешний резистор R_{BP} , рис. 2) и активации соответствующего механизма защиты, как правило, используется стабилитрон с включенным последовательно резистором, установленный параллельно с конденсатором C_{BPP} . Если напряжение на выводе BPP возрастает и приводит к пробое стабилитрона, то ток I_{SD} через него вызовет падение напряжения на резисторе, а на самом стабилитроне напряжение зафиксируется на уровне, заданном его вольт-амперной характеристикой. При этом схема управления по первичной стороне через PRIMARY OVP LATCH/AUTO-RESTART отсоединит силовой ключ на время $t_{AR(OFF)}$. По истечении этого периода контроллер возобновит работу и попытается вернуться к обычному регулированию. Эта защита уже как функция предотвращения повышенного напряжения на выходе (VOUT OV) также доступна в качестве встроенной функции на вторичной стороне контроллера. На вторичной стороне за это отвечает узел SECONDARY LATCH/AUTO-RESTART.

Схема тепловой защиты основана на определении температуры кристалла в области размещения силового ключа. Порог срабатывания обычно устанавливается на T_{SD} с гистерезисом $T_{SD(H)}$. Когда температура кристалла контроллера поднимается выше этого порога, силовой

ключ выключается и остается в отключенном состоянии до тех пор, пока температура внутри контроллера не упадет до температуры $T_{SD(H)}$, после чего он снова включается. Для предотвращения перегрева печатной платы из-за длительной неисправности в контроллере осознанно выбран достаточно большой гистерезис $T_{SD(H)}$.

Контроллер первичной стороны имеет линейное изменение порога ограничения тока, обратно пропорциональное времени от конца последнего цикла включения силового ключа первичной стороны. То есть от времени, когда ключ выключается в конце цикла переключения. Эта характеристика создает предел тока первичной стороны, который увеличивается с повышением нагрузки (рис. 5).

Этот алгоритм позволяет наиболее эффективно использовать силовой ключ с немедленным ответом при получении запроса на переключение цикла по обратной связи. При высокой нагрузке в цикле переключения максимальный ток приближается к 100%. I_{LIM} постепенно уменьшается до 30% от предела полного тока при снижении нагрузки. По достижении 30%-ного предела тока дальнейшее его ограничение не происходит, поскольку он и так достаточно низкий. Это сделано, чтобы избежать слышимого акустического шума, но время между циклами переключения по мере уменьшения нагрузки будет продолжаться увеличиваться.

Кроме того, нормализованный предел тока дополнительно модулируется между 100 и 95% из-за введения в него частотной модуляции, что приводит к джиттеру частоты в пределах примерно от 7 кГц со средней частотой около 100 кГц.

В случае возникновения неисправности, такой как перегрузка на выходе, короткое замыкание на выходе или неисправность внешнего компонента/контакта, контроллер LYTSwitch-6 переходит в режим автоматического перезапуска. При автоматическом перезапуске силовой ключ отсоединяется на время $t_{AR(OFF)}$. В контроллере предусмотрено два способа войти в режим автозапуска:

1. Постоянные запросы от вторичной стороны на частоте выше перегрузки (~110 кГц) длительностью не менее 80 мс.
2. Отсутствие запросов на переключение с вторичной стороны при паузе, превышающей $t_{AR(SK)}$.

Второй вариант был добавлен с целью гарантировать, что если связь с вторичной стороной была потеряна, то первичная сторона попытается снова выполнить перезапуск. Хотя это никогда не должно происходить при нормальной работе, однако может быть полезно в случае системных событий типа электростатических разрядов (ESD) или, например, когда имеет место потеря связи из-за помех, затрудняющих работу вторичного контроллера. Такие проблемы решаются, когда первичная сторона контроллера после истечения времени, выделенного на автоматический перезапуск по первому варианту, перезапускается сама. Кроме того, автоматический перезапуск сбрасывается, как только происходит

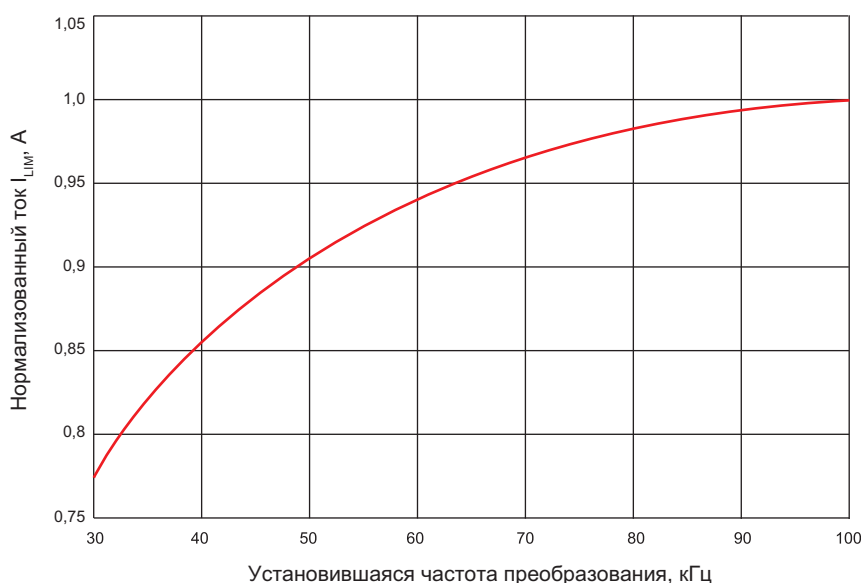


Рис. 5. Нормализованный ток ключа первичной стороны контроллера LYTSwitch-6 в зависимости от частоты преобразования мощности

отключение преобразователя от сети напряжения переменного тока. При восстановлении сети запуск контроллера происходит в штатном режиме.

Для того чтобы контроллер LYTSwitch-6, а вернее его ключ оставался в области безопасной работы, предусмотрено следующее. В случае двух последовательных циклов, когда I_{LIM} достигается в течение времени гашения и времени задержки ограничения тока (включая скачок тока переднего фронта длительностью примерно 500 нс), контроллер пропустит приблизительно 2,5 цикла или ~25 мс (на основе полной частоты 100 кГц). Это обеспечивает достаточное время для сброса трансформатора в ходе запуска на большие емкостные нагрузки без увеличения времени запуска.

Для определения и защиты от перенапряжения входного напряжения используется вывод V (UNDER/OVER INPUT VOLTAGE). Для этого вход подключен через резистор (на рис. 2 два последовательно включенных резистора R_{LS1} и R_{LS}), что сделано с точки зрения решения проблемы высокого напряжения между входным конденсатором за выпрямительным мостом. Однако резистор или резисторы могут быть подключены и до выпрямителя, чтобы ускорить анализ. Если эта функция не нужна, она может быть отключена подсоединением контакта V к стоку силового ключа (вывод D).

Вторичная сторона контроллера

Как показано на блок-схеме (рис. 4), вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 питается от внутреннего стабилизатора 4,4 В (V_{BPS}), который в свою очередь запитывается либо от выходного напряжения VOUT, либо через цепь FWD. Вывод байпаса вторичной стороны подключен к внешнему конденсатору, который является конденсатором фильтра для внутреннего стабилизатора.

Вывод прямого подключения FWD также подсоединяется к блоку обнаружения заднего фронта, который используется как для установления регулирующей обратной связи, так и для синхронизации, чтобы активировать ключ синхронного выпрямителя SF FET, чей затвор подключен к выводу SR (выход драйвера ключа синхронного выпрямителя). Напряжение на выводе FWD используется для определения момента отключения SF FET в режиме прерывистых токов (discontinuous mode operation — DCM), то есть в момент времени, когда падение напряжения на сопротивлении открытого канала $R_{DS(ON)}$ транзистора SR FET падает ниже нуля вольт.

В режиме непрерывной проводимости (Continuous Conduction Mode — CCM) транзистор SR FET отключается, когда импульс обратной связи отправляется к первичной стороне контроллера для запроса следующего цикла переключения, обеспечивая превосходную синхронную работу без каких-либо перекрытий для выключения МОП-транзистора.

Для установки и поддержания заданного значения выходного напряжения предусмотрена средняя точка делителя напряжения, образованного внешними резисторами $R_{FB(UPPER)}$

и $R_{FB(LOWER)}$, включенными между выходом V_{OUT} и точкой заземления вторичной стороны (контакт 2, GND). Здесь обратите внимание на важное примечание, сделанное ранее в разделе «Описание и назначение выводов контроллера LYTSwitch-6» и связанное с выводом FB (вход компаратора регулирующей обратной связи). Внутреннее напряжение компаратора опорного напряжения V_{REF} равно 1,265 В. Для установки и поддержания заданного значения выходного тока в режиме стабилизации по току, для измерения тока используется внешний резистор R_{IS} , который подключается между контактами IS и точкой заземления вторичной стороны.

Минимальное время выключения формируется, когда вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 инициирует запрос цикла, используя индуктивное соединение с первичной стороной. Максимальная частота запросов ограничена минимальным временем отключения $t_{OFF(MIN)}$. Это делается для того, чтобы обеспечить достаточное время сброса намагниченности трансформатора, и для доставки накопленной в нем энергии к нагрузке.

Максимальная частота запроса на переключение от вторичной стороны контроллера LYTSwitch-6 указана в [2] как f_{SREQ} . Ее типовое значение равно 132 кГц.

При запуске первичная сторона контроллера LYTSwitch-6 ограничена максимальной частотой переключения f_{SW} и 75% от максимального запрограммированного предела тока при частоте запроса переключения f_{SREQ} равной 100 кГц.

Вторичная сторона контроллера временно блокирует порог срабатывания защиты по обратной связи $V_{FB(OFF)}$ до окончания времени, установленного таймером (OSCILLATOR/TIMER) плавного пуска $t_{SS(RAMP)}$. После того как подтверждение связи завершено (канал HANDSHAKE/FAULT DETECTION, рис. 4), вторичная сторона контроллера в течение периода $t_{SS(RAMP)}$ линейно увеличивает частоту переключения с f_{SW} до f_{SREQ} .

В случае короткого замыкания или перегрузки при запуске устройство будет находиться в режиме стабилизации тока (режим CC). Если после того, как произошло подтверждение связи между первичной и вторичной сторонами контроллера LYTSwitch-6, выходное напряжение по истечении времени плавного старта, то есть времени блокировки обратной связи $t_{FB(AR)}$, заданного таймером, не поднимется выше порога $V_{O(AR)}$ равного 3,45 В [2], до уровня V_{OUT} , устройство перейдет в режим автоматического перезапуска.

Здесь есть важный момент: вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 активирует режим защиты от короткого замыкания по обратной связи $V_{FB(OFF)}$ в конце периода времени $t_{SS(RAMP)}$. Если короткое замыкание по выходу продолжает удерживать напряжение на входе FD ниже порога определения короткого замыкания, то вторичная сторона устройства прекратит запрашивать импульсы для активирования цикла автоматического перезапуска.

Если выходное напряжение достигает значения стабилизации в течение периода $t_{SS(RAMP)}$,

то линейное изменение частоты немедленно прекращается и вторичной стороне контроллера разрешается работать на полной частоте. Это позволит контроллеру поддерживать стабилизацию напряжения в случае внезапных переходных процессов в нагрузке сразу после достижения точки стабилизации. Падение частоты будет отменено, только если уже был обнаружен запрограммированный квазирезонансный режим функционирования преобразователя.

Запросы вторичного цикла для инициирования первичного переключения запрещены для поддержания работы ниже максимальной частоты и обеспечения минимального времени отключения. Помимо этих ограничений, запросы вторичного цикла также запрещаются в течение временного цикла включения (режим ON) силового ключа первичной стороны, то есть имеется в виду время между запросом цикла и обнаружением заднего фронта на входе FWD. Максимальный тайм-аут будет иметь место, если задний фронт импульса на входе FWD не обнаружен после запрошенного цикла, что составляет примерно 30 мс.

Вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 также имеет защиту от перегрева, но работает по иному алгоритму, чем аналогичная защита первичной стороны. Когда температура кристалла вторичной стороны контроллера достигает +124 °C, выходная мощность уменьшается за счет снижения опорного порогового значения (THERMAL FOLDBACK) для компаратора петли стабилизации тока (рис. 6).

В случае если измеренное напряжение на входе обратной связи FB оказалось на 2% выше порога регулирования, то вывод VOUT дополнительно нагружается малым током примерно 2,5 мА (макс. до 3 мА). Этот ток увеличивается примерно до 200 мА, если напряжение повышается до 10%. Ток, нагружающий выход VOUT, предназначен для разрядки выходных конденсаторов при кратковременных выбросах. В этом случае вторичная сторона не передает управление первичной стороне.

Если будет обнаружено, что напряжение на входе компаратора FB превышено на 20% порога регулирования, то первичной стороне устройства отправляется команда для

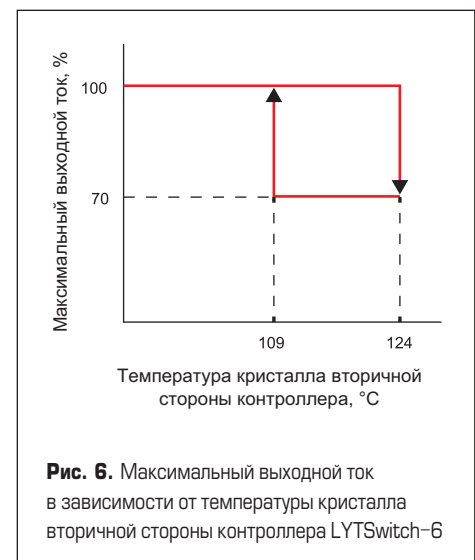


Рис. 6. Максимальный выходной ток в зависимости от температуры кристалла вторичной стороны контроллера LYTSwitch-6

запуска последовательности автоматического перезапуска. Эта интегрированная с VOUT защита от повышенного напряжения может использоваться независимо от системы защиты первичной стороны или в комбинации с ней.

Если при запуске напряжение на выводе FB оказалось ниже порога отключения $V_{FB(OFF)}$, то вторичная сторона контроллера завершит установление связи с первичной стороной и прекратит запрашивать циклы для запуска автоматического перезапуска. Это необ-

ходимо для того, чтобы получить контроль над первичным полным временем $t_{SS(RAMP)}$. Вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 запускает режим автоматического перезапуска, поскольку запросы цикла на первичную сторону не выполняются дольше, чем время $t_{AR(SK)}$.

Во время нормальной работы вторичная сторона устройства прекратит запрашивать импульсы от первичной стороны, чтобы инициировать цикл автоматического перезапуска, когда напряжение на выводе FB падает ниже порога $V_{FB(OFF)}$. Фильтр случайных срабатываний в режиме защиты имеет задержку, не превышающую 10 мс. Благодаря этому механизму вторичная сторона прекратит все попытки восстановить управление после того, как обнаружится, что вход цепи обратной связи закорочен на землю.

Автоматический перезапуск имеет пороговые уровни. Вывод VOUT включает компаратор для определения, когда выходное напряжение падает ниже $V_{VO(AR)}$ от V_{VO} , в течение времени, превышающего $t_{VOUT(AR)}$. Вторичная сторона контроллера откажется от управления, когда будет обнаружено это условие неисправности. Данный порог ограничивает диапазон работы в режиме стабилизации тока (режим CC).

Кроме того, вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 имеет функцию защиты от превышения напряжения на выводе BPS, которая действует аналогично функции превышения напряжения на выводе BPP первичной стороны. Когда вторичная сторона устройства находится в режиме управления (если ток на выводе BPS превысит уровень $I_{BPS(SD)}$, а это примерно 7 мА), то вторичная сторона устройства отправит на первичную сторону команду инициации автоматического перезапуска через время $t_{AR(OFF)}$.

Контроллер LYTSwitch-6 стабилизирует выходной ток, используя в качестве датчика тока внешний резистор R_{IS} , включенный между контактами IS и GND (вывод 2). Напряжение, генерируемое на резисторе, сравнивается с внутренним напряжением $I_{SV(TH)}$, составляющим примерно 35 мВ. Если стабилизация тока не требуется, то вывод IS должен быть подключен напрямую к выводу 2.

Для того чтобы гарантировать, что затвор МОП-транзистора синхронного выпрямителя (SR FET) удерживается на низком уровне, если управление вторичной стороны не функционирует, драйвер затвора синхронного выпрямителя имеет номинально включенное устройство, которое понижает уровень на его выходе и снимает любое накопление напряжения на затворе SR FET, вызванное наличием емкостной связи между выводами FWD и SR.

Еще одна интересная особенность контроллера LYTSwitch-6 заключается в том, что на его вторичной стороне имеется режим защиты по нарушению подключения затвора МОП-транзистора синхронного выпрямителя. При запуске контроллер будет брать ток

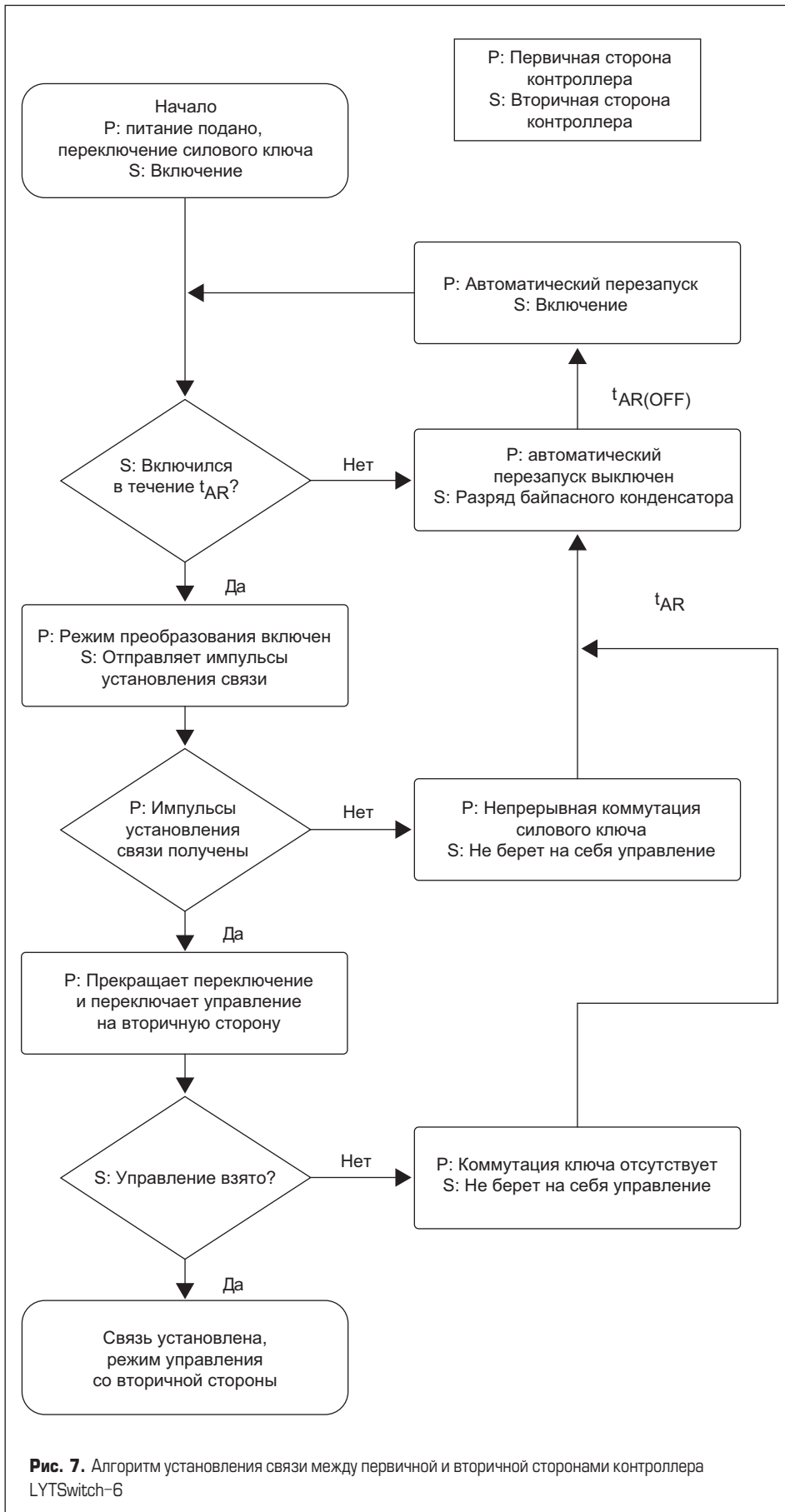


Рис. 7. Алгоритм установления связи между первичной и вторичной сторонами контроллера LYTSwitch-6

от контакта SR (выход драйвера затвора синхронного выпрямителя). При этом внутренний порог будет соответствовать входной емкости в 100 пФ. Если емкость на выводе SR окажется ниже 100 пФ (результатирующее напряжение ниже опорного напряжения SR THRESHOLD), то устройство будет считать вывод SR «открытым» и воспримет это как отсутствие МОП-транзистора. Если емкость обнаруживается как превышающая 100 пФ (полученное напряжение выше опорного напряжения SR THRESHOLD), то контроллер разрешает работу драйвера.

Если выясняется, что вывод SR разомкнут, то вторичная сторона контроллера LYTSwitch-6 для инициирования автоматического перезапуска прекратит запрашивать импульсы от первичной стороны. Если при запуске вывод SR привязан к «земле», то функция управления драйвером синхронного выпрямителя, как и режим защиты по выходу SR, будут отключены. Такой вариант используется в практическом примере применения контроллера LYTSwitch-6, который был представлен в [1].

Дополнительная интересная и часто весьма полезная функция, встроенная в контроллер LYTSwitch-6, — это подавление акустического (слышимого) шума. Для его устранения контроллер (через режим работы с пропуском частоты) избегает резонансной полосы (где механическая структура источника питания, скорее всего, будет резонировать, что приведет к увеличению уровня шума) между 5 и 12 кГц — период 200 мс и 83 мс соответственно. Если запрос с вторичной стороны контроллера происходит в этом окне относительно последнего цикла включения, то драйвер затвора силового ключа блокируется.

Алгоритм установления связи между первичной и вторичной сторонами представлен на рис. 7. Его детальное описание приведено в [2].

Когда первичная сторона начала управление силовым ключом после включения (подачи питания на преобразователь) или после сбоя в линии электроснабжения, а также после вызванного тем или иным описанным выше событием, которое привело к автоматическому перезапуску, она примет управление на себя и, чтобы передать управление вторичной стороне контроллера, потребует успешного установления связи.

В качестве дополнительной меры безопасности управление первичной стороны устройства перед началом коммутации силового ключа будет приостановлено на время выдержки до автоматического перезапуска t_{AR} (примерно 82 мс). В течение этого времени ожидания первичная сторона будет «прослушивать» запросы от вторичной стороны. Если она увидит два последовательных запроса, разделенных паузой в 30 мс, то первичная сторона переходит на управление по вторичной стороне и начинает процесс импульсного преобразования энергии в подчиненном режиме (slave mode). Если в течение периода ожидания t_{AR} генерация

таких импульсов не происходит, то первичная сторона начнет функционировать под своим управлением. Этот режим продолжится до тех пор, пока не будут получены импульсы установления связи.

Режим интеллектуального квазирезонансного преобразования мощности

Для повышения эффективности преобразования и снижения потерь при переключении контроллер LYTSwitch-6 имеет средство для принудительного переключения, когда напряжение на силовом ключе его первичной стороны близко к его минимальному напряжению, то есть когда преобразователь работает в режиме прерывистой проводимости (DCM). Этот режим работы автоматически включается в режиме DCM и отключается, когда преобразователь переходит в режим непрерывной проводимости (CCM).

Вместо того чтобы контролировать намагничивание сердечника трансформатора и звон (в данном случае переходный процесс, сопровождающий включение силового ключа обратного преобразователя, [1]) на первичной стороне для управления вторичным запросом, чтобы инициировать цикл включения ON силового ключа первичной стороны контроллера LYTSwitch-6, используется пиковое напряжение на входе FWD вторичной стороны контроллера, когда оно поднимается выше уровня выходного

напряжения. Схему управления вторичной стороны контроллер определяет, когда входит в режим прерывистой проводимости, и открывает окна запроса вторичного цикла, соответствующие минимальному напряжению переключения на силовом ключе первичной стороны.

Квазирезонансный (QR) режим включается в течение 20 мс после обнаружения режима DCM или амплитуды звона, превышающей 2 В (п-п). После этого QR-переключение отключается и может происходить в любой момент, когда иницируется вторичный запрос. Схема управления на вторичной стороне контроллера LYTSwitch-6 имеет блокировку примерно в 1 мс, чтобы предотвратить ложное обнаружение первичного цикла ON, когда на входе FWD переходный процесс в виде звона будет ниже уровня «земли». Временная диаграмма интеллектуального квазирезонансного импульсного режима контроллера LYTSwitch-6 приведена на рис. 8.

Проектирование устройств на базе контроллеров семейства LYTSwitch-6

Для проектирования компания Power Integrations рекомендует разработанный ею программный инструмент PIXls Designer. Программное обеспечение является частью пакета ПО для проектирования PI Expert, которое можно загрузить по ссылке [5].

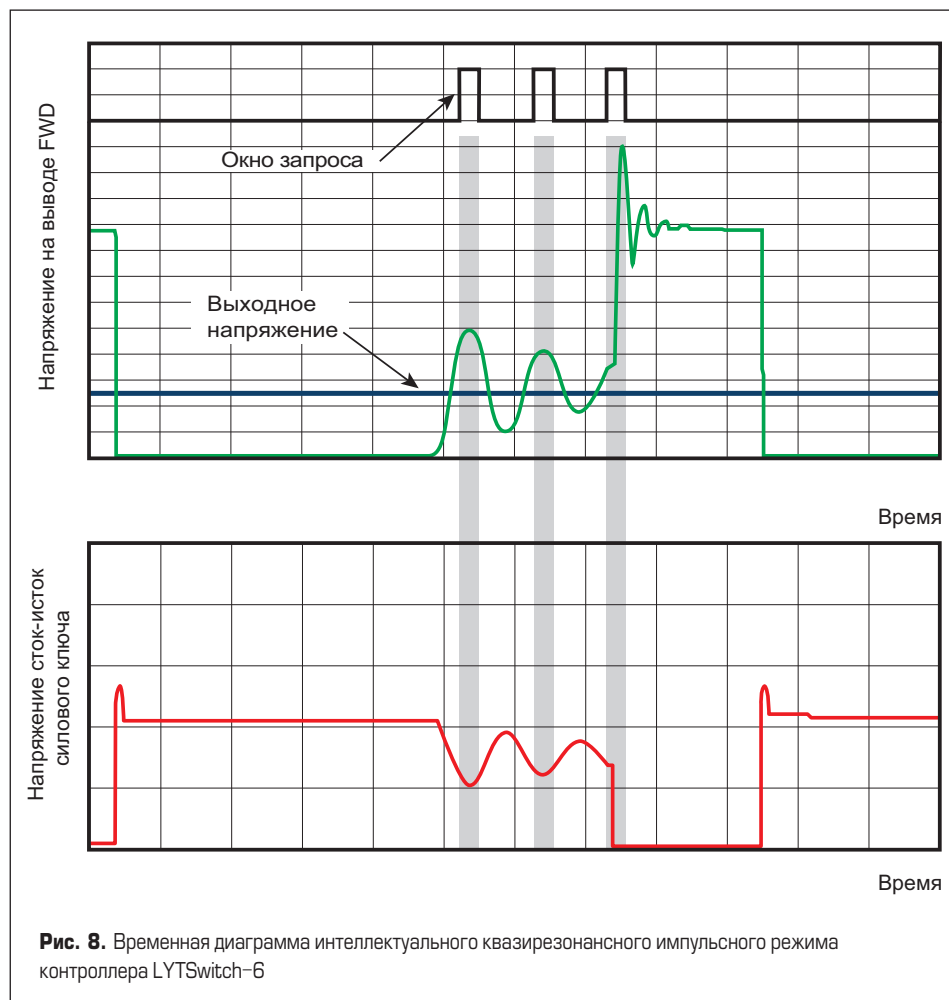


Рис. 8. Временная диаграмма интеллектуального квазирезонансного импульсного режима контроллера LYTSwitch-6

Также по ссылке [6] доступна его онлайн-версия для разработки одноступенчатого импульсного AC/DC-преобразователя. Она также обеспечивает полную процедуру проектирования для выбора всех компонентов схемы.

Однако приложение PIXls Designer на основе электронных таблиц и его онлайн-версия, хотя это подчеркивают их разработчики, дают инженеру блока питания или драйвера светодиодов больший контроль в процессе проектирования — по опыту автора статьи, который работал еще с PI Expert 5.0, этот метод проектирования не совсем удобен, поскольку начисто лишен какой-либо визуализации. Но именно он дает полные электрические и конструктивные данные для обратноходового трансформатора, и поэтому имеет смысл им воспользоваться. Имеющаяся онлайн версия, хотя она и простая, имеет возможность интерактивного калькулятора. Помочь разобраться во всем этом хитросплетении поможет пример расчета (в том числе пошаговый), приведенный в [7], который начинается с ввода переменных конкретного приложения и выбора типа контроллера.

Что касается контроллера LYTSwitch-6, то на начальном этапе его освоения будет весьма полезным изучить практический вариант проектирования выполненного на его основе универсального светодиодного драйвера с корректором коэффициента мощности, который приведен в его технической спецификации (datasheet) [2]. Именно эта схема была взята в качестве примера в [1]. В этой публикации

также рассмотрены проблемы отвода тепла от микросхем, выполненных в корпусах InSOP-24D, и ряд других вопросов, общих для контроллеров семейств InnoSwitch3 и LYTSwitch-6 с использованием GaN-транзисторов в качестве силовых ключей первичной стороны обратноходовых преобразователей.

Заключение

Технология, используемая в новых контроллерах LYTSwitch-6, выполненных на основе силового ключа PowiGaN, эффективна, надежна и проста в применении. Микросхемы LYTSwitch-6 радикально упрощают разработку и производство драйверов для светодиодов в компактных корпусах и/или с требованиями высокой эффективности. Они сочетают все преимущества с точки зрения гальванической развязки, безопасности и компактности, использованных ранее в семействах InnoSwitch3, описанных в [1], и идеально подходят для областей деятельности, в которых решающее значение для конечного продукта имеют высокие эффективность, надежность и стойкость в сочетании с малым числом внешних элементов и компактным размещением.

Дополнительно вы можете обратиться к целому ряду практических примеров решений преобразователей, выполненных на основе новых серий контроллеров LYTSwitch-6, которые уже представлены на сайте www.power.com, — например, 100-Вт светодиодный балласт с диммингом [8].

Литература

1. Рентюк В., Жеухин А. Интеграция GaN в контроллеры AC/DC-преобразователей — путь к повышению эффективности // Силовая электроника. 2019. № 6.
2. LYTSwitch-6, Flyback CV/CC LED Driver IC with Integrated High-Voltage Switch and FluxLink Feedback, Rev. I, Power Integrations, November 19. <https://led-driver.power.com/products/lytswitch-family/lytswitch-6/>
3. Простое обратноходовое преобразование — технология преобразования FluxLink от компании Power Integrations. www.macrogroup.ru/prostoe-obratnohodovoe-preobrazovanie-tehnologiya-preobrazovaniya-fluxlink-ot-kompanii-power
4. PowiGaN Technology. www.ac-dc.power.com/technologies/powigan-technology/
5. www.power.com/en/design-support/pi-expert-design-software
6. www.piexpertonline.power.com.
7. Application Note AN-75, LYTSwitch-6 Family, Design Guide, Power Integrations, January 2019. www.led-driver.power.com/sites/default/files/product-docs/an-75_lytswitch-6_design_guide.pdf
8. DER-801- 100 W 2-Stage Boost and Isolated Flyback Dimmable LED Ballast using HiperPFS-4 and LYTSwitch-6 led-driver. Design Example. Power Integrations, Rev.1.2, 04-Dec-19. www.led-driver.power.com/sites/default/files/product_document/design_example/der-801_100w_2stage_boost_and_isolated_flyback_dimmable_led_ballast.pdf