КАК РЕШИТЬ ПРОБЛЕМУ ПЕРЕСКОКА ВПАДИН В КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

СТЕФАНИ КАННЕНТЕРРЕ (STEPHANIE CANNENTERRE), ON Semiconductor

В статье описан метод решения проблемы перескока впадин между импульсами в квазирезонансных источниках питания, в результате чего возникает нестабильность работы и низкочастотный шум в трансформаторе. Новый подход позволяет улучшить эффективность и стабильность работы источника питания. Статья представляет собой перевод [1].

Резонансные преобразователи с квазипрямоугольными импульсами, известные как квазирезонансные преобразователи, позволяют проектировать обратноходовые импульсные источники питания с пониженным уровнем электромагнитных помех и улучшенной эффективностью при полной нагрузке. Однако поскольку частота переключения увеличивается с уменьшением нагрузки, необходимо ограничивать уход частоты, чтобы предотвратить дополнительные потери на переключение. В обычных квазирезонансных контроллерах предусмотрена фиксация частоты, чтобы ограничить ее изменение. Когда частота переключения в системе достигает предельного значения, происходит перескок впадин между импульсами (valley jumping): контроллер начинает колебаться между двумя состояниями, что приводит к нестабильной работе и появлению низкочастотного шума в трансформаторе.

Новый способ решения этой проблемы заключается в постепенном снижении частоты переключения путем смены впадин между импульсами при уменьшении нагрузки. Выбрав впадину, контроллер фиксируется в этом положении до тех пор, пока выходная мощность существенно не изменится. Данный метод блокировки впадины недавно был предложен компанией ON Semiconductor.

В статье обсуждается природа перескока впадин и рассматривается метод блокировки впадины как способ решения этой проблемы. Рассматривается также пример практического воплощения этого метода и экспериментальные результаты, которые подтверждают анализ.

СИГНАЛЫ С КВАЗИПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Резонансные источники питания с квазипрямоугольными импульсами, которые обычно называют квазирезонансными источниками питания, широко используются в адаптерах питания ноутбуков или блоках питания телевизоров. Главной особенностью такой схемы является работа в режиме переключения при нулевом напряжении (zero voltage switching, ZVS), что позволяет снизить потери на переключение и уменьшить уровень электромагнитных помех. Работа в режиме ZVS достигается путем включения MOSFET сразу после завершения размагничивания трансформатора на минимуме собственных колебаний, вызванных резонансом в LC-цепи на стоке транзистора (отсюда и возник термин «переключение впадин»). Эта цепь состоит из индуктивности первичной обмотки L_P и паразитной емкости на стоке C_{LUMP}.

Частота переключения квазирезонансного источника питания может существенно меняться в зависимости от условий нагрузки на входе и выходе. К сожалению, частота переключения увеличивается при уменьшении нагрузки, что приводит к снижению эффективности из-за роста потерь на переключение. Чтобы улучшить эффективность при малой нагрузке, необходимо найти способ, с помощью которого можно было бы зафиксировать частоту переключения.

КЛАССИЧЕСКИЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Традиционные квазирезонансные преобразователи содержат таймер, который не позволяет частоте собственных колебаний превысить предельного значения. Предельное значение частоты, как правило, фиксируется на уровне 125 кГц, т.е. ниже минимальной нормы в 150 кГц, определенной в стандарте CISPR-22 для электромагнитных помех. На рисунке 1 показана упрощенная блок-схема контроллера с 8-мкс таймером для фиксации частоты переключения.

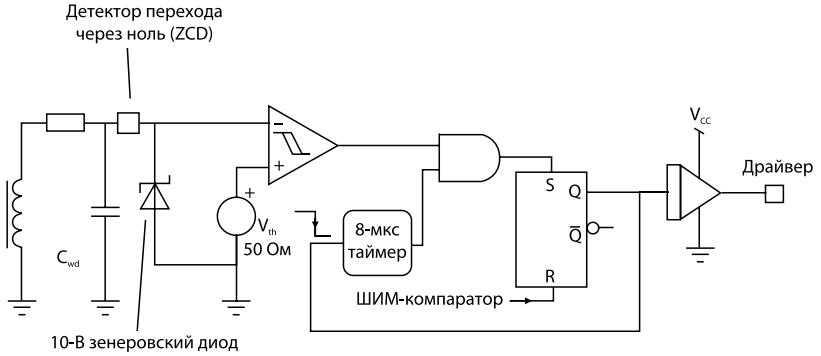
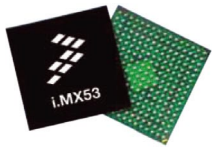


Рис. 1. **Блок-схема классического квазирезонансного контроллера**

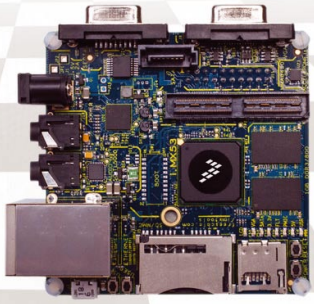
freescale semiconductor

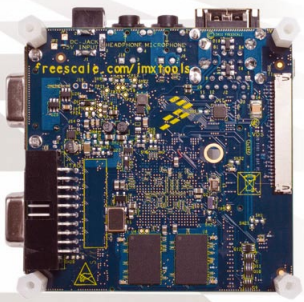
Процессор i.MX53 от Freescale – ваш проводник в мир мультимедиа



iMX53 Quick Start – функциональная платформа с оптимальной ценой

149 долларов без НДС





iMX53 SABRE – полноценная платформа для планшетных устройств

процессор i.MX53,
10-дюймовый мультитач-дисплей,
GPS-приемник, WiFi, Bluetooth,
ZigBee, встроенные датчики,
USB, SATA, слот для SD карточек

1499 долларов без НДС

freescale@symmetron.ru

Симметрон
ГРУППА КОМПАНИЙ

Москва (495) 797-5545
moscow@symmetron.ru

Санкт-Петербург (812) 449-4000
spb@symmetron.ru

Новосибирск (383) 361-3424
sibir@symmetron.ru

Киев +38 (044) 239-2065
kiev@symmetron.ua

Харьков +38 (057) 750-8022
kharkov@symmetron.ua

Минск +375 (17) 336-0606
minsk@symmetron.ru

www.symmetron.ru

Чтобы включить MOSFET, необходимо не только детектировать впадину между импульсами с помощью компаратора детектора перехода через нулевой уровень (Zero-Crossing Detection, ZCD), но и дождаться момента срабатывания таймера, которое произойдет через 8 мкс (см. рис. 2). Если впадина между импульсами попадает в 8-мкс интервал времени, то происходит блокировка включения MOSFET. Поэтому время нахождения мощного MOSFET в выключенном состоянии может меняться только на дискретные интервалы периода собственных колебаний преобразователя.

При низком входном напряжении и значительной выходной нагрузке время размагничивания трансформатора увеличивается и начинает превышать 8 мкс: контроллер включит MOSFET в 1-й впадине. Однако при уменьшении энергопотребления время размагничивания уменьшается, и когда оно становится меньше 8 мкс, частота фиксируется. В этом случае считается, что сердечник трансформатора восстанавливается (т.е. ток во вторичной цепи достигает нуля, и внутреннее магнитное поле обнуляется) до того, как 8-мкс таймер закончит счет. 8-мкс интервал времени блокирует включение MOSFET, и некоторые впадины между импульсами пропускаются. Если выходная мощность имеет такой уровень, что время отключения, необходимое для сохранения энергетического баланса, попадает на интервал между двумя соседними впадинами, источник питания работает с неодинаковым циклом переключения — это и называется перескоком впадин. Более длительный цикл переключения компенсируется более коротким циклом переключения, и наоборот. Из рисунка 3 видно, что два или три цикла первого переключения впадин следуют за одним циклом второго переключения. Явление перескока впадин создает широкую вариацию частоты переключения, которая компенсируется большими скачками пикового тока. Эти скачки тока вызывают низкочастотный шум в трансформаторе.

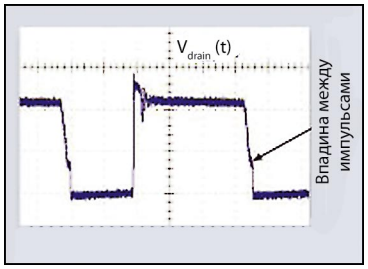


Рис. 2. **MOSFET включается во впадине между импульсами**

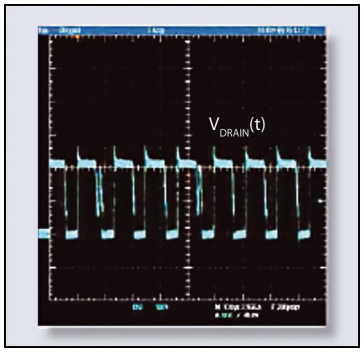


Рис. 3. **Перескок впадин: контроллер колеблется между двумя соседними впадинами**

Таким образом, фиксирование частоты переключения устраняет нестабильность только при невысокой высокой нагрузке, но не улучшает эффективность работы в таких условиях. Поэтому в классических квазирезонансных преобразователях фиксацию частоты используют совместно либо со схемой пропуска цикла, либо со схемой понижения частоты (frequency foldback).

ПОНИЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ

В общем случае схема понижения частоты представляет собой генератор, управляемый напряжением, который уменьшает частоту переключения, когда происходит фиксация частоты (см. рис. 4). Со снижением рабочей частоты потери на переключение также уменьшаются, и эффективность улучшается при малой нагрузке. Однако в режиме понижения частоты момент включения MOSFET все еще синхронизирован с детектированием впадины между импульсами: контроллер колеблется между двумя соседними впадинами, и происходит перескок между ними, что опять же приводит к возникновению низкочастотного шума в квазирезонансном источнике питания.

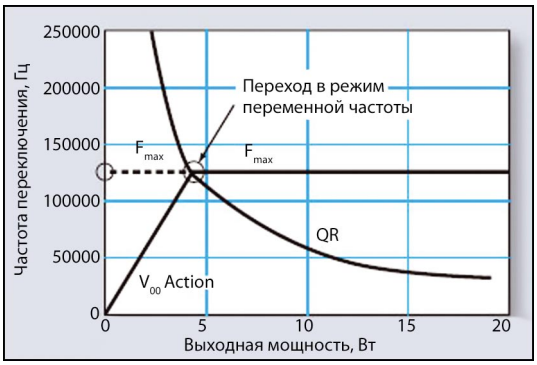


Рис. 4. **Квазирезонансный режим с понижением частоты**

Другим ограничением данного метода является выбор минимальной частоты при полной нагрузке и пониженном входном напряжении. Действительно, фиксация частоты вынуждает выбирать низкую минимальную частоту, которая должна быть выше диапазона звуковых частот (обычно около 30 кГц). Из-за необходимости выбора такой низкой минимальной частоты величину индуктивности первичной обмотки следует увеличивать, чтобы обеспечить необходимую выходную мощность. Следовательно, размеры трансформатора также увеличиваются.

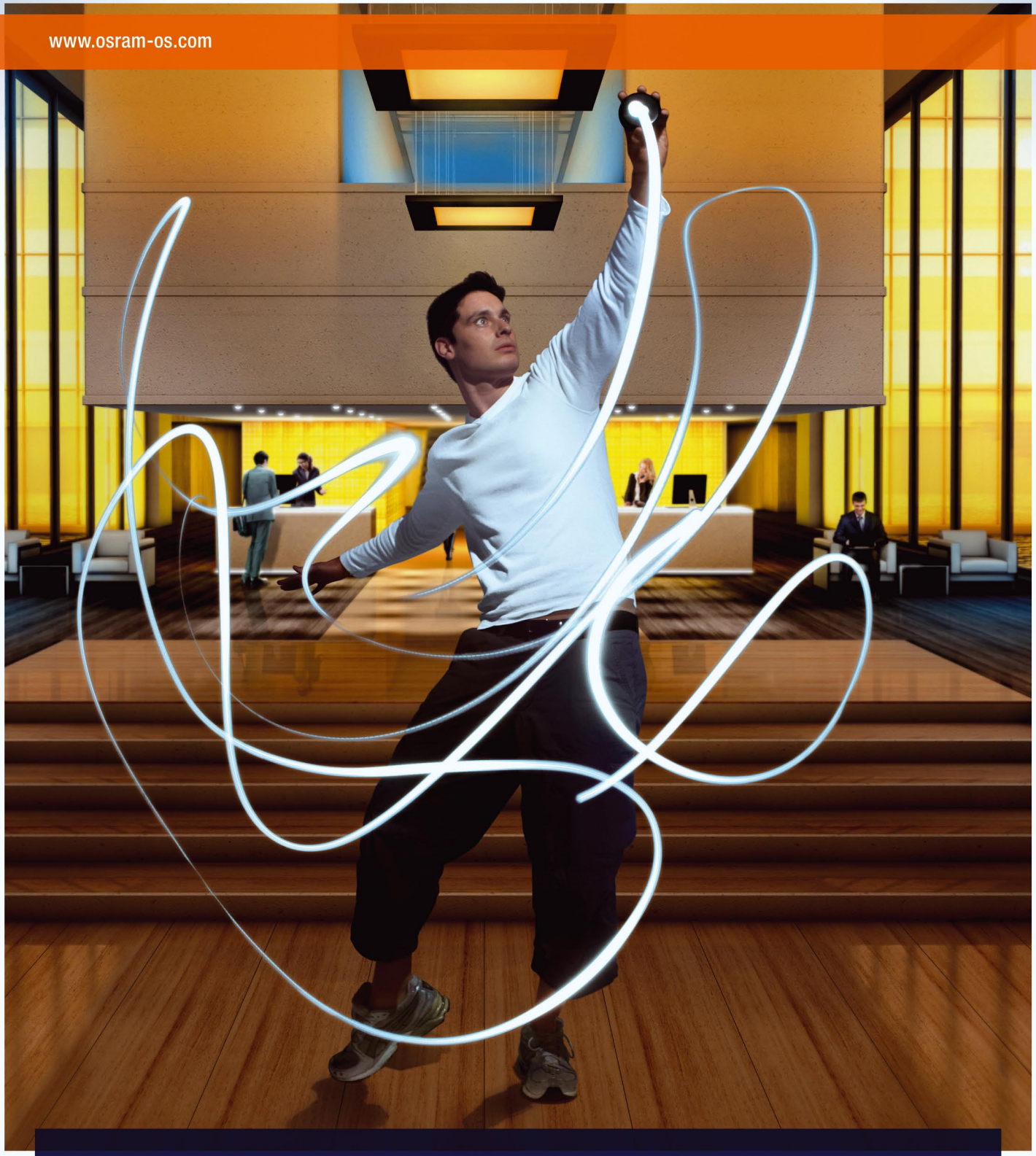
РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕСКОКА МЕЖДУ ВПАДИНАМИ

Новое решение проблемы устранения перескока между впадинами заключается в смене одного положения впадины на соседнее (следующее или предыдущее) при изменении нагрузки на выходе и фиксации контроллера в выбранном положении впадины. Этот метод называется блокировкой впадины (valley lockout). Выбрав впадину, контроллер фиксируется в ней до тех пор, пока выходная мощность существенно не изменится. Слежение за изменением выходной мощности осуществляется с помощью мониторинга напряжения обратной связи V_{FB}. Для подсчета и выбора впадин необходим счетчик. Блокировка впадины реализуется с помощью выбора источником питания одного из двух рабочих режимов для данной выходной нагрузки. Поэтому когда выходная нагрузка имеет такую величину, что время паузы, необходимое для сохранения энергетического баланса, попадает на момент между соседними впадинами, допускается увеличение пикового тока, чтобы найти стабильную рабочую точку в соседней впадине. Для любой величины выходной нагрузки имеется соответствующая рабочая точка в двух соседних впадинах (см. рис. 5).

Благодаря такому подходу пропадает нестабильность, связанная с перескоками впадин, и исчезает низкочастотный шум в трансформаторе.

Другой особенностью данного метода является то, что он обеспечивает естественное ограничение частоты переключения. Действительно, каждый раз, когда контроллер выбирает впадину, частота уменьшается дискретно, как показано на рисунке 6. Уменьшение

www.osram-os.com



LEDs for General Lighting Solutions

OSRAM Opto Semiconductors empowers lighting solutions for today and tomorrow

OSRAM
Opto Semiconductors

частоты определяется периодом свободных колебаний:

$$t_V = 2\pi\sqrt{L_P C_{LUMP}},$$

где L_P — индуктивность первичной обмотки, а C_{LUMP} — суммарная паразитная емкость на стоке мощного MOSFET (C_{OSS}, емкость трансформатора и др.).

На рисунке 6 показано изменение частоты переключения адаптера питания, использующего контроллер с блокировкой впадины, например, такой как NCP1380 компании ON Semiconductor. Для входного напряжения 115 B_{RMS} частота переключения меняется между значениями 65 и 95 кГц без применения каких-либо схем фиксации частоты.

Другим преимуществом этого метода является оптимизация эффективности в диапазоне изменения нагрузки/входного напряжения, особенно при высоком входном напряжении. При высоком входном напряжении режим переключения при нулевом напряжении пропадает — потери на переключение возрастают. Поэтому целесообразнее было бы работать, например, во 2-й, а не в 1-й впадине, или в 3-й, а не во 2-й впадине, чтобы дать возможность источнику питания переключаться с меньшей частотой. Этот случай проиллюстрирован на рисунке 7, на котором показано отклонение эффективности при изменении выходной мощности в диапазоне 24–34 Вт в зависимости от того, работает контроллер в 3-й или 4-й впадине. Включение MOSFET в 4-й впадине вместо 3-й обеспечивает рост эффективности на 0,3%. Частота переключения в 4-й впадине на 15 кГц ниже, чем в 3-й впадине.

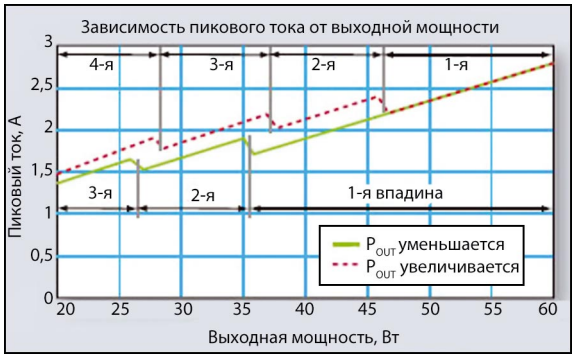


Рис. 5. **Для любой величины выходной нагрузки имеется соответствующая рабочая точка в двух соседних впадинах**

Рис. 6. **Зависимость частоты переключения от выходной мощности в контроллере с блокировкой впадины**

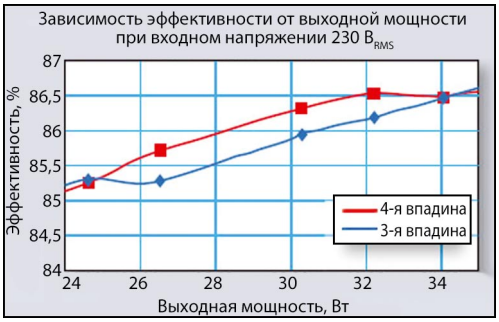


Рис. 7. **Изменение эффективности при различной выходной мощности при работе контроллера в 3-й и 4-й впадине**

РЕАЛИЗАЦИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

Метод блокировки впадины был реализован в микросхемах NCP1379 и NCP1380 — квазирезонансных контроллерах производства ON Semiconductor. В этих микросхемах блок компараторов отслеживает напряжение на выводе обратной связи и передает данные в счетчик. Гистерезис на каждом из компараторов блокирует рабочую впадину между импульсами. Таким образом, для данной выходной мощности имеются два возможных рабочих режима: это обеспечивает стабильную работу без перескоков впадин. Чтобы еще повысить эффективность при низкой нагрузке, используется схема понижения частоты на базе генератора, управляемого напряжением, которая уменьшает частоту переключения при уменьшении выходной мощности. На рисунке 8 показана принципиальная схема 19-В 60-Вт квазирезонансного адаптера питания, управляемого NCP1380.

Благодаря блокировке впадины контроллер меняет рабочую впадину (с 1-й до 4-й) при уменьшении нагрузки, не проявляя какой-либо нестабильности. Это позволяет расширить рабочий диапазон в квазирезонансном режиме до 20 Вт при входном напряжении 230 BRMS. Осциллограммы на рисунках 9—12 показывают работу контроллера в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й впадине при выходной мощности 60, 45, 30 и 24 Вт, соответственно, для входного напряжения 230 BRMS. Как видно из рисунков, каких-либо перескоков впадин не наблюдается.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Блокировка впадины позволяет оптимизировать эффективность в диапазоне изменения линейного напряжения/нагрузки и улучшает общую эффективность, как показано в таблицах 1—2.

Как видно из них, при V_{IN} = 115 B_{RMS} средняя эффективность составляет 87,9%. При V_{IN} = 230 BRMS средняя эффективность составляет 87,7%, что выше предельной величины в 87%, установленной программой Energy Star стандарта EPA 2.0.

При низкой нагрузке на выходе эффективность повышается в большей мере с помощью схемы понижения частоты. В этом режиме частота переключения уменьшается при уменьшении нагрузки, минимизируя, таким образом, потери на переключение. Если выходная мощность очень мала, пиковый ток фиксируется на 17,5% от его максимально-

КОМПЛЕКТНЫЕ ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

www.zolshar.ru

3M
ACW
Abracus Electronics
Accsha
Acme
AD
ADC
Advantech
AEL CRYSTALS
AGI
AGILAVA
Bergquist
Bestar Electric
BETLER
BFI Optilas
B
B Technical
BLOCK UK
BNZ
BomarCC
Bopla
BOURNS
Cooler Master
COPAL
Cupid Electronics In
Cornell Dubilier
Cosmo
CPT
CRC
CRE
CRYDOM
CTS
CVILUX
Dragon City
DS
DSG-CANUSA
E2V
EBM-PAPST
ECE
Echelon
ECS Inc
Eemron
EIA
EIAW ELECTRONIC
EVANS
Everzod
Everlight
EXAR Corp
Excelitas
Technologies
EYE
FAGOR
ELECTRONICA
FAI
Fairchild
FORWARD
FOX
Fox Electronics
FRAEN
Corporation
FRANKONIA
Freescale
FUNKUANG
FSC
FTDI
Fuji
ВЗПП-С
Восход
Исеть
Интеграл
Кремний
Кулон
Мезон
НЗПП
Светлана
Элеконд
ATC
Atmel
AVX
Bergquist
Holt
Huber+suhner
Samtec
Vishay
Wima
IRF

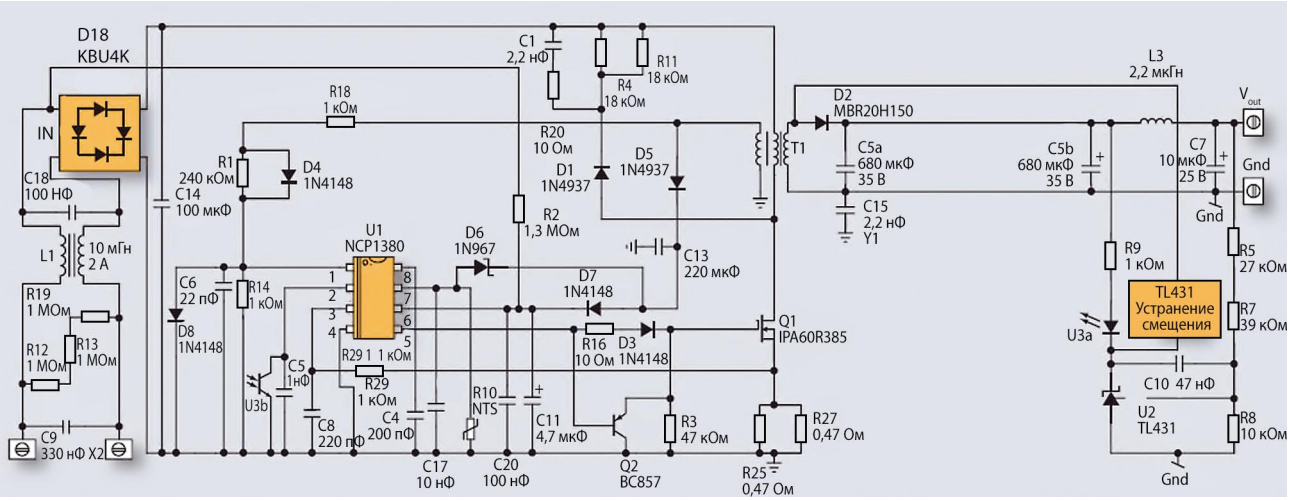


Рис. 8. **Принципиальная схема 60-Вт адаптера питания на базе NCP1380**

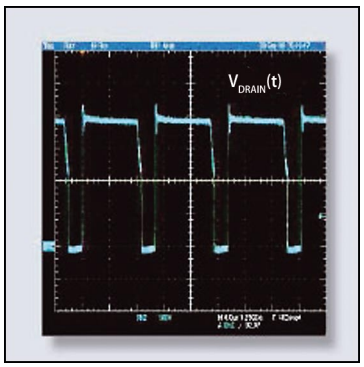


Рис. 9. **Работа контроллера в 1-й впадине при выходной мощности 60 Вт и входном напряжении 230 $В_{RMS}$**

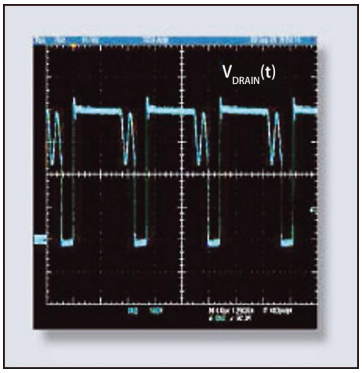


Рис. 10. **Работа контроллера во 2-й впадине при выходной мощности 45 Вт и входном напряжении 230 $В_{RMS}$**

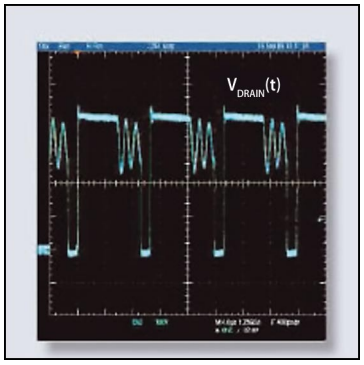


Рис. 11. **Работа контроллера в 3-й впадине при выходной мощности 30 Вт и входном напряжении 230 $В_{RMS}$**

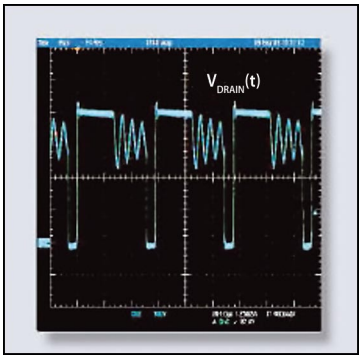


Рис. 12. **Работа контроллера в 4-й впадине при выходной мощности 24 Вт и входном напряжении 230 $В_{RMS}$**

го значения, что уменьшает частоту переключения до весьма низких значений. Например, в 60-Вт адаптере частота переключения составляет примерно 31 кГц при P_{OUT} = 10 Вт и падает до 5 кГц при выходной мощности 1 Вт. Если к плате не подсоединена нагрузка на выходе, частота переключения составляет примерно 340 Гц. При выходной мощности 0,7 Вт потребляемая адаптером из сети мощность много ниже 1 Вт. В таблице 3 приведены данные об эффективности при низкой нагрузке, а в таблице 4 — о потребляемой мощности без нагрузки.

Снижая частоту переключения, схема понижения частоты также уменьшает и мощность, рассеиваемую адаптером в дежурном режиме (т.е. когда к адаптеру не подключена нагрузка на выходе). При входном напряжении 230 $В_{RMS}$ адаптер потребляет всего 85 мВт из сети (включая разряжающий резистор конденсатора X2), что является выдающимся результатом для контроллера без высоковольтной схемы запуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные квазирезонансные контроллеры подвержены т.н. перескокам впадин между импульсами, что

Таблица 1. **Эффективность при входном напряжении 115 В**

Выходная мощность		V_{IN} = 115 $В_{RMS}$	
POUT, Вт	POUT, %	Эффективность, %	Рабочий режим
60,6	100	88,3	квазирезонансный, 1-я впадина
45,5	75	88,7	квазирезонансный, 1-я впадина
30,3	50	88,2	квазирезонансный, 2-я впадина
15,2	25	86,4	квазирезонансный, 4-я впадина

Таблица 2. **Эффективность при входном напряжении 230 В**

Выходная мощность		V_{IN} = 230 $В_{RMS}$	
POUT, Вт	POUT, %	Эффективность, %	Рабочий режим
60,6	100	89,1	квазирезонансный, 1-я впадина
45,5	75	88,4	квазирезонансный, 2-я впадина
30,3	50	87,3	квазирезонансный, 3-я впадина
15,2	25	86,1	понижение частоты

Таблица 3. **Эффективность при низкой нагрузке**

P_{OUT}, Вт	V_{IN} = 115 $В_{RMS}$		V_{IN} = 230 $В_{RMS}$	
	P_{IN}, Вт	Эффективность, %	P_{IN}, Вт	Эффективность, %
1,0	1,290	77,6	1,340	74,6
0,7	0,923	75,9	0,965	72,2
0,5	0,678	73,8	0,720	69,6

Таблица 4. **Потребляемая мощность без нагрузки**

P_{OUT}, Вт	V_{IN} = 115 $В_{RMS}$	V_{IN} = 230 $В_{RMS}$
	P_{IN}, мВт	P_{IN}, мВт
0	59	85

создает неравномерность циклов переключения и генерирует низкочастотный шум в трансформаторе. Перескок впадин происходит при определенных режимах входного напряжения/нагрузки, когда время паузы, необходимое для сохранения поциклового энергетического баланса, попадает между двумя соседними впадинами. Чтобы решить данную проблему, используется метод блокировки впадины. Он сводится к выбору источником питания одного из двух устойчивых режимов работы для данной выходной нагрузки. В результате не только удается избежать нестабильности, но с помощью генератора, управляемого напряжением, повысить суммарную эффективность. Результаты, полученные при измерении адаптера питания на базе контроллера NCP1380, подтвердили эффективность данного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stephanie Cannenterre. Solving The Valley Jumping Issue in Quasi Square Wave Resonant Power Supplies//powerelectronics.com.