

СИНХРОННЫЙ ПОНИЖАЮЩИЙ КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

SYNCHRONOUS STEP-DOWN CONTROLLER FOR GAN FETS

В статье приведена информация о структуре и особенностях работы в различных режимах контроллера для понижающих DC/DC-преобразователей на основе нитрид-галлиевых транзисторов. Показаны результаты анализа работы понижающего преобразователя в различных режимах.

В. Макаренко

Abstract – The article provides information about the structure and features of operation in various modes of the controller for step-down DC/DC converters based on gallium nitride transistors. The results of the analysis of the operation of the step-down converter in various modes are shown.

V. Makarenko

Применение нитрид-галлиевых транзисторов (GaN FETs) в DC/DC-преобразователях для различных приложений, усилителях мощности класса D, инверторах, системах беспроводной передачи мощности, лидарах и многих других приложениях с повышенной температурной и радиационной стойкостью значительно облегчается при использовании синхронного понижающего контроллера LTC7891, разработанного компанией Analog Devices.

Большая ширина запрещенной зоны GaN-транзисторов обеспечивает высокую стабильность параметров при изменении температуры или воздействии радиации, что чрезвычайно важно для устройств, работающих в жестких условиях эксплуатации. Эти факторы приводят к расширению областей применения таких транзисторов, а, следовательно, к необходимости создания устройств управления, позволяющих регулировать параметры таких устройств в широком диапазоне.

LTC7891 – это высокопроизводительный понижающий контроллер импульсного преобразователя постоянного тока, который позволяет управлять N-канальными нитрид-галлиевыми полевыми транзисторами при входных напряжениях преобразователей до 100 В [1]. LTC7891 решает многие проблемы, с которыми традиционно сталкиваются разработчики при использовании полевых транзисторов GaN. При использовании LTC7891 не требуются защитные диоды и другие дополнительные внешние компоненты по сравнению с полевыми транзисторами на основе оксида кремния (MOSFET), что приводит к упрощению конструкции преобразователей.

Функциональная схема LTC7891 приведена на рис. 1.

Пиковый ток через катушку индуктивности, при котором ICMP отключает и сбрасывает RS-триггер, регулируется напряжением на выводе ITH, который является выходом усилителя ошибок (EA). Усилитель ошибок сравнивает сигнал обратной связи по выходному напряжению на выводе V_{FB} (который генерируется с помощью внешнего резисторного делителя, подключенного к выходу преобразователя V_{OUT}) с внутренним опорным напряжением 0.8 В. Когда ток нагрузки увеличивается, это вызывает небольшое уменьшение напряжения на выводе V_{FB} относительно эталонного, что заставляет EA увеличивать выходное напряжение до тех пор, пока средний ток через катушку индуктивности не будет соответствовать новому току нагрузки.

Источники питания и смещения

(V_{IN} , $EXTV_{CC}$, DRV_{CC} и $INTV_{CC}$)

Через вывод $INTV_{CC}$ обеспечивается питание большей части внутренних схем LTC7891. Питание верхнего и нижнего драйверов полевых транзисторов осуществляется через вывод DRV_{CC} , который должен быть подключен к выводу $INTV_{CC}$ для подачи питания на драйверы клапанов. Линейные регуляторы LDO формируют напряжение как на выводе V_{IN} , так и на выводе $EXTV_{CC}$ для обеспечения необходимого напряжения на выводе $INTV_{CC}$, которое может быть запрограммировано от 4 В до 5,5 В подачей управляющего напряжения на вывод $DRVSET$. Когда на вывод $EXTV_{CC}$ подано напряжение ниже напряжения достаточного для переключения триггера Шмитта, регулятор V_{IN} LDO подает питание на вывод $INTV_{CC}$. Если значение напряжения на выводе $EXTV_{CC}$ превышает напряжение переключения триггера Шмитта, регулятор V_{IN} LDO выключается, а регулятор $EXTV_{CC}$ LDO включается. При включении регуля-

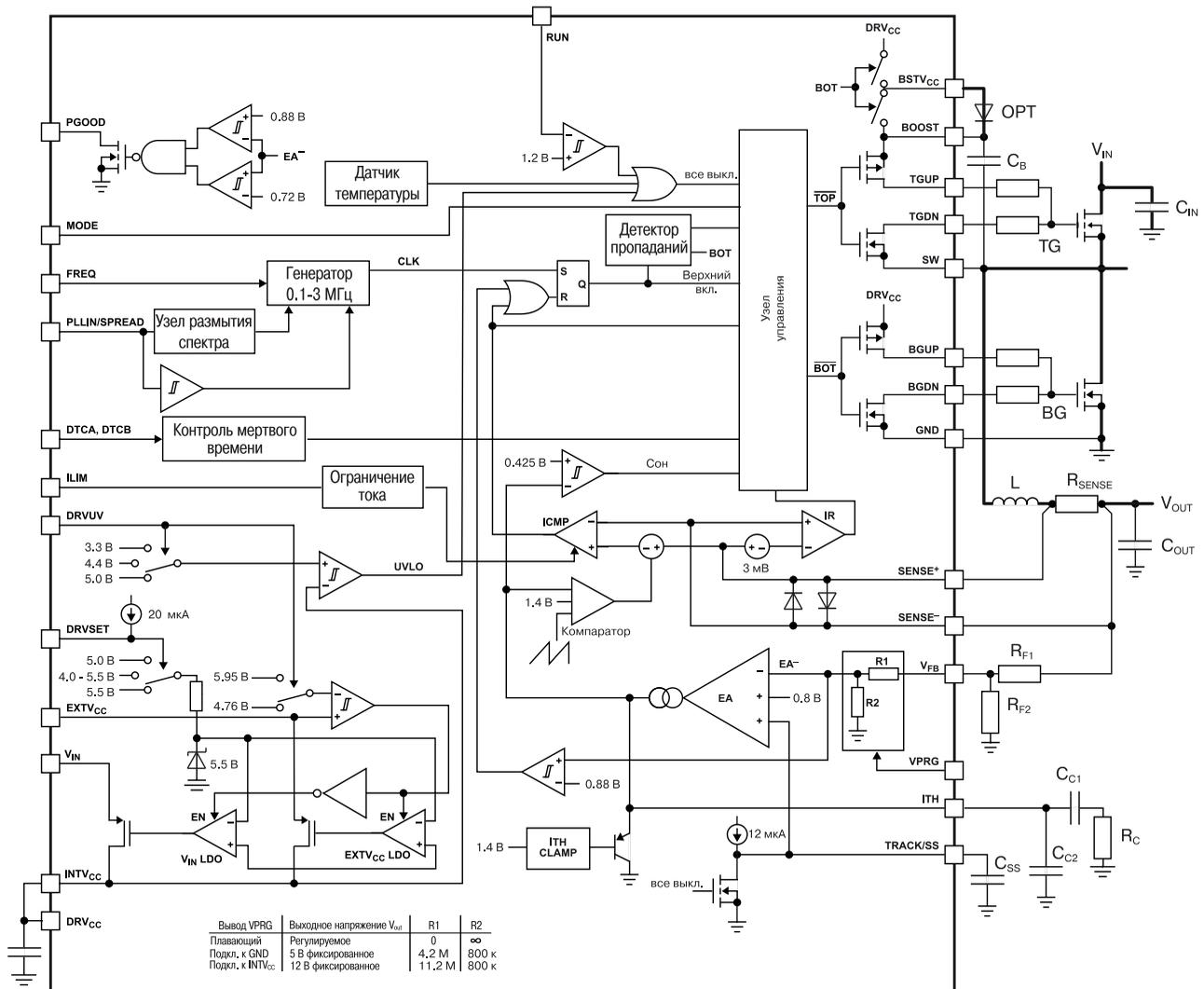


Рис. 1. Функциональная схема LTC7891

тор LDO EXTV_{CC} подает питание на INTV_{CC}. Использование вывода EXTV_{CC} позволяет получать питание INTV_{CC} от внешнего источника.

Конденсатор начальной загрузки

Драйвер верхнего полевого транзистора смещен напряжением плавающего нагрузочного конденсатора C_B , который обычно заряжается с помощью внутреннего переключателя через вывод BOOST от источника DRV_{CC} всякий раз, когда включается нижний полевой транзистор.

Внутренний переключатель имеет высокое сопротивление всякий раз, когда нижний полевой транзистор выключен, что предотвращает перезарядку нагрузочного конденсатора, когда на выводе SW напряжение падает ниже уровня нуля (GND) во время простоя. Если входное напряжение снижается до напряжения, близкого к выходному напряжению преобразователя, контур может перейти в ре-

жим отключения и попытаться непрерывно включать верхний полевой транзистор.

Детектор пропаданий обнаруживает это событие и заставляет верхний полевой транзистор выключаться, а нижний полевой транзистор включаться на короткое время каждый десятый цикл, чтобы позволить C_B перезарядиться, в результате чего рабочий цикл составляет 99% при работе на частоте 370 кГц и примерно 98% при работе на частоте коммутации ключей равной 2 МГц. Если напряжение на нагрузочном конденсаторе падает ниже 75% от напряжения INTV_{CC}, длительность импульсов обновления на выводе BOOST увеличивается примерно до величины равной длительности четырех нормальных циклов, что обеспечивает больший заряд C_B . Это приводит к несколько более коротким рабочим циклам при отключении.

Контроль времени простоя

(защитного интервала или мертвого времени)

Время простоя LTC7891 можно запрограммировать от близкого к нулю до 60 нс с помощью выводов DTCA и DTCB. Вывод DTCA программирует время простоя, связанное с выключением нижнего полевого транзистора и включением верхнего полевого транзистора, а вывод DTCB – время простоя, связанное с выключением верхнего полевого транзистора и включением нижнего полевого транзистора. Схема управления драйвера ожидает выключения нижнего полевого транзистора перед включением верхнего полевого транзистора. Адаптивное управление временем простоя приводит к тому, что оно составляет примерно 20 нс между моментом времени выключения нижнего полевого транзистора (BG) и моментом времени включения верхнего транзистора (TG).

Привязка вывода DTCB к GND активирует адаптивное управление временем простоя, что означает, что схема управления драйвера ожидает выключения верхнего полевого транзистора перед включением нижнего полевого транзистора. Адаптивное управление временем простоя приводит к тому, что время простоя составляет примерно 20 нс между закрытием транзистора TG и включением транзистора BG.

Привязка вывода DTCA к $INTV_{CC}$ активирует время простоя близкое к нулю, что уменьшает задержку между моментом включения верхнего транзистора и выключением нижнего почти до нуля. Включение резистора между выводом DTCA и GND увеличивает задержку между моментами переключения транзисторов с 7 до 60 нс.

Привязка вывода DTCB к $INTV_{CC}$ приводит к уменьшению задержки между моментом запирающего верхнего и отпирающего нижнего транзистора почти до нуля. Включение резистора между выводом DTCB и GND увеличивает это время с 7 до 60 нс.

Пуск и завершение работы (контакты RUN и TRACK/SS)

LTC7891 можно отключить подав управляющее напряжение на вывод RUN. Напряжение на этом выводе ниже 1.08 В приводит к отключению основного контура управления. При напряжении ниже 0.7 В отключается большинства внутренних узлов ИМС, включая регуляторы $INTV_{CC}$ LDO. В таком состоянии LTC7891 потребляет ток покоя всего 1 мкА.

Напряжение на выводе RUN не должно превышать значение 100 В. Момент включения выходного напряжения V_{OUT} определяется напряжением на вы-

воде TRACK/SS. Когда напряжение на выводе TRACK/SS меньше, чем внутреннее опорное напряжение 0.8 В на входе усилителя ошибок EA, LTC7891 регулирует напряжение V_{FB} до напряжения на выводе TRACK/SS вместо опорного напряжения 0.8 В. Этот метод позволяет использовать вывод TRACK/SS для плавного увеличения выходного напряжения при пуске, ограничивая пусковой ток входного источника питания. Внешний конденсатор, подключенный к выводу TRACK/SS заряжается от внутреннего источника тока 12 мкА, формируя напряжение на выводе TRACK/SS. Напряжение на выводе TRACK/SS линейно увеличивается и, как следствие, V_{OUT} плавно возрастает от нуля до своего конечного значения.

В качестве альтернативы, вывод TRACK/SS можно использовать для того, чтобы включить V_{OUT} другим источником питания. Для этого требуется подключить этот источник через делитель напряжения к выводу TRACK/SS.

Режимы малой нагрузки: пакетный режим работы, режим пропуска импульсов или принудительный непрерывный режим

LTC7891 можно настроить на переход в высокоэффективный пакетный режим работы, режим пропуска импульсов постоянной частоты или режим принудительной непрерывной проводимости при малых токах нагрузки.

Чтобы выбрать пакетный режим работы, необходимо подключить вывод MODE к общему проводу. Режим принудительной непрерывной работы реализуется при подключении вывода MODE к выводу $INTV_{CC}$. Чтобы выбрать режим пропуска импульсов, необходимо подключить вывод MODE к источнику постоянного тока с напряжением

$$1.2 \text{ В} < U_{\text{вых}} < U_{\text{INTVCC}} - 1.3 \text{ В}.$$

Когда контроллер включен для работы в пакетном режиме, минимальный пиковый ток в катушке индуктивности устанавливается примерно равным 25% от его максимального значения, даже несмотря на то, что напряжение на выводе ITH может иметь меньшее значение. Если средний ток катушки индуктивности превышает ток нагрузки, усилитель EA уменьшает напряжение на выводе ITH.

Когда напряжение на выводе ITH падает ниже 0.425 В, включается режим ожидания и оба внешних полевых транзистора запираются. Затем вывод ITH отключается от выхода усилителя EA и на нем устанавливается напряжение 0.45 В.

В спящем режиме большая часть внутренней схемы отключается, уменьшая ток покоя, потребляемый LTC7891, до 15 мкА. Ток нагрузки обеспечивается выходным конденсатором. При уменьшении выходного напряжения вывод ITH подключается к усилителю ошибки EA и возобновляется нормальная работа контроллера.

Когда контроллер включен для работы в пакетном режиме, ток катушки индуктивности не может изменить свой знак. Контроллер запирает нижний полевой транзистор перед тем, как ток через катушку индуктивности достигнет нуля, предотвращая изменение его знака. Таким образом, контроллер работает в прерывистом режиме.

При принудительной непрерывной работе ток катушки может изменяться на обратный при небольших токах нагрузках или в переходном режиме. Пиковый ток катушки определяется напряжением на выводе ITH, как и при нормальной работе. В этом режиме эффективность при небольших нагрузках ниже, чем при работе в пакетном режиме. Однако непрерывная работа имеет преимущество в виде более низких пульсаций выходного напряжения и меньшего уровня создаваемых помех, что особенно существенно для систем звукоусиления.

В принудительном непрерывном режиме пульсации на выходе не зависят от тока нагрузки. В режиме пропуска импульсов LTC7891 работает в режиме с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) при небольших нагрузках. В этом режиме поддерживается постоянная частота коммутации транзисторов, а верхний полевой транзистор может оставаться закрытым в течении нескольких циклов, т.е. на его затворе отсутствуют импульсы управления.

В этом режиме обратный ток через катушку не допускается. Этот режим, как и режим принудительной непрерывной работы, характеризуется низкими пульсациями выходного напряжения, а также низким уровнем шума в звуковом диапазоне и более низким уровнем радиочастотных помех по сравнению с работой в пакетном режиме. Режим пропуска импульсов обеспечивает более высокую эффективность при малых токах, чем принудительный непрерывный режим, но не такую высокую, как при работе в пакетном режиме.

В отличие от принудительного непрерывного режима и режима пропуска импульсов, работа в пакетном режиме не может быть синхронизирована с внешним генератором. Следовательно, если выбран пакетный режим и частота переключения синхронизирована с внешним тактовым сигналом, по-

данным на вывод PLLIN/SPREAD, LTC7891 переключается из пакетного режима в принудительный непрерывный режим.

Выбор частоты, расширение спектра и узел фазовой автоподстройки частоты

Частота переключения в свободном режиме контроллера LTC7891 выбирается с помощью резистора, подключенного к выводу FREQ. При соединении вывода FREQ с общим проводом частота коммутации транзисторов составляет 370 кГц, а при привязке вывода FREQ к выводу INTV_{CC} – 2.25 МГц. При включении резистора между выводом FREQ и общим проводом можно задавать частоту в диапазоне от 100 кГц до 3 МГц.

Для снижения уровня электромагнитных помех (ЭМП) LTC7891 может работать в режиме расширенного спектра, который включается путем подключения вывода PLLIN/SPREAD к INTV_{CC}. Эта функция изменяет частоту переключения в пределах 20% от установленной по умолчанию.

Узел фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) используется для синхронизации внутреннего генератора с внешним источником синхронизации, подключенным к выводу PLLIN/SPREAD. ФАПЧ LTC7891 гарантированно синхронизируется с внешним источником синхронизации в диапазоне частот от 100 кГц до 3 МГц. Чувствительность входа PLLIN/SPREAD гарантированно обеспечивает надежную работу при колебании уровня внешнего тактового сигнала в диапазоне от 0.5 до 2.2 В.

Защита от перенапряжения на выходе

LTC7891 оснащен компаратором перенапряжения, который защищает от скачков напряжения в переходных режимах работы, а также от других факторов, которые могут вызвать перенапряжение на выходе. Когда напряжение на выводе VFB выше чем на 10% выше напряжения 0.8 В, верхний полевой транзистор отключается, и ток через катушку не может изменить свой знак.

Ограничение тока

Когда выходное напряжение падает ниже чем 70% от его номинального уровня, активируется функция ограничения тока, постепенно снижая пиковый ток пропорционально току нагрузки или короткого замыкания. Ограничение тока отключается во время интервала плавного пуска (до тех пор, пока напряжение VFB соответствует напряжению на выводе TRACK/SS).

Выбор датчика тока

LTC7891 может быть сконфигурирован для использования либо низкоомного резистора либо из-

мерения сопротивления постоянному току катушки индуктивности (DCR). Выбор между двумя схемами измерения тока является конструктивным компромиссом между стоимостью, энергопотреблением и точностью. DCR-датчик позволяет экономить на дорогостоящем токовом резисторе и является более энергоэффективным, особенно в приложениях со значительным током нагрузки. Однако резисторы, чувствительные к току, обеспечивают наиболее точные измерения тока.

Выходы SENSE+ и SENSE являются входами компаратора тока. Диапазон синфазных напряжений на этих выводах составляет от 0 до 65 В (абсолютный максимум), что позволяет LTC7891 регулировать выходное напряжение максимум до 60 В. Вывод SENSE+ имеет высокое входное сопротивление (ток входа не более 1 мкА). Этот высокий импеданс позволяет использовать компаратор тока для измерения постоянного тока с использованием катушки индуктивности.

Если используется DCR-датчик (рис. 2), резистор R1 должен располагаться близко к переключающему узлу, чтобы предотвратить влияние помех на чувствительные входы компаратора.

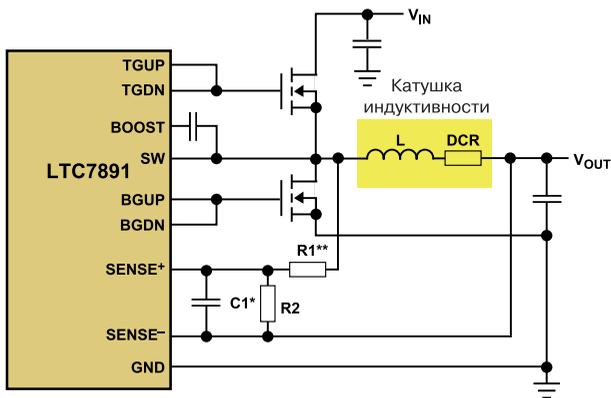


Рис. 2. Использование сопротивления катушки постоянному току (DCR) для измерения тока нагрузки

В [1] приведена формула для расчета катушки индуктивности, учитывающая входное и выходное напряжения, а также частоту коммутации ключей. Там же приведены рекомендации по выбору сердечника катушки индуктивности.

Выбор сопротивления резистора, определяющего частоту коммутации ключей можно сделать с помощью графика, приведенного на рис. 3.

Контроль времени простоя (выводы DTCA и DTCB)

Время задержки в режиме ожидания LTC7891

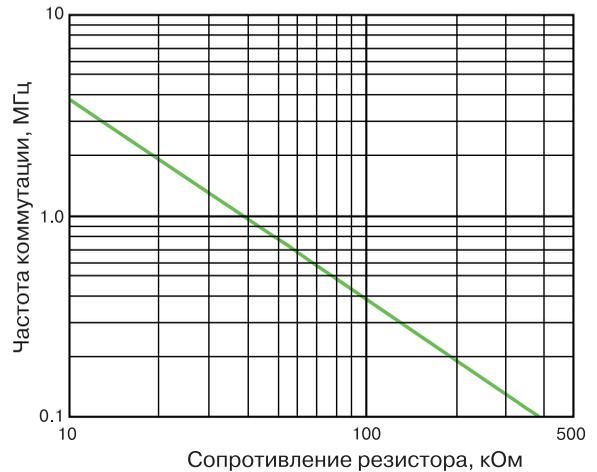


Рис. 3. График зависимости частоты коммутации силовых транзисторов от сопротивления резистора, включенного между выводом FREQ и общим проводом

можно регулировать от близкого к нулю до 60 нс путем настройки выводов DTCA и DTCB. При подключении выводов DTCx к общему проводу реализуется режим адаптивного управления временем простоя (рис. 4), а при подключении к INTV_{CC} – интеллектуальное управление временем простоя вблизи нуля.

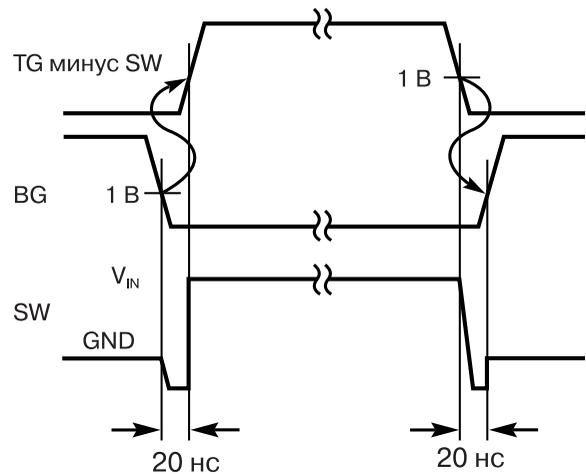


Рис. 4. Адаптивное управление временем простоя при подключении вывода DTCx к общему проводу

При соединении выводов DTCx через резисторы с общим проводом вывод DTCA определяет время простоя, связанное с выключением нижнего полевого транзистора и включением верхнего полевого транзистора (переход SW от низкого уровня к высокому). Вывод DTCB определяет время простоя, связанное с выключением верхнего полевого транзистора и включением нижнего полевого транзистора

(переход SW от высокого уровня к низкому).

На рис. 5 приведен график зависимости времени простоя от сопротивления резисторов, включенных между выводами DTCx и общим проводом.

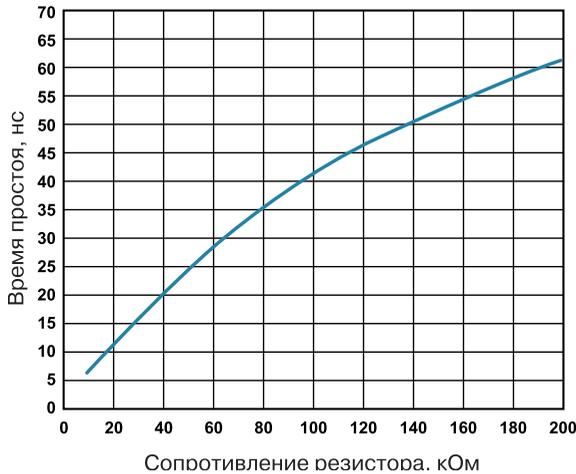


Рис. 5. Зависимость времени простоя от сопротивления резисторов, подключенных между выводами DTCx и общим проводом

Установка выходного напряжения

Выходные напряжения LTC7891 устанавливаются с помощью внешнего резисторного делителя обратной связи, как показано на рис. 6. Регулируемое выходное напряжение определяется следующим образом

$$V_{OUT} = 0.8(1 + R_B/R_A) \text{ В.}$$

Резисторы R_A и R_B необходимо располагать максимально близко к выводу V_{FB}, чтобы свести к минимуму помехи, наводимые на провод, соединяющий делитель с ИМС. Для увеличения скорости реакции на изменение нагрузки можно использовать конденсатор прямой связи (C_{FF}).

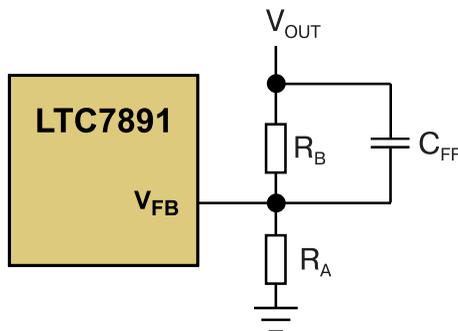


Рис. 6. Настройка выходного напряжения с помощью делителя

В режиме фиксированного выходного напряжения его величина задается подключением вывода VPRG к выводу INTV_{CC}, что соответствует напряжению 12 В на выходе, или к общему проводу – соответствует выходному напряжению 5 В (рис. 7).

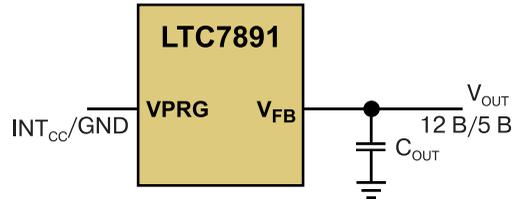


Рис. 7. Настройка фиксированного выходного напряжения

Не подключенный вывод VPRG переводит LTC7891 в режим регулируемого выходного напряжения V_{OUT} с помощью внешнего делителя напряжения.

Включение и блокировка работы при пониженном напряжении

LTC7891 включается с помощью подачи напряжения на вывод RUN. Пороговое значение напряжения включения составляет 1.2 В при ширине петли гистерезиса триггера Шмитта 100 мВ. Если напряжение на входе RUN падает ниже 1.08 В, то отключается основной контур управления и ИМС переходит в режим плавного пуска. При уменьшении напряжения на этом выводе ниже 0.7 В отключается контроллер и большинство внутренних узлов, включая регуляторы INTV_{CC} LDO. В этом состоянии LTC7891 потребляет ток покоя не более 1 мкА.

Вход RUN, имеющий высокое сопротивление, можно использовать для защиты преобразователя от пониженного напряжения на входе. Достаточно подключить к этому входу делитель напряжения, подключенный к источнику входного напряжения V_{IN}, как показано на рис. 8.

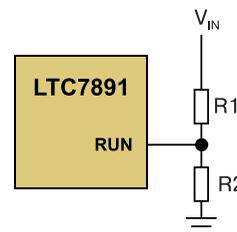


Рис. 8. Использование вывода RUN для защиты от пониженного входного напряжения

Рассчитать напряжение включения/отключения LTC7891 можно по формулам

$$U_{\text{вкл.}} = 1.2(1 + R_1/R_2) \text{ В,}$$

$$U_{\text{выкл.}} = 1.08(1 + R_1/R_2) \text{ В.}$$

Мягкий пуск и контроль выходного напряжения на выводе TRACK/SS

Если напряжение на выводе TRACK/SS меньше, чем внутреннее опорное напряжение 0.8 В, LTC7891 регулирует напряжение на выводе VFB в соответствии со значением напряжения на выводе TRACK/SS, используя его вместо внутреннего опорного напряжения. Вывод TRACK/SS можно использовать для программирования плавного пуска или для того, чтобы значение VOUT отслеживало напряжение другого источника питания во время пуска.

Основные характеристики LTC7891:

- драйверы верхнего и нижнего плеча оптимизированная для полевых GaN-транзисторов
- широкий диапазон входного напряжения – от 4 до 100 В
- широкий диапазон выходного напряжения – от 0.8 В до 60 В
- не требуется никаких внешних защитных диодов
- оптимизация времени простоя автоматически или программируемое с помощью внешних резисторов
- защита от пониженного напряжения на входе
- защита от перенапряжения на выходе
- защита от короткого замыкания в нагрузке
- программируемая частота коммутации ключей от 100 кГц до 3 МГц
- встроенная система ФАПЧ для синхронизации с внешними источниками тактовой частоты

- возможность работы в режиме расширения спектра сигнала управления ключами
- диапазон рабочих температур –40...150 °С
- корпус QFN-28, 4ч5 мм.

Все характеристики можно найти в [1].

Типовая схема включения LTC7891 приведена на рис. 9.

На рис. 10 приведены графики зависимости КПД и потерь мощности от тока нагрузки для схемы, приведенной на рис. 9.

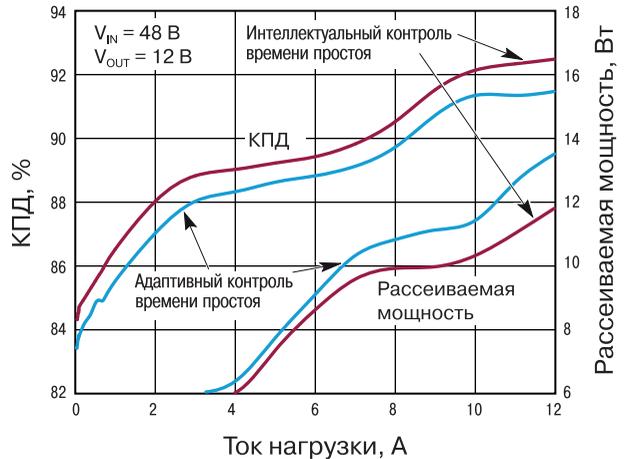


Рис. 10. Графики зависимости КПД и потерь мощности от тока нагрузки преобразователя, показанного на рис. 9

На рис. 11 и 12 приведены зависимости КПД преобразователя от тока нагрузки и от величины входного напряжения.

Рис. 13 иллюстрирует как изменяется ток, протекающий через катушку индуктивности преобразователя, в различных режимах работы.

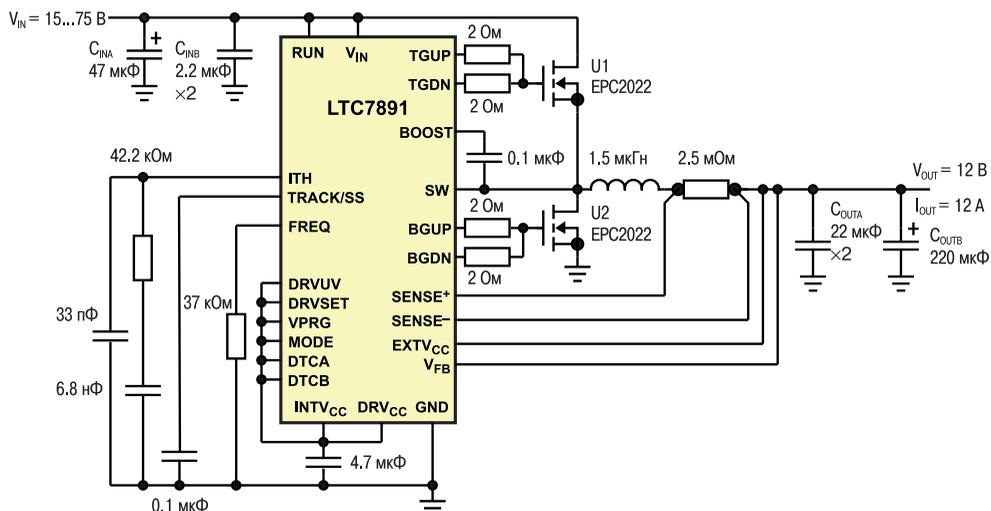


Рис. 9. Типовая схема включения LTC7891

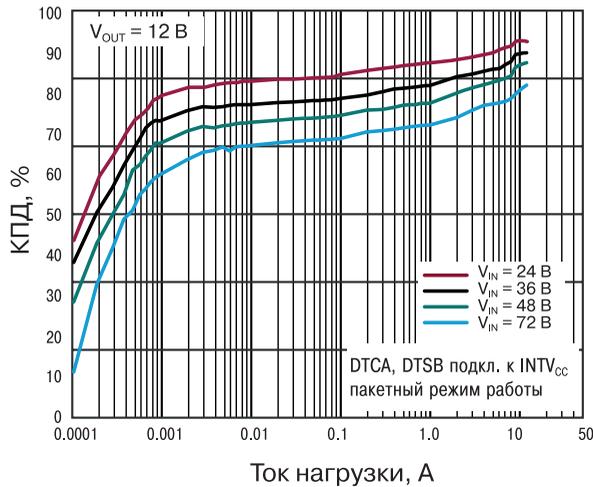


Рис. 11. Зависимости КПД преобразователя от тока нагрузки при различных значениях входного напряжения при работе в пакетном режиме

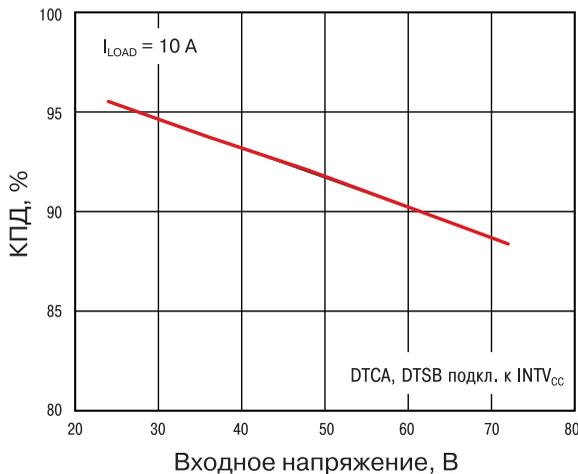


Рис. 12. Зависимость КПД преобразователя от входного напряжения при фиксированном токе нагрузки 10 А

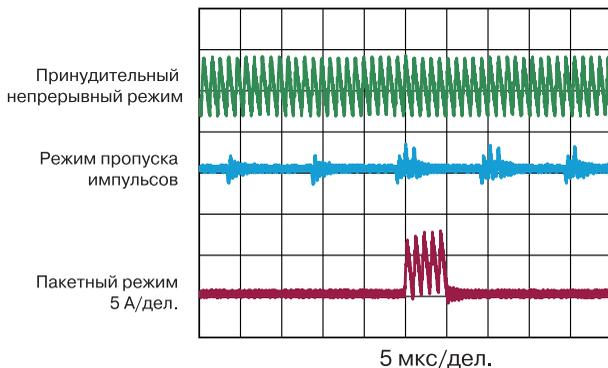


Рис. 13. Изменение тока, протекающего через катушку индуктивности преобразователя, в различных режимах работы

Для проверки и отладки работы DC/DC-преобразователей с контроллером LTC7891 компания Analog Devices предлагает отладочную плату DC2995A [2]. Плата содержит понижающий DC/DC-преобразователь на основе LTC7891 (рис. 14), работающий в диапазоне входного напряжения от 36 до 72 В при напряжении на выходе 12 В и токе нагрузки 20 А. Частота коммутации ключей 500 кГц. КПД преобразователя более 96% при токе нагрузки 20 А.

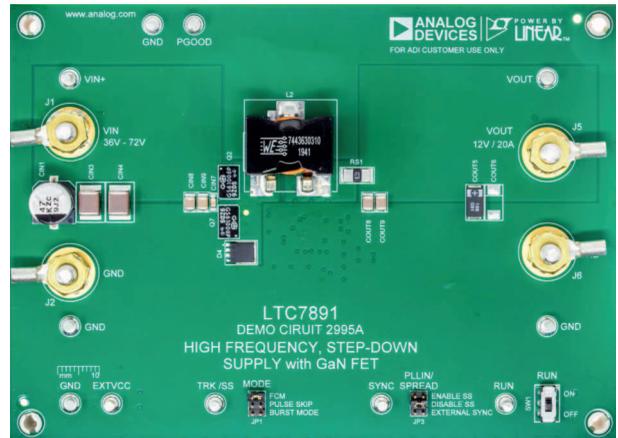


Рис. 14. Отладочная плата DC2995A

В [2] приведена принципиальная схема преобразователя и полная спецификация, использованных в преобразователе, компонентов.

В библиотеках LTspice имеется модель LTC7891, с помощью которой можно построить преобразователь для исследования его характеристик в различных режимах работы. Модель понижающего преобразователя приведена на рис. 15. При заданных в модели номинальных значениях элементов выходное напряжение преобразователя составляет 24 в и ток нагрузки равен 15 А.

При измерении времени переходного процесса директива начала построения графиков сигнала имела вид `.tran 0 3m startup`. Процесс изменения выходного напряжения и тока после включения преобразователя приведен на рис. 16. Как следует из рис. 16, время переходного процесса составляет примерно 0.8 мс.

При измерении спектра выходного напряжения и токов на входе и выходе преобразователя директива соответствовала, показанной на рис. 15. Спектры помех приведены на рис. 17. КПД преобразователя составил 94.7%.

Измерение спектров сигналов производилось только для анализа спектральных составляющих и

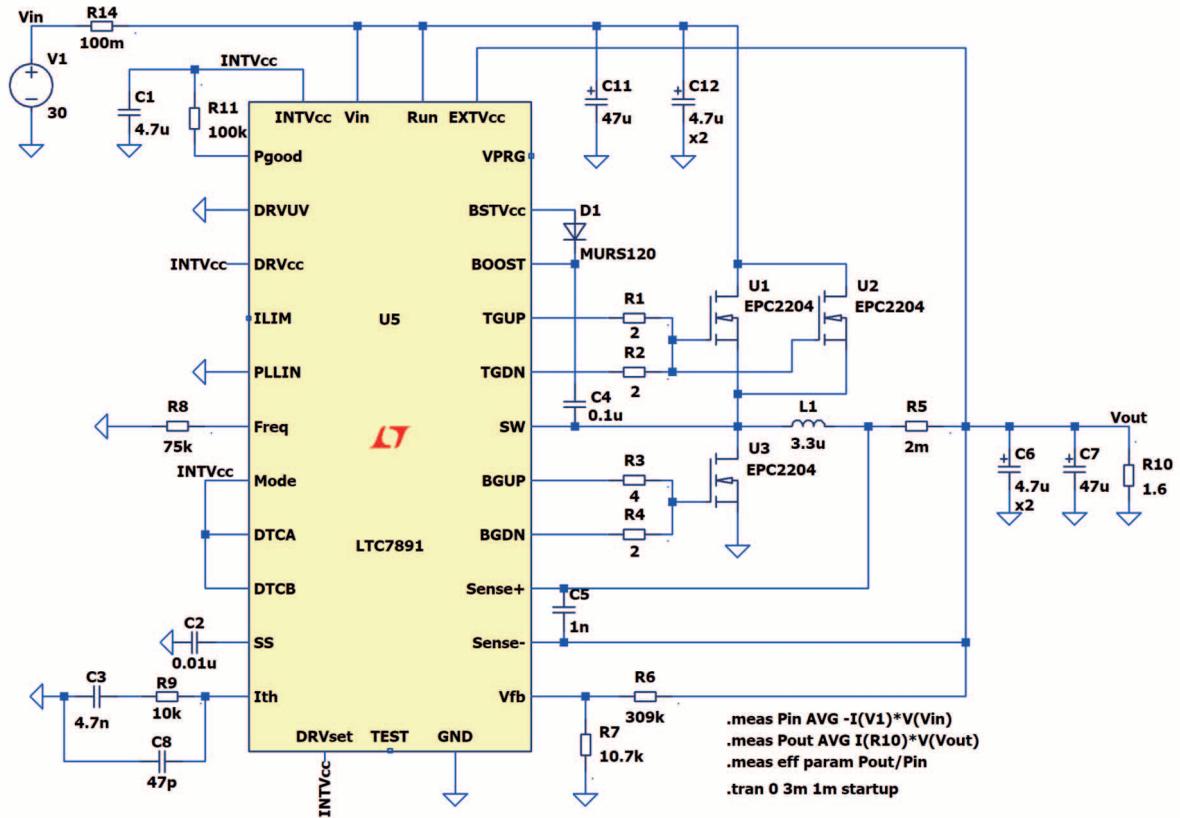


Рис. 15. Модель понижающего преобразователя на базе контроллера LTC7891

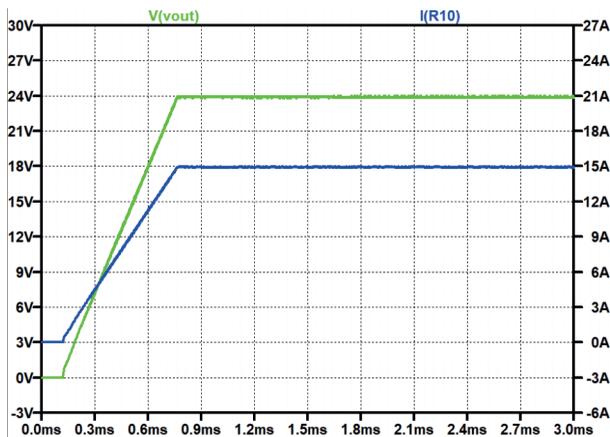


Рис. 16. Сигнал выходных напряжения (зеленая кривая) и тока после включения преобразователя

сравнения уровня помех в различных режимах работы. Поэтому эквивалент сети при измерении спектров не применялся.

Анализ спектров позволяет сделать вывод, что при отсутствии фильтра помех на входе преобразователя, что соответствует модели на рис. 15, спектры входного и выходного токов и выходного напряжения очень схожи по наличию составляющих и от-

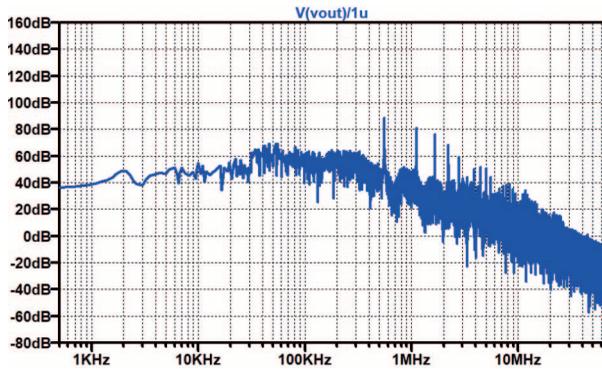
личаются только их уровнями. Следовательно, для сравнения можно использовать спектр входного тока, например.

Для сравнения измерим спектр входного тока в режиме расширения спектра (рис. 18). Для этого вывод PLLIN необходимо отключить от общего провода и подключить его к выводу INTVcc.

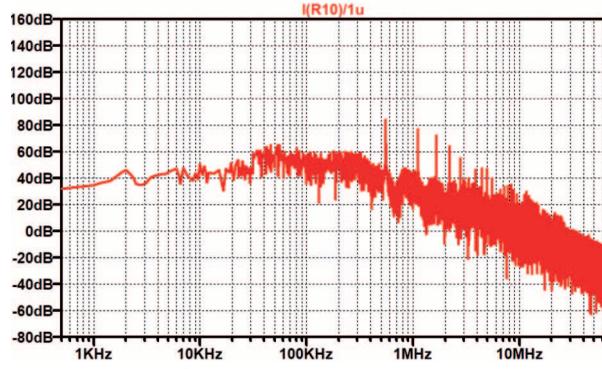
Как следует из рис. 18 уровень основной составляющей помехи с частотой коммутации ключей и уровни ее гармоник упали на 10 дБ? но появились низкочастотные составляющие модулирующего сигнала частотной модуляции, с помощью которой и осуществляется расширение спектра.

Приведенные на рис. 17 и 18 результаты соответствуют режиму принудительной непрерывной работы преобразователя. При малых токах нагрузки преобразователь целесообразно использовать в пакетном режиме работы. Для этого вывод MODE необходимо подключить к общему проводу. При работе в пакетном режиме и сопротивлении нагрузки 50 Ом КПД преобразователя составил 97%, а спектр входного тока, приведенный на рис. 19, существенно изменился.

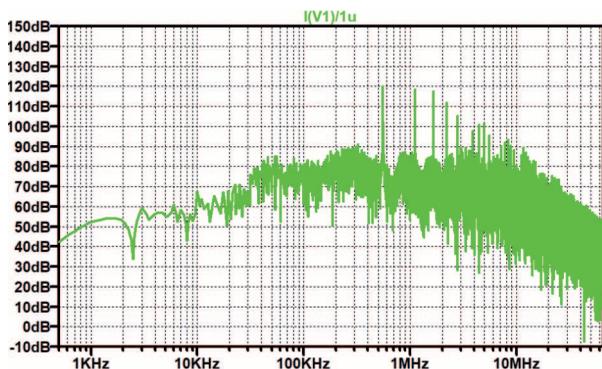
Для перевода преобразователя в режим пропуска импульсов необходимо подключить вывод MODE



Спектр выходного напряжения



Спектр выходного тока



Спектр входного тока

Рис. 17. Спектры выходного напряжения, выходного и входного токов преобразователя

к делителю напряжения, как показано на рис. 20.

Спектр входного тока при работе преобразователя в режиме пропуска импульсов и токе нагрузки 0.48 А приведен на рис. 21. КПД преобразователя в этом режиме составил 93.8%.

Моделирование в LTspice позволяет исследовать работу преобразователя в различных режимах работы, что дает возможность подобрать такую конфигурацию оборудования, которая будет наилучшим образом соответствовать поставленной задаче. Поскольку программа распространяется свободно, то каждый желающий может поэкспериментировать

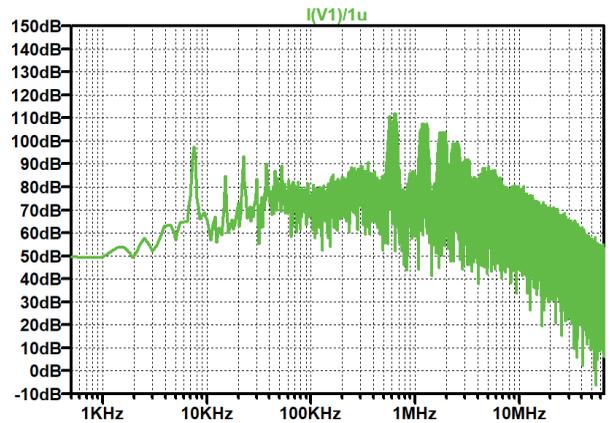


Рис. 18. Спектр входного тока преобразователя при включенном режиме расширения спектра

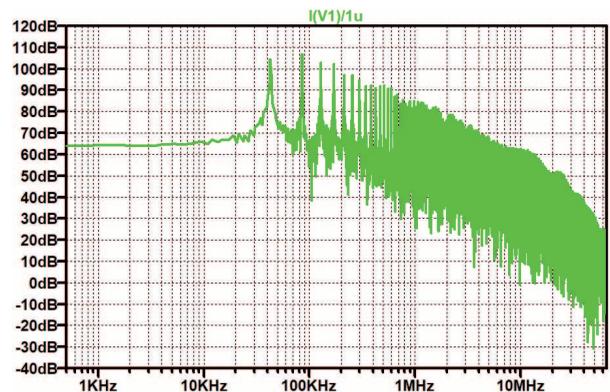


Рис. 19. Спектр входного тока при работе преобразователя в пакетном режиме и токе нагрузки 0.48 А

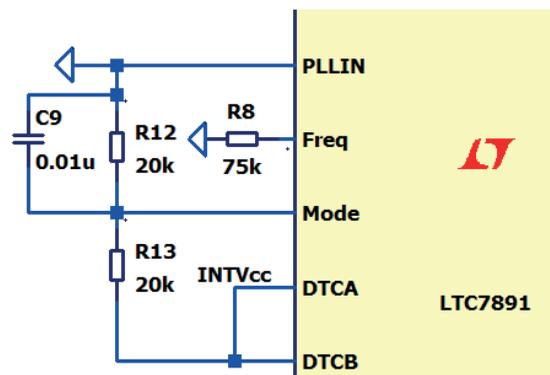


Рис. 20. Схема подключения вывода MODE для перевода преобразователя в режим пропуска импульсов

с различными режимами работы.

Из вышеизложенного следует, что использование контроллера LTC7891 позволяет с минимальными

ми затратами спроектировать и реализовать DC/DC-преобразователь с использованием нитрид-галлиевых полевых транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc7891.pdf>
2. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/dc2995a.pdf>

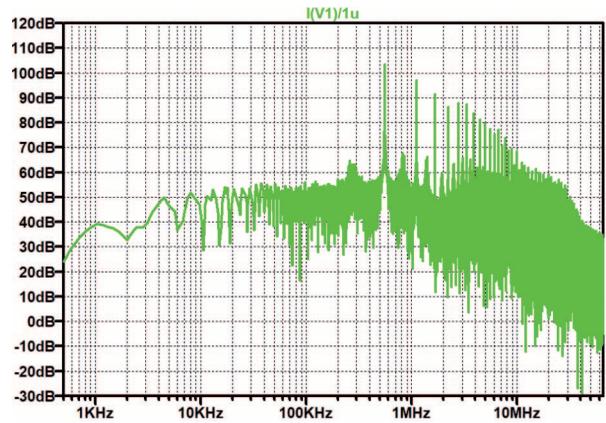


Рис. 21. Спектр входного тока при работе преобразователя в режиме пропуска импульсов и токе нагрузки 0.48 А