

Трансформатор гальванической развязки (ТГР , GDT).

Прочитав большую тему на форуме РадиоКот [ИИП для новичков продвинутых на SG3525](#) , я решил написать небольшой FAQ по этому вопросу, ибо читать 460 страниц (большая часть которых состоит из ругани и оффтопа) занятие не из приятных.

В этой теме на форуме много полезной информации по сборке ИИП в целом, но искать нужное можно очень долго. Поэтому решил сделать выжимку информации хотя бы по ТГР и провести тесты имеющихся в наличии колец для его намотки.

Содержание FAQ:

- Варианты расчёта ТГР.
- Общие рекомендации с форума.
- Типичные осциллограммы ТГР.
- Мои расчёты и измерения (сравнение сигналов)..

Методы расчёта ТГР:

1. 1-й метод, описанный на форуме радиокот.ru :

Методика намотки проста. Отключаем полностью GDT и измеряем ток потребления платы ШИМ-контроллера (TL494, SG3525 и прочие). С подключенной первичкой GDT ток должен увеличиться на 15-20 ма. Если меньше тогда отматываем первичку и наоборот. Потом подбираем количество витков вторичек предварительно нагружив их на емкость эквивалентную емкости затворов ваших полевиков или на сами полевики. Добиваемся нужного напряжения на вторичках, примерно по 12 вольт для мосфетов и 15 для ИГБТ. Подключаем все полностью и смотрим форму сигнала на затворах. Если завал фронта останется – значит необходимо уменьшать сопротивление затворных резисторов. Все эксперименты только через лампочку 60-100 ватт, или с низковольтным DC-питанием и ограничением тока вместо 230 в AC.

2. 2-й метод, описанный на форуме radiokot.ru :

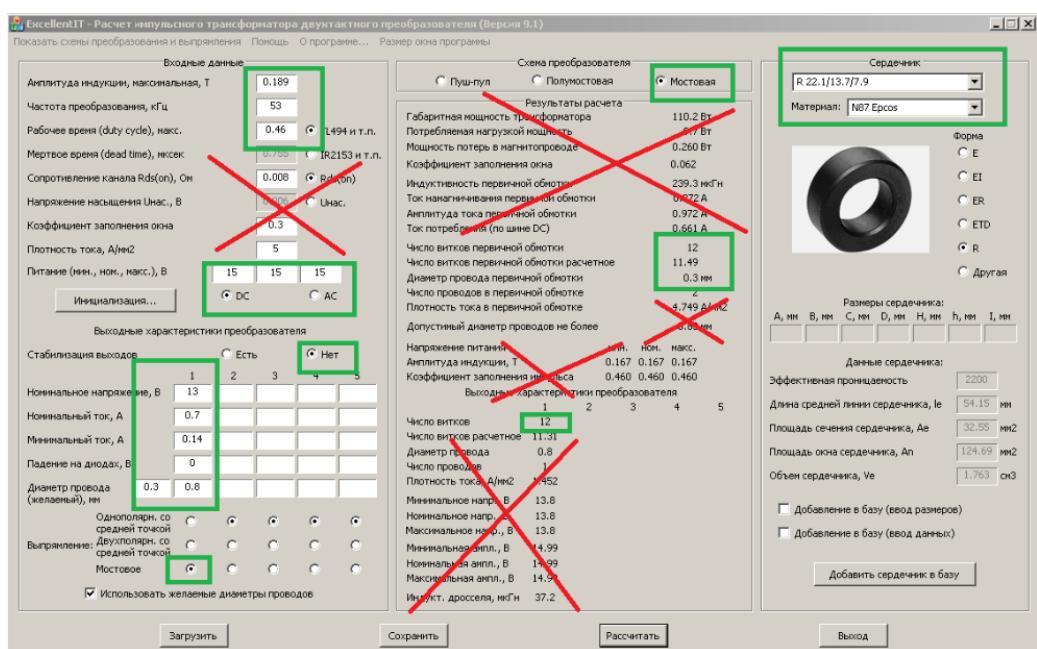
Рассчитываем как обычный транс (многие используют программу расчёта трансформаторов Владимира Денисенко "Starichok").

Замечательная программа, но она не заточена под расчёт ТГР !

<https://radiokot.ru/forum/viewtopic.php?f=11&t=33756&hilit=ExcellentIT&sid=f601e428a4f37bb2633dd76323683e60>

Мотаем филярной намоткой (удобно отматывать-доматывать). Подключаем трансформатор к плате ШИМ - контроллера и подаём питание на эту плату. Питание на силу НЕ ПОДАЁМ. Контролируем на входе, а потом и на выходе форму, фазировку, амплитуду. Если всё ОК, подключаем затворы транзисторов. Контролируем те же параметры и смотрим потребляемый ток. И начинаем скидывать по витку. До определённого момента (до режима насыщения), пока не начнутся завалы по фронтам (спаду) или рост потребляемого тока (обычно завал начинается раньше). Останавливаемся, добавляем примерно 20-30% к виткам, проверяем. И мотаем транс с обновлённым количеством витков. Можете поэкспериментировать, как я уже написал, завалы начинаются раньше, чем увеличение тока, отматывайте дальше и вы увидите это увеличение тока. А вообще, основное это расчёт. Нельзя превышать В насыщения в сердечнике.

Пример расчёта ТГР по программе ExcellentIT :



Красным перечёркнута лишняя информация.

3. Метод из книги Марти Брауна "Источники питания. Расчет и конструирование":

Для управляющего трансформатора можно использовать ферритовый кольцеобразный сердечник или Ш-образный сердечник. Не требуется никакого зазора, поскольку входной конденсатор связи гарантирует, что сердечник будет работать как биполярный. Для этой цели подходит сердечник с высокой магнитной проницаемостью. Размер сердечника составит примерно 10-15 мм. Значение B_{max} должно быть равно примерно половине магнитной индукции насыщения B_{sat} при 100°C. Вполне подойдет значение B_{max} в пределах от 0,18 до 0,25 Тл.

Для определения числа витков первичной обмотки используются формулы:

$$N_{pri} = \frac{V_{cc} \cdot 10^8}{4 \cdot f \cdot B_{max} \cdot A_c},$$

где A_c измеряется в см^2 , а B_{max} — в гауссах ($\Gamma\text{с}$).

$$N_{pri} = \frac{V_{cc}}{4 \cdot f \cdot B_{max} \cdot A_c},$$

где A_c измеряется в м^2 , а B_{max} — в теслах (Tл).

Все дробные значения числа витков следует округлять вверх до ближайшего целого. Далее для определения количества витков вторичной обмотки умножаем округленное значение N_{pri} на желаемый коэффициент трансформации. Типичный ТГР-трансформатор для мощных полевых МОП-транзисторов имеет коэффициент трансформации 1: 1, а для мощного биполярного транзистора коэффициент может быть ниже.

Для входных переменных напряжений более 100 В между первичной и вторичными обмотками, а также между всеми вторичными обмотками трансформатора следует поместить слой майларовой пленки (майлар - это полиэтилен терефталатранс ПЭТФ). Не следует полностью доверять указанному номиналу напряжения пробоя изоляции обмоточного провода, поскольку в процессе намотки оно может уменьшиться.

Пример расчёта:

Имеем кольцо с размерами $22*14*8$ и площадью сечения магнитопровода $A_s = 32\text{мм}^2 = 32*10^{-6}\text{ м}^2$.

$B_{max} = 0,189 \text{ Тл}$, $V_{cc}=15 \text{ В}$, $f = 53 \text{ кГц}$.

Подставив все значения во 2-ю формулу получим необходимое количество витков $N = 15/(4*53000*0,189*0,000032) = 11,69$. Можно округлить до 12.

4. Онлайн калькулятор <https://tqfp.org/calculatoria/gdt/>

Пример расчёта :

The screenshot shows a web-based calculator for GDT (General Duty Transformer) design. At the top, there's a navigation bar with 'tqfp.org' and 'Calculatoria' on the left, and language links 'Ru' and 'En' on the right. Below the navigation is a title 'Трансформатор управления затворами' (Driver Transformer). The form contains five input fields: 'Рабочая частота, кГц' (Working frequency, kHz) set to 53; 'Сечение магнитопровода, мм²' (Core cross-section, mm²) set to 32; 'Амплитуда индукции магнитного поля, мТл' (Magnetic field amplitude, mTl) set to 189; 'Напряжение на трансформаторе, В' (Transformer voltage, V) set to 15; and 'Количество витков' (Number of turns) set to 24.00. To the right of each input field is a descriptive text block. A blue 'Calculate' button is located at the bottom left of the input area. The overall layout is clean and functional, designed for quick calculations.

Вывод:

Перепробовав все эти методы, я пришёл к следующему выводу : все расчёты приблизительны (что видно по разному кол-ву витков в разных программах), т.к. программа Ecellent написана не для ТГР, а онлайн-калькулятор и метод из книги Брауна не используют в расчётах проницаемость колец, то и полагаться полностью на них нельзя. Поэтому лучше всего, как мне кажется, использовать онлайн-калькулятор для получения приблизительного кол-ва витков, а далее использовать 1-й метод (назовём его «метод тыка») с подгонкой тока путём сматывания / доматывания витков обмоток.

Общие рекомендации с форума радиокот.ру :

1. Мотать ТГР нужно на ферритах с большой проницаемостью, от 2000 и более. Тогда ток намагничивания этого трансформатора не будет зря грузить микросхему ШИМ.
2. Импульсов величиной 10-12 вольт, которые будут на затворах при намотке 1:1:1 и питании 12В, более чем достаточно для нормального открывания транзисторов. Ещё лучше будет, если контроллер будет питаться 24-вольтами (или выше - до 36 вольт), и, соответственно, соотношение витков будет 2:1:1 (или 3:1:1 для 33-36 вольт). Это уменьшит нагрузку ШИМ-контроллера по току и сделает более низким смещение во время "полок" дед-тайма, что повысит гарантию того, что транзисторы всё это время будут заперты.
3. Если у вас питание ШИМ-контроллера 12 вольт, то ТГР надо мотать 1:1:1 (равное число витков во всех обмотках). Для лучшей связи обмоток можно мотать лентой в 4 провода 1:2:1:2, а первичку потом соединить параллельно. Если у вас питание 24 вольта, то ТГР надо мотать 2:1:1 (в первичной обмотке должно быть в два раза больше витков), мотаете так же лентой в 4 провода 1:2:1:2 для лучшей связи, а первичку потом соединяете конец одной с началом второй, последовательно.
4. «Горб» в начале меандра - выброс энергии из трансформатора во время dead time. Сильно шунтирует процесс - это определяется по длительности "выпуклости" после переднего фронта, чем короче - там быстрее энергия идёт "в утиль".
Причина: в любой индуктивности при прохождении по ней тока накапливается энергия. При переключении полярности эта энергия сначала отдаётся в источник питания через диоды, потом опять накапливается через транзисторы драйвера или микросхемы. Вот и

получается ступенька. В первой половине напряжение на обмотке больше питания, во второй меньше.

5. Как минимум одну вторичную обмотку ТГР (для верхнего транзистора) необходимо изолировать, т.к. между обмотками в первом полупериоде, когда верхний ключ открыт, присутствует потенциал 310 в. Во 2-м открыт нижний ключ и будет меньше 1 в между обмотками.

6. Виды намоток и их эффективность:

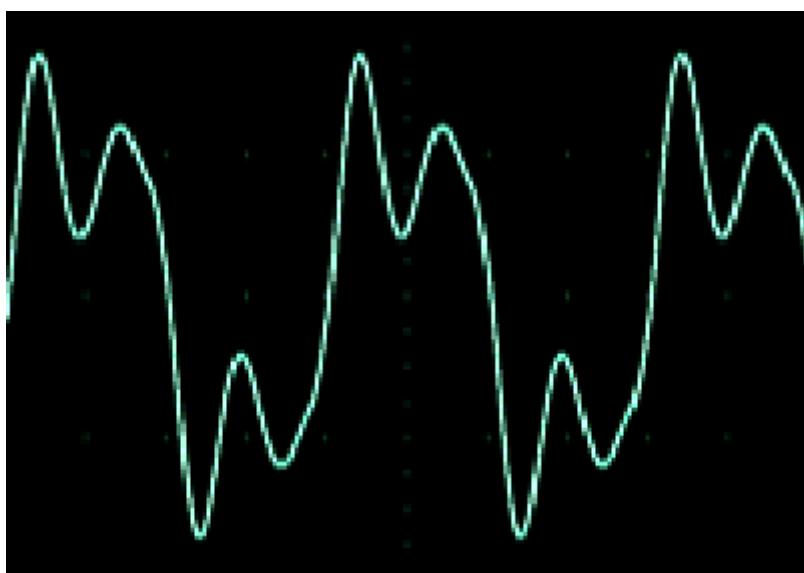
Тип обмотки	Коэффициент связи	Фото
Раздельная	0.988379	
Сосредоточенная	0.999456	
Круговая	0.999803	
Филярная (пучком из нескольких скрученных проводов)	0.999837	
Проводом в экране	0.999905	

Типичные осциллографмы ТГР:

Информация взята с сайта :

<https://www.richieburnett.co.uk/temp/gdt/gdt2.html>

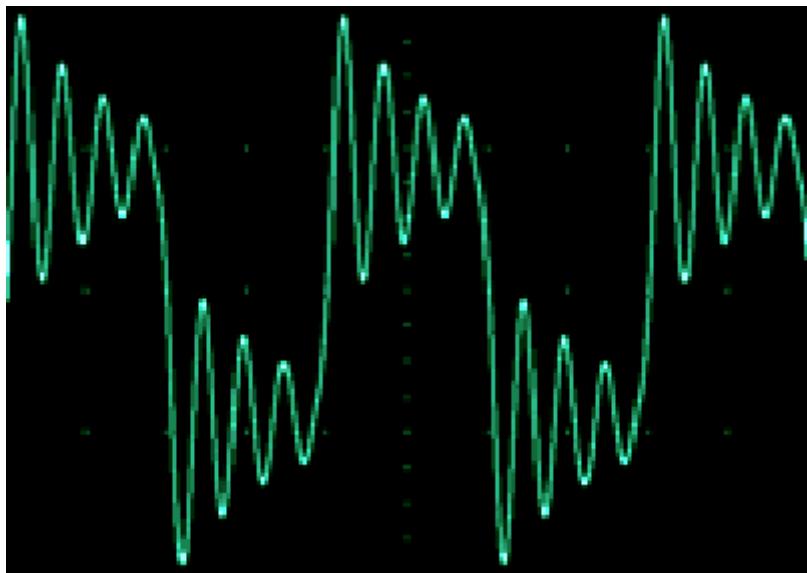
На рисунках ниже показаны некоторые типичные сигналы, наблюдаемые на затворе МОП и БТИЗ транзисторов при управлении ими через трансформатор гальванической развязки (ТГР, GDT). В идеале нужно добиться такого сигнала на затворе транзистора, чтобы он был очень чистый, с крутыми фронтами, без выбросов и звона, и с ровными полками. К сожалению есть очень много факторов, влияющих на качество сигнала GDT. Комментарии рядом с каждой картиной указывают на удовлетворительность сигнала. Также, свойства сигнала перечислены и для тех случаев, когда сигнал не является удовлетворительным, причины приведены вместе с предложениями по улучшению ситуации ...



Ужасный сигнал управления затвором с низкочастотным звоном большой амплитуды.

- Звон низкой частоты из-за чрезмерной индуктивности рассеяния управляющего трансформатора.
- Сигнал полностью непригоден, потому что звон загоняет MOSFET обратно в линейный режим!

Совет: Сигнал не может быть исправлен путем увеличения затворного сопротивления. Для этого необходимо слишком большое сопротивление и фронты сигнала выйдут слишком заваленными. Нужно сокращать чрезмерную индуктивность рассеяния путем пересмотра конструкции GDT.

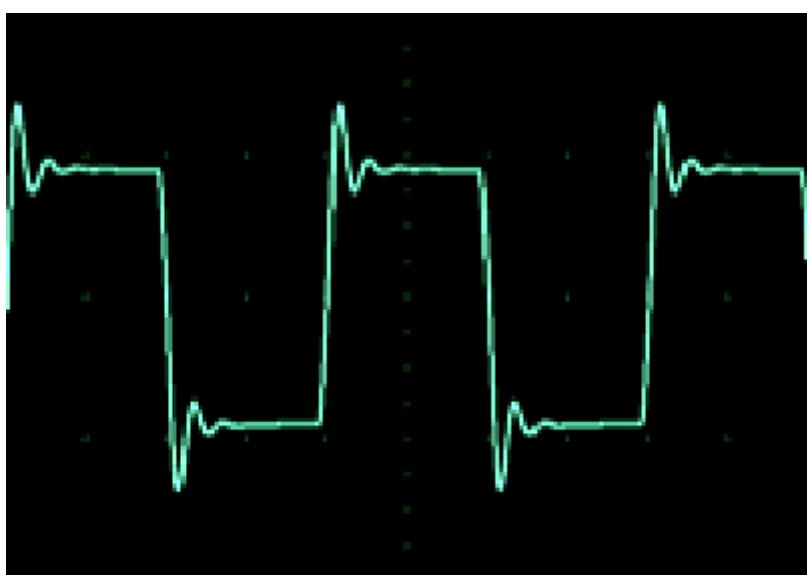


Плохой сигнал управления затвором с высокочастотным звоном большой амплитуды.

- Большой выброс в момент переключения транзисторов.
- Длительный высокочастотный сигнал на полках из-за отсутствия какого-либо демпфирующего сопротивления.
- Полностью непригоден, потому что звон заставляет MOSFET неоднократно заходить в линейную область ВАХ!

Совет:

Нужно немного увеличить затворный резистор, либо добавить гасящее сопротивление затвор-исток! Кроме того, можно попробовать уменьшить индуктивность рассеяния GDT, если это возможно.



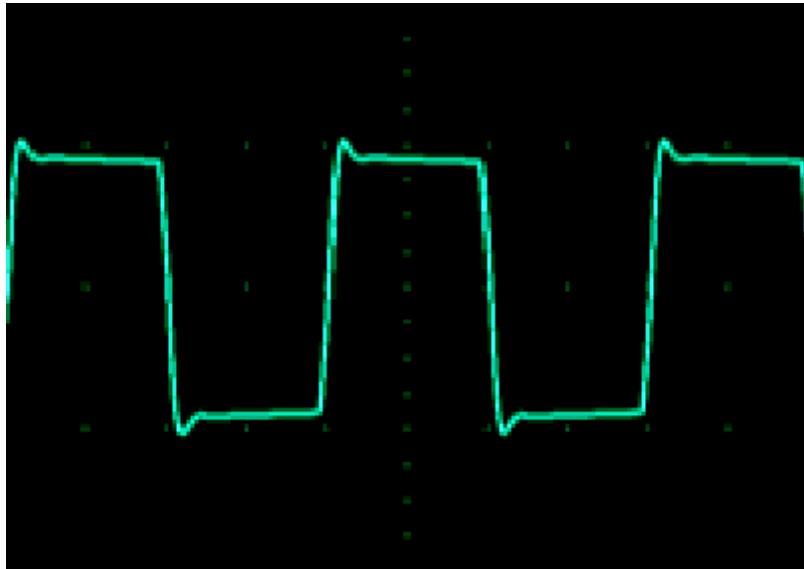
Хороший сигнал управления затвором, за исключением нескольких моментов.

- + Плоские вершины и основания импульсов.
- + Крутой передний и задний фронты.

- Значительный выброс на фронтах из-за недостаточного демпфирования GDT.
- Некоторый звон после фронтов, но это не очень криминально.

Совет:

Увеличить немного резистор затвора и звон с выбросами должны уменьшиться.

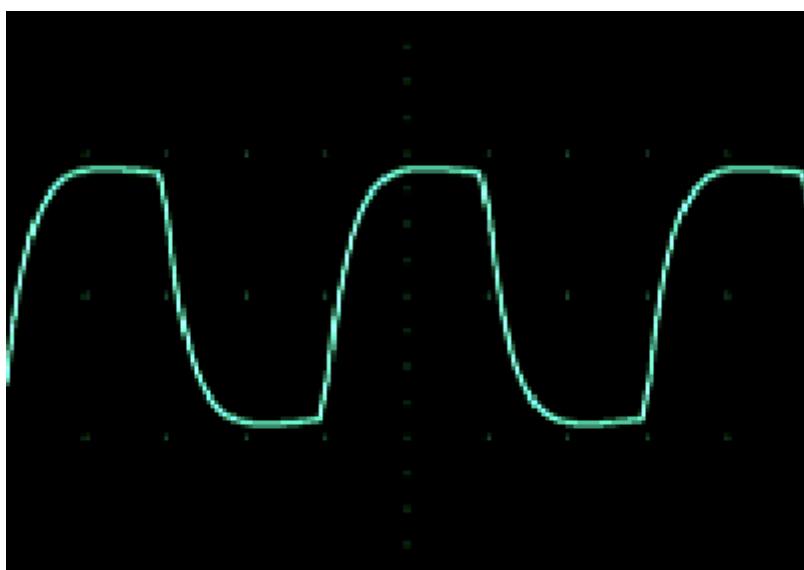


Идеальный сигнал управления затвором!

- + Плоские вершины и основания импульсов.
- + Крутой передний и задний фронты
- + Маленькие выбросы на фронтах.
- + Нет звона после фронтов.

Совет:

Никакие действия не нужны, если время нарастания и спада не более 200 нс или около того.

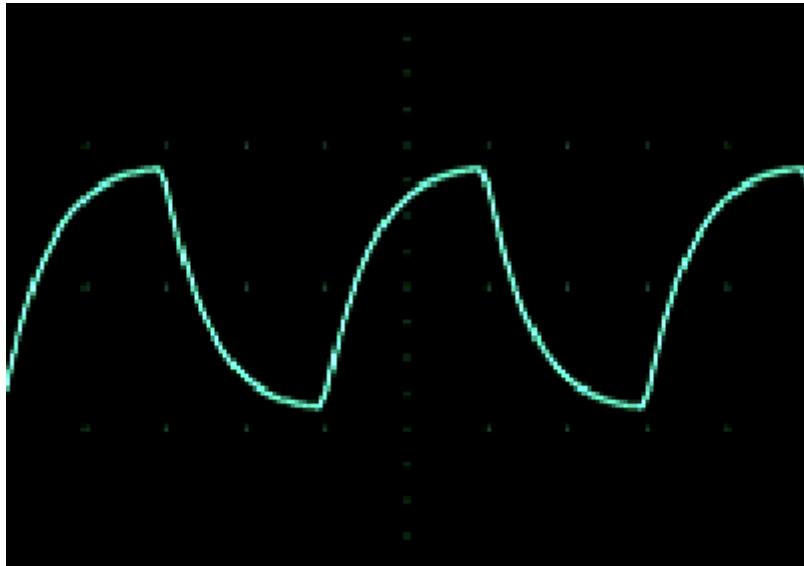


Небольшой завал фронтов сигнала управления затвором.

- Фронты завалены из-за слишком большого демпфирующего сопротивления.
- Плохие фронты из-за слишком тяжёлого затвора MOSFET.
- Такой сигнал вызывает нагрев из-за высоких потерь переключения.

Совет:

Уменьшить затворный резистор, чтобы сделать фронты круче.

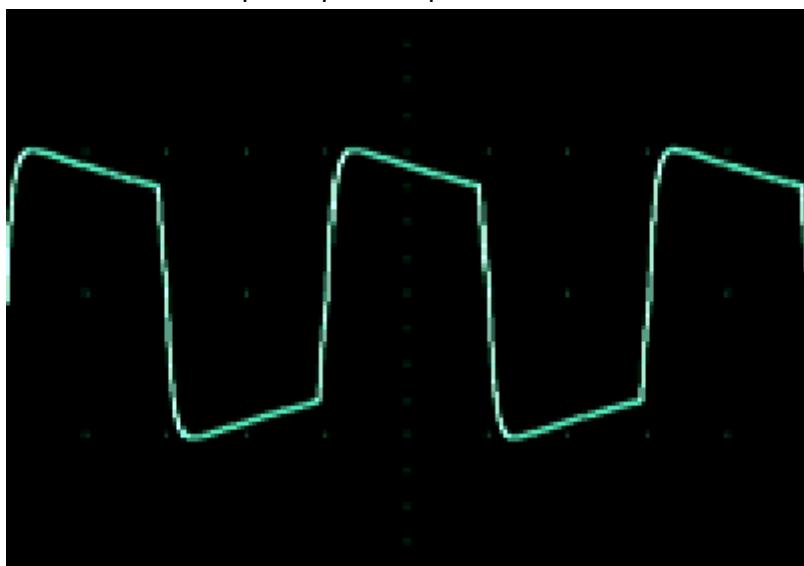


Сигнал слишком сильно демпфирирован ёмкостью затвора.

- Осциллограмма выглядит как "плавники акулы" из-за слишком большого сопротивления в цепи затвора.
- Причиной также может быть слишком маленький ток, выдаваемый драйвером для данной ёмкости затвора.
- Сигнал полностью непригоден, потому что транзисторы будут находиться практически все время в линейной области ВАХ!
- Такой сигнал приводит к быстрому перегреву МОП-транзисторов.

Совет:

Уменьшить затворный резистор либо использовать более мощный затворный драйвер.

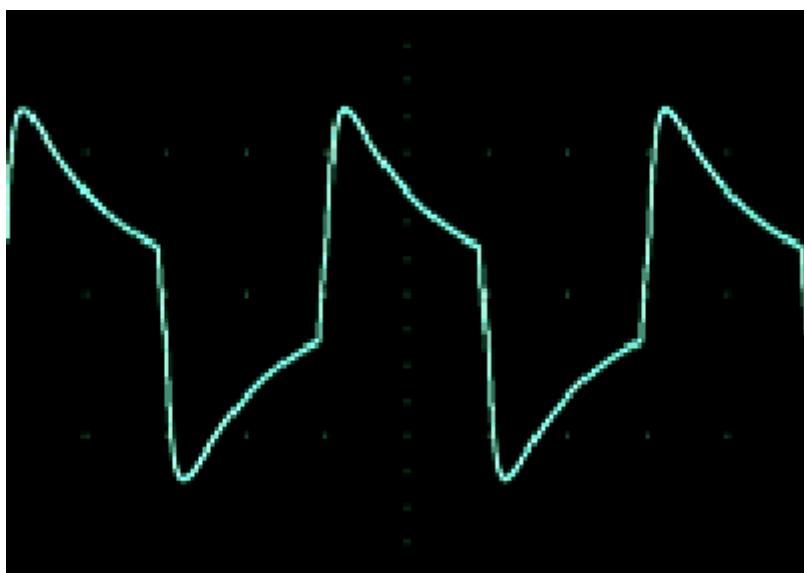


Слегка наклонные верхние и нижние полки.

- Верхняя и нижняя части импульсов немного стремятся к нулю.
- Это вызвано низкой индуктивностью первичной обмотки. Слишком мало витков на трансформаторе.
- Это не является проблемой до тех пор, пока величина спада будет менее, чем на пару вольт.

Совет:

Добавить несколько витков в первичную и вторичную обмотки для уменьшения спада.



Чрезмерно наклонные верхние и нижние полки.

- Верхняя и нижняя части импульсов сильно стремятся к нулю.
- Слишком низкая индуктивность первичной обмотки. Либо слишком мало витков, либо неверно выбран материал используемого сердечника.
- Непригодно к использованию, поскольку транзистор начнет выключаться в конце импульсов!

Совет:

Использовать много больше витков или выбрать сердечник с более высокой удельной индуктивностью (AL).

Резонансный привод затвора (синусоидальный).



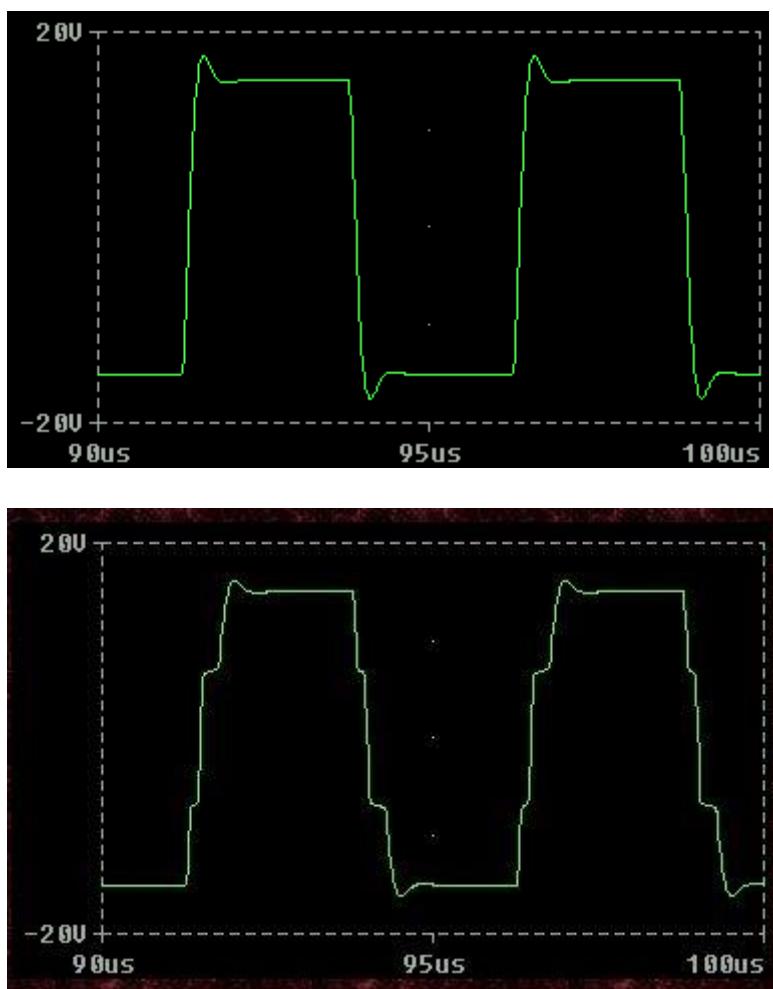
На очень высоких частотах переключения можно использовать резонанс, вызванный индуктивностью рассеяния и емкостью затвора МОП-транзистора. Этот метод хорошо применяется в усилителях ВЧ, работающих в режиме переключения до десятков мегагерц! На первый взгляд синусоидальная форма сигнала может показаться неидеальной для управления затвором МОП-транзистора. Однако она имеет умеренно быстрые нарастающие и падающие фронты, где синусоида проходит через ноль. Этот метод упоминается здесь только для полноты картины. Он обычно не используется ниже пары мегагерц. Управление прямоугольными сигналами всегда обеспечивает меньшие потери переключения, когда это возможно.

Эффект Миллера

Все изображения выше показывают формы сигналов, измеренные на клеммах затвор-исток мощных МОП-транзисторов, когда устройство не переключает ток. Во время этих испытаний управлялся только затвор МОП-транзистора. На стоковые клеммы устройства не подавалось напряжение, и они не переключали ток нагрузки. Это условие позволяет легко сравнивать достоинства различных схем управления затвором. Оно также позволяет вносить изменения в схему управления затвором без риска повреждения МОП-транзистора, если изменение приведет к неподходящей форме сигнала управления.

Однако стоит отметить, что это не отражает реальную ситуацию, когда МОП-транзистор переключает значительную мощность. Формы сигналов управления затвором на самом деле немного меняются, когда МОП-транзистор переключает реальный ток. Такое поведение обусловлено так

называемой «емкостью Миллера», которая существует между стоковой клеммой и клеммой затвора МОП-транзистора. Эта емкость оказывает эффект «отрицательной обратной связи» на МОП-транзистор, когда он проходит коммутационный переход, и фактически пытается продлить коммутационный переход, увеличивая потери переключения! Эффект Миллера также наиболее заметен в таких приложениях, как наше, где МОП-транзисторы работают при относительно высоких напряжениях стока-источника. Анимированное изображение ниже показывает результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования. Оно показывает, как изменяется форма сигнала управления затвором одного МОП-транзистора в полумосте по мере того, как основное высоковольтное питание постепенно увеличивается от нуля до 400 вольт.



Обратите внимание, как мало плоских областей образуются на пути вверх по восходящим и нисходящим фронтам импульсных сигналов. Эти области плоско образуются, потому что емкость Миллера пытается удерживать напряжение затвора на пороговом уровне MOSFET, пока устройство включается или выключается. Плато есть как на положительных, так и на

отрицательных импульсах, потому что два MOSFET управляются одним трансформатором управления затвором. Длительность каждой области плато соответствует тому, сколько времени требуется MOSFET для перехода через линейную область. По мере увеличения напряжения питания схема управления затвором испытывает трудности с преодолением эффекта Миллера, и эти плоские области становятся все длиннее. Поэтому MOSFET требуется больше времени для перехода через линейную область, где рассеиваемая мощность высока, и потери переключения увеличиваются.

Из этого мы видим, что для достижения высокой эффективности нам действительно нужно минимизировать длительность этих областей плато. Также очевидно, что общий наклон восходящих и нисходящих фронтов формы сигнала управления затвором менее важен, чем то, что происходит в короткий момент, когда переключается MOSFET. Именно во время переходов переключения большинство схем управления затвором растягиваются до предела. Когда переключается MOSFET, драйвер должен подавать максимальный ток, поскольку он пытается увеличить напряжение затвор-исток, но эффект Миллера пытается поддерживать его постоянным! Именно способность драйвера преодолевать этот эффект делает его победителем над меньшей схемой управления затвором. Суть этого обсуждения заключается в том, чтобы показать, что вы действительно должны проверять формы сигналов затвора MOSFET прямо на устройстве MOSFET с некоторой мощностью, подаваемой на мостовую схему. Во многих случаях трудно наблюдать формы сигналов затвор-исток, когда мостовая схема питается напрямую от сети. Поэтому следует использовать изолированный источник. Это может быть сделано через сетевой изолирующий трансформатор или источник питания с более низким напряжением, который обеспечивает изоляцию от сетевого питания. Даже если вы не можете проверить формы сигналов при полном номинальном напряжении, приложенном к МОП-транзисторам, вам все равно следует проверить формы сигналов при более низком напряжении 30 или 50 вольт. Это доказывает отсутствие непредвиденных колебаний и дает некоторую степень уверенности в том, что формы сигналов управления затвором не изменятся значительно при дальнейшем увеличении питания. Форма сигнала затвор-исток также немного зависит от нагрузки на выходе инвертора. Это происходит потому, что эффект Миллера емкостно связывает сток с затвором МОП-транзистора. В случаях, когда МОП-транзистор

включается при нулевом напряжении на нем, эффект Миллера отсутствует, поскольку во время переключения нет напряжения сток-исток. Однако эффект Миллера все еще имеет место, когда устройство выключено. Более подробное объяснение эффекта Миллера и переключения МОП-транзистора в целом можно найти в большинстве книг по силовой электронике. Некоторые производители устройств также предоставляют литературу, в которой эта тема освещается довольно подробно.

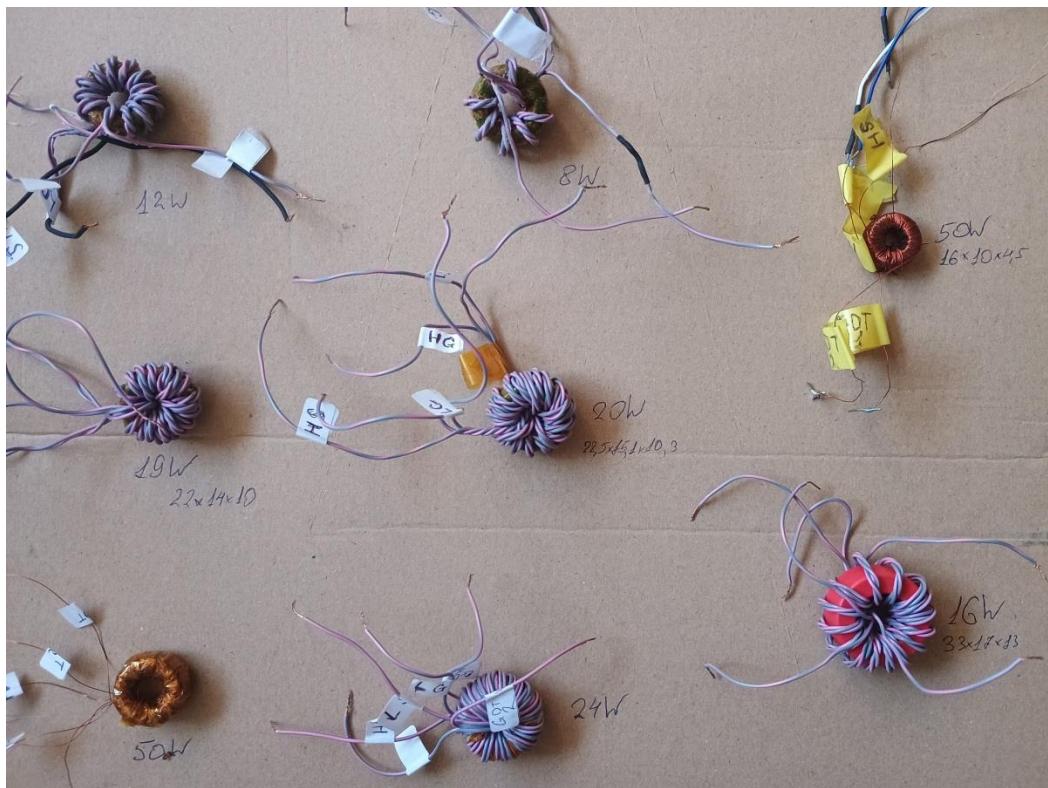
Сравнение сигналов ТГР на разных кольцах :

Все осциллограммы сняты при одинаковых условиях.

Для тестов использована схема полумостового преобразователя :

- Питание платы управления с ТГР : линейный ЛБП 15 вольт.
- Силовое питание : 95 вольт DC (230AC->12DC->95DC).
- Мосфеты: STP19N50 : 500 V, $R_{ds_on}=0,2$ Ohm, 14 A.
- Диоды : MUR3020PT : 200 V, 30 A, ultrafast.
- Входной электролит: 330 мкФ, 200 В.
- Средняя точка : две керамики WIMA MKP4 по 1 мкФ, 400V.
- Снабберы :
 - первичка тр-ра: 100 Ом + 1 нФ/2кВ.
 - диоды : 33 Ом + 10 нФ (Х2, безиндукционные).
- Выходной дроссель: 100 мкГн (47мкГн при 10 A).
- Выходной конденсатор : 330 мкФ, LowESR.
- Трансформатор : ER 35/22/11 (ATX), Pr: 3,9 мГн, L расс =8,6 мкГн.
- Драйвер: TL494+TC4427 , без стабилизации, $f = 53$ кГц.
- Затворные резисторы : 20 Ом.
- Конденсатор в первичке ТГР : 1 мкФ.
- Нагрузка выхода : ~17 Ом/10 Ватт, при 11,4 В ток около 670 мА.

Использовались следующие ферритовые кольца :



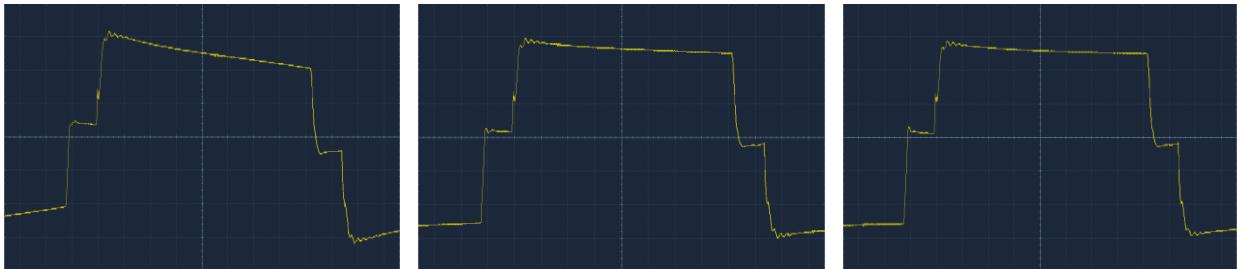
1. Синее кольцо: 25,5 * 15, * 10,3 (Epcos ?) :

8 витков филярно

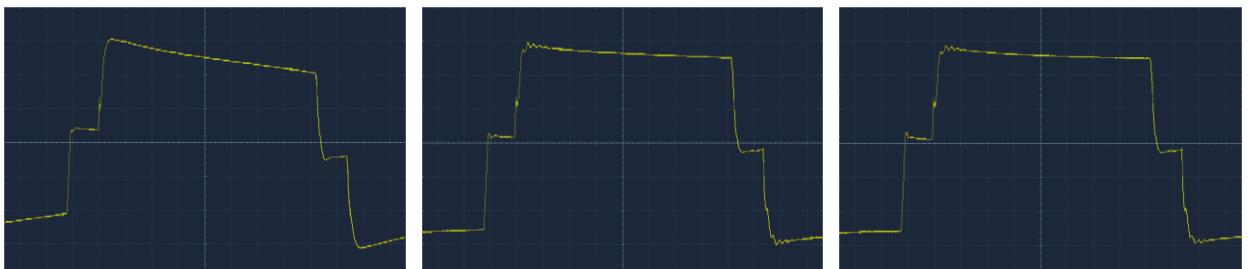
20 витков филярно

24 витка обычно

Верхний ключ (5В / 1мкс):



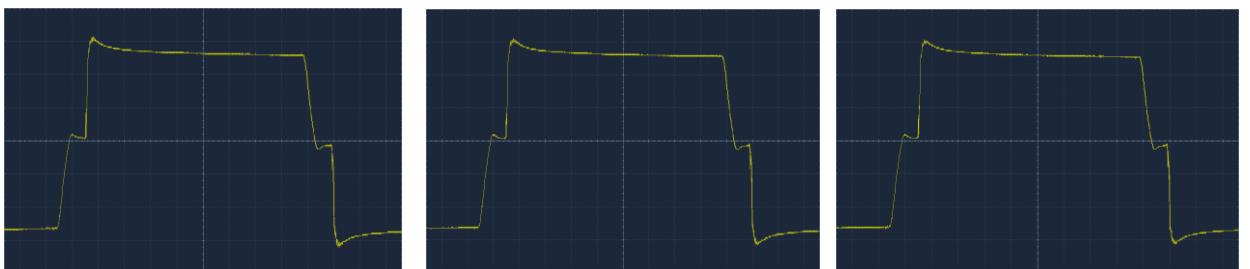
Нижний ключ (5В / 1мкс):



Первичная обмотка трансформатора (20В / 1мкс):



Вторичная обмотка трансформатора (5В / 1мкс):



Измерения и расчёты :

I упр = 12 мА (без ТГР)

N=8

$\mu r = 4590$

L = 309 мГн

I упр-ния = 69 мА (с ключами)

I тгр = 69-12= 57 мА (с ключами)

I упр. х.х. = 41 мА (без ключей)

I тгр х.х. = 29 мА (без ключей)

N=20

$\mu r = 4334$

L = 1,83 мГн

I упр-ния = 43 мА

I тгр = 31 мА

I упр. х.х. = 15 мА

I тгр х.х. = 3 мА

N=24

$\mu r = 4441$

L = 2,7 мГн

I упр-ния = 43 мА

I тгр = 31 мА

I упр. х.х. = 14 мА

I тгр х.х. = 2 мА

Формула расчёта проницаемости :

$$L = N^2 * I_m * \mu / A$$

цилиндрическая катушка

$$L = N^2 * h * \mu * \ln(R/r) / (2 * \pi)$$

катушка на кольце R, r, h

$$\mu = L * 2 * \pi / (N^2 * h * \ln(R/r))$$

$$\mu = \mu_r * \mu_0$$

$$\mu_0 = 1,257 * 10^{-6} \text{ А/А}^2$$

проницаемость ваккума

$$\text{Проницаемость кольца : } \mu_r = L * 2 * \pi / (N^2 * h * \ln(R/r) * \mu_0)$$

Расчёт витков: -ExcellentIT: 7 витков (Bmax=189 мТл).

-Онлайн калькулятор: 14 витков (Bmax=189 мТл).

- Метод из книги Брауна: N= 7

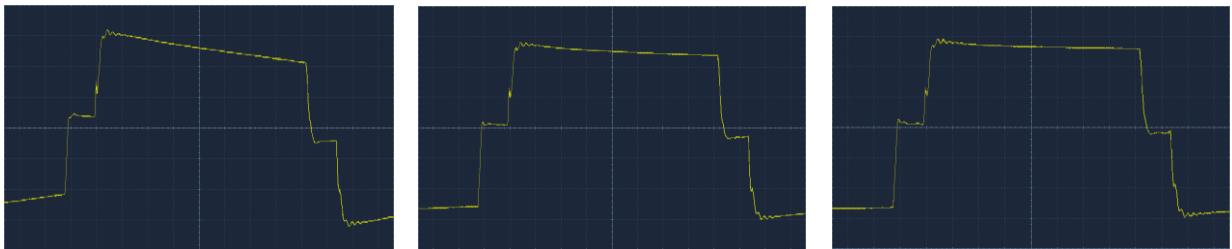
2. Зелёное кольцо: 22 * 14 * 8 (из Китая) :

12 витков филярно

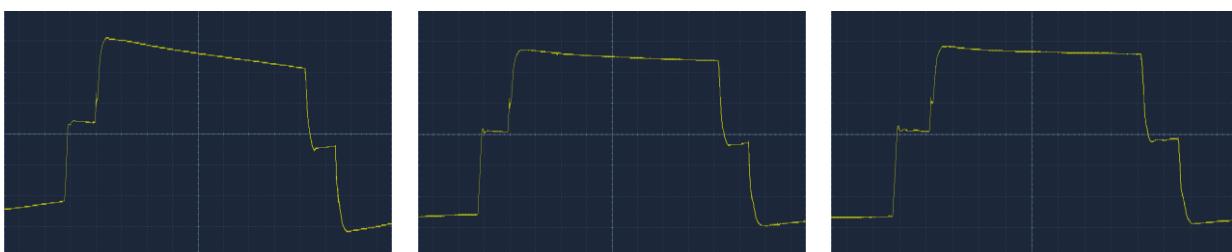
19 витков филярно

50 витков обычно

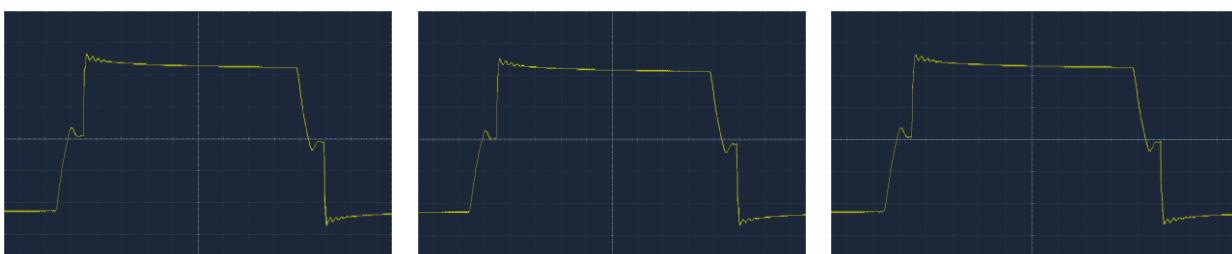
Верхний ключ (5В / 1мкс):



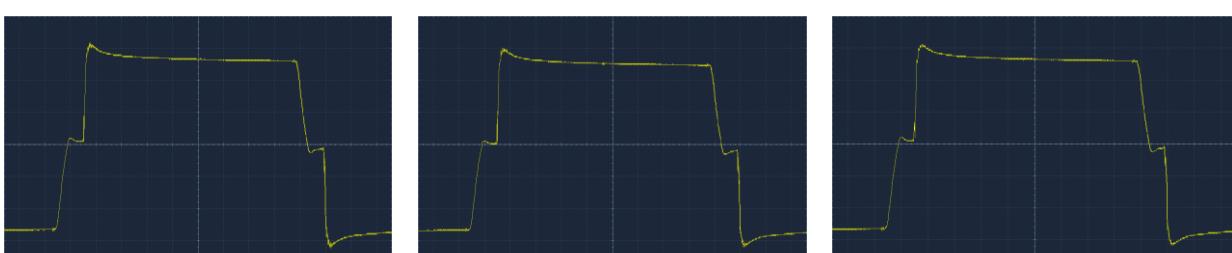
Нижний ключ (5В / 1мкс):



Первичная обмотка трансформатора (20В / 1мкс):



Вторичная обмотка трансформатора (5В / 1мкс):



Измерения и расчёты :

I упр = 12 мА (без ТГР)

N=12

$\mu r = 3600$

L = 370 мкГн

I упр-ния = 58 мА (с ключами)

I тгр = 58-12= 46 мА (с ключами)

I упр. х.х. = 30 мА (без ключей)

I тгр х.х. = 18 мА (без ключей)

N=19

$\mu r = 4813$

L = 1,236 мГн

I упр-ния = 50 мА

I тгр = 38 мА

I упр. х.х. = 19 мА

I тгр х.х. = 7 мА

N=50

$\mu r = 4803$

L = 8,539 мГн

I упр-ния = 43 мА

I тгр = 31 мА

I упр. х.х. = 13 мА

I тгр х.х. = 1 мА

Проницаемость кольца : $\mu r = L * 2 * \pi / (N^2 * h * \ln(R/r) * \mu_0)$

Расчёт витков: -ExcellentIT: 12 витков (Bmax=189 мТл).

-Онлайн калькулятор: 24 витков (Bmax=189 мТл).

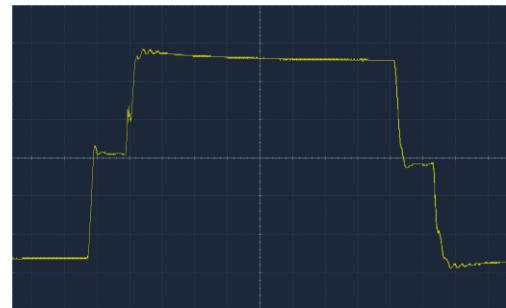
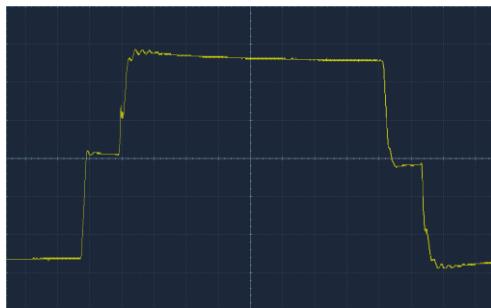
- Метод из книги Брауна: N= 12.

3. Красное (помехоподавляющее) и зелёное (из БП ATX) :

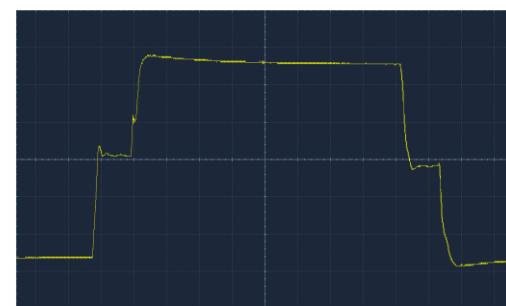
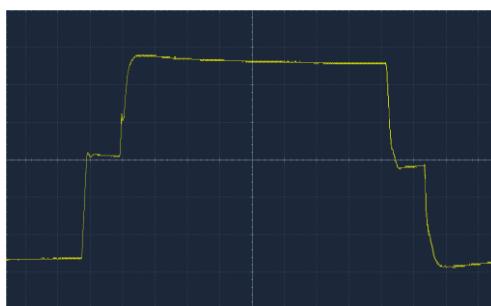
Красное 33*17*13:

Зелёное 16*10*4,5:

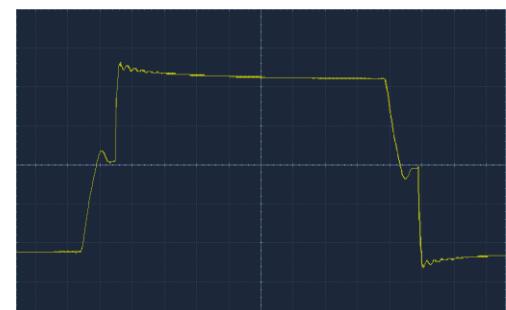
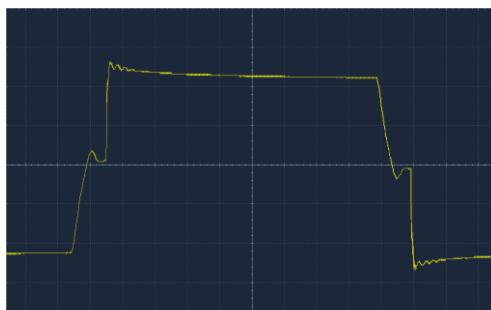
Верхний ключ (5В / 1мкс):



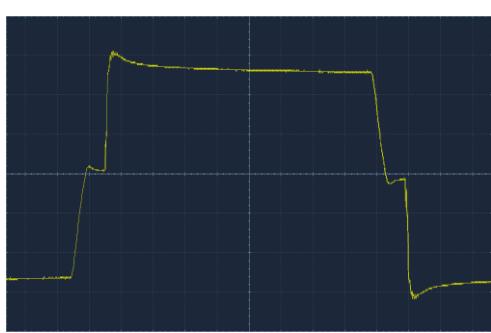
Нижний ключ (5В / 1мкс):



Первичная обмотка трансформатора (20В / 1мкс):



Вторичная обмотка трансформатора (5В / 1мкс):



Измерения и расчёты :

N=16 (филярно)		N=30 (обычно)
$\mu r = 44376$		$\mu r = 14711$
$L = 18,9 \text{ мГн}$		$L = 5,5 \text{ мГн}$
$I_{\text{упр-ния}} = 45 \text{ мА}$	(с ключами)	$I_{\text{упр-ния}} = 43 \text{ мА}$
$I_{\text{тгр}} = 45 - 12 = 37 \text{ мА}$	(с ключами)	$I_{\text{тгр}} = 43 - 12 = 31 \text{ мА}$
$I_{\text{упр. х.х.}} = 13 \text{ мА}$	(без ключей)	$I_{\text{упр. х.х.}} = 13 \text{ мА}$
$I_{\text{тгр х.х.}} = 1 \text{ мА}$	(без ключей)	$I_{\text{тгр х.х.}} = 1 \text{ мА}$
Проницаемость кольца : $\mu r = L * 2 * \pi / (N^2 * h * \ln(R/r) * \mu_0)$		

Расчёт витков:

1. Красное кольцо:

- ExcellentIT: 4 витков ($B_{\max} = 189 \text{ мТл}$).
- Онлайн калькулятор: 8 витков ($B_{\max} = 189 \text{ мТл}$).
- Метод из книги Брауна: $N = 3,6$.

2. Зелёное колечко:

- ExcellentIT: 28 витков ($B_{\max} = 189 \text{ мТл}$).
- Онлайн калькулятор: 56 витков ($B_{\max} = 189 \text{ мТл}$).
- Метод из книги Брауна: $N = 27,7$.

Вывод :

По осцилограммам видно, что при малом числе витков (т.е. малой индуктивности) завышен фронт открытия полевиков, и при увеличении количества витков он становится более пологим и уменьшается ток, проходящий через ТГР .

Так же по осцилограммам видно, насколько влияют искажения исходных сигналов на ключах на итоговые сигналы на вторичной обмотке трансформатора.

В итоге я остановил свой выбор на зелёном кольце с 19 витками и потреблением платы управления 43 мА.

Последние два кольца тоже показали неплохие результаты, но из-за большой индуктивности происходит небольшой выброс на выходе преобразователя при отключении управления, у остальных колец такой эффект не проявляется.

Конечно, для полноценного исследования слишком мало тестовых экземпляров (разные кольца, разное кол-во витков и намоток), но для начального понимания работы ТГР вполне может пригодиться и облегчить жизнь таким же начинающим электронщикам, как и я .

С уважением, Михаил.

