

Простой, не требующий математических расчетов демпфер трансформатора с использованием испытательного стенда «Квазимодо»

Марк Джонсон

редакция А: 7 сентября 2013 г.

#### Абстрактный

Проектирование снаббера силового трансформатора – длительный процесс, требующий как измерений, так и расчетов. Обычно генератор синусоидальных сигналов подключается к вторичной обмотке трансформатора с закороченной первичной обмоткой. Частота синусоиды изменяется в поисках пика импеданса. Затем к вторичной обмотке подключают конденсатор известного номинала, и при второй развертке по частоте получается второй пик импеданса на второй, более низкой частоте. Две измеренные пиковые частоты импеданса дают два уравнения с двумя неизвестными (индуктивностью и емкостью), которые решаются алгебраически. Наконец, извлеченные индуктивность и емкость подставляются в уравнение демпфирования для этой RLC-цепи второго порядка, а снабберное сопротивление  $R_s$  рассчитывается, что обеспечивает желаемый коэффициент демпфирования. Предполагается, что индуктивность трансформатора примерно постоянна по частоте, что удобно для математических расчетов, но, к сожалению, неверно для реальных трансформаторов.

В этой заметке представлен другой способ проектирования демпфера, который не требует никаких расчетов, никаких допущений и требует только одного измерения. Вместо измерения параметров трансформатора и последующего расчета демпфера, эта процедура размещает фактический демпфер на трансформаторе, непосредственно наблюдает за звоном трансформатора и регулирует демпфер до тех пор, пока звон не исчезнет. Значение демпфера, которое успешно подавляет звон, затем переносится в конечную конструкцию продукта.

## Введение

В отличие от «идеального преобразователя» из теории линейных систем, физический преобразователь в реальной жизни несовершенен. Не весь магнитный поток первичной обмотки связан со вторичной обмоткой (и наоборот); эта неполная потоковая связь приводит к возникновению «индуктивности рассеяния». Кроме того, емкостная связь между обмотками не равна нулю. Эти паразитные индуктивности и емкости создают резонансный контур. Если и когда резонансный контур стимулируется, он демонстрирует колебательный звон, точно так же, как латунный колокол демонстрирует колебательный звон, когда в него ударяют звонари. {Анализ поведения резонансного контура представлен в Приложении А. Вся математика из этой заметки перенесена в приложения.}

Колебательный звон характеризуется коэффициентом затухания  $\zeta$  (греческая буква дзета). Когда  $\zeta < 1$ , говорят, что система недостаточно демпфирована и имеет колебательный звон. При  $\zeta > 1$  система перезаглушена и не звонит.

При  $\zeta = 1$  система «критически затухает», т. е. ни на рисунке 1 не показан колебательный звон резонансного контура, ни передемпфированные, ни недостаточно демпфированные. различные значения коэффициента демпфирования  $\zeta$ . Обратите внимание, что с увеличением  $\zeta$  выбросы и звон уменьшаются; а при  $\zeta > 1$  звон отсутствует вообще (желтая стрелка).

**Целью добавления демпфера во вторичной обмотке трансформатора является контроль коэффициента затухания  $\zeta$ . Цель состоит в том, чтобы гарантировать перезатухание:  $\zeta > 1$ . Тогда вторичный не могу кольцо.**

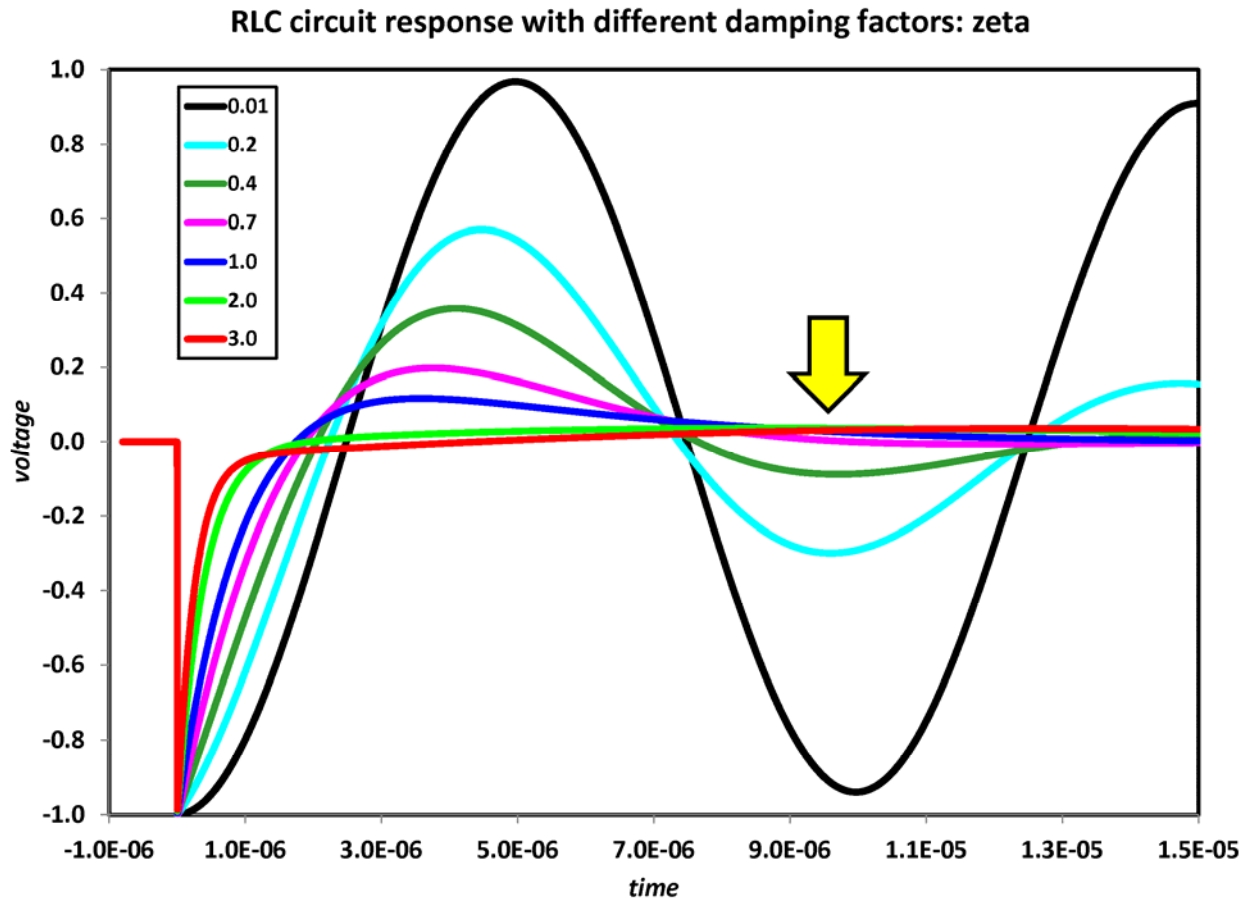


Рисунок 1.

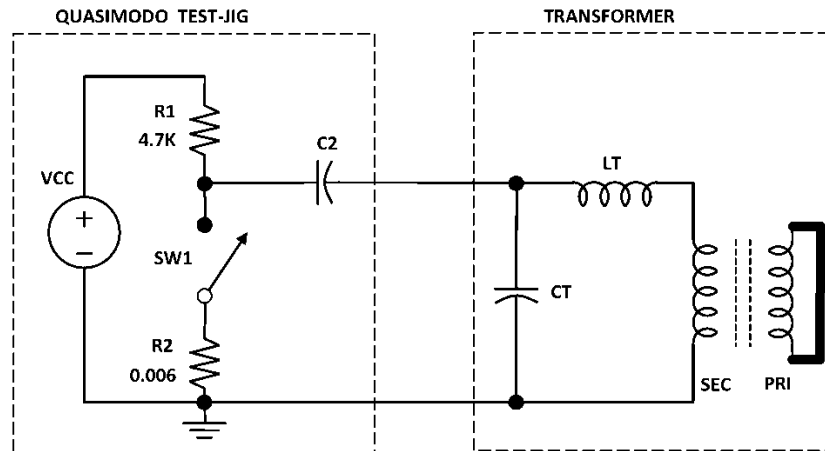
Коэффициент затухания  $\zeta$  обратно пропорционален добротности  $Q$  резонансного контура, которая Вы, возможно, столкнулись при получении лицензии на радиолюбитель:

$$\frac{1}{2\zeta}$$

Да, это действительно греческая дзета в знаменателе. По какой-то причине Microsoft Word отображает дзета для уравнений другим шрифтом, чем для основного текста. Прошу прощения за эту особенность.

## Квазимодо-звонарь

Вместо того, чтобы измерять трансформатор, а затем рассчитывать демпфер, почему бы просто не подключить *регулируемый* демпфер на вторичной обмотке, стимулируйте резонансный контур, чтобы он зазвенел, а затем регулируйте демпфер до тех пор, пока не найдете настройку, при которой весь звон полностью затухает? Просто ударьте в колокольчик и найдите демпфер, который не позволит ему звонить! Приношу извинения Виктору Гюго, я представляю здесь простой испытательный стенд, который делает именно это, под названием «Квазимодо-звонарь».



Фигура 2.

Концепция Квазимодо показана на рисунке 2. R1, R2 и переключатель SW1 образуют генератор импульсов с чрезвычайно низким выходным сопротивлением при переходе от высокого к низкому уровню (когда SW1 замыкается). LT представляет собой индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора, а CT представляет собой межобмоточную емкость вторичной обмотки. Первичная обмотка трансформатора закорочена. Конденсатор C2 подает скачок напряжения в резонансный контур. C2 — *молоток, ударяющий в колокол*.. Сейчас мы представим, что  $C2 \ll CT$ . Обратите внимание, что Квазимодо подключен к трансформатору переменного тока; нет пути постоянного тока, и испытательное приспособление не имеет возможности намагничивать сердечник трансформатора постоянным током.

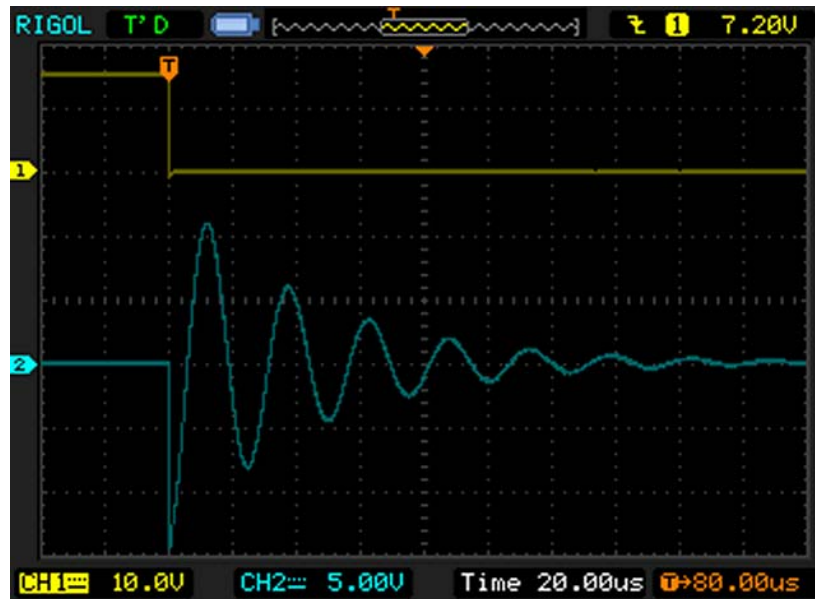


Рисунок 3.

На рисунке 3 показано, как Квазимодо управляет типичной вторичной обмоткой трансформатора (с закороченной первичной обмоткой). Канал 1 осциллографа — сигнал стимула Квазимодо (переход R1-C2), а канал 2 — вторичная обмотка трансформатора (переход CT-LT). Звонарь ударяет в колокол, который демонстрирует классические затухающие колебания. На рис.3 Квазимодо питался от источника +15 В; амплитуда колебательного звона  $\pm 11$  вольт. {Кстати, коэффициент затухания  $\zeta$  на рисунке 3 составляет приibl. 0,09. В Приложении Б показано, как вычислить  $\zeta$  по графику затухающего колебательного звона.}

## Детальная схема

На рисунке 4 показана типичная схема испытательного стенда Квазимодо. R2 и SW1 на рис. 2 заменены M1, силовым МОП-транзистором, RDS(on) которого устанавливает выходное сопротивление. Большая емкость затвора МОП-транзистора обеспечивается высоким выходным током (6 А) КМОП-ИС. Был выбран полевой МОП-транзистор с логическим уровнем, чтобы гарантировать правильную работу Квазимодо при напряжении питания ниже 2,7 В. Генератор с частотой 120 Гц использует CMOS 555 с размахом выходного сигнала от напряжения до напряжения по той же причине: выходной сигнал чипа, отличного от CMOS 555, колеблется только до  $V_{CC} - 2V_{BE}$ , что ухудшает работу при низком напряжении.

Инжекционный конденсатор C2 вставлен в гнездо с возможностью любого расстояния между выводами от 0,2 до 0,7 дюйма (от 5,0 до 17,5 мм). Это позволяет легко менять местами разные конденсаторы в позиции C2. Демпфирующий конденсатор C3 подключается по той же причине. Демпферный резистор RV1, 25-витковый подстроечный потенциометр, обеспечивает точную регулировку для достижения точного демпфирования. RV1 также имеет разъем, поэтому его можно снять и измерить его сопротивление.

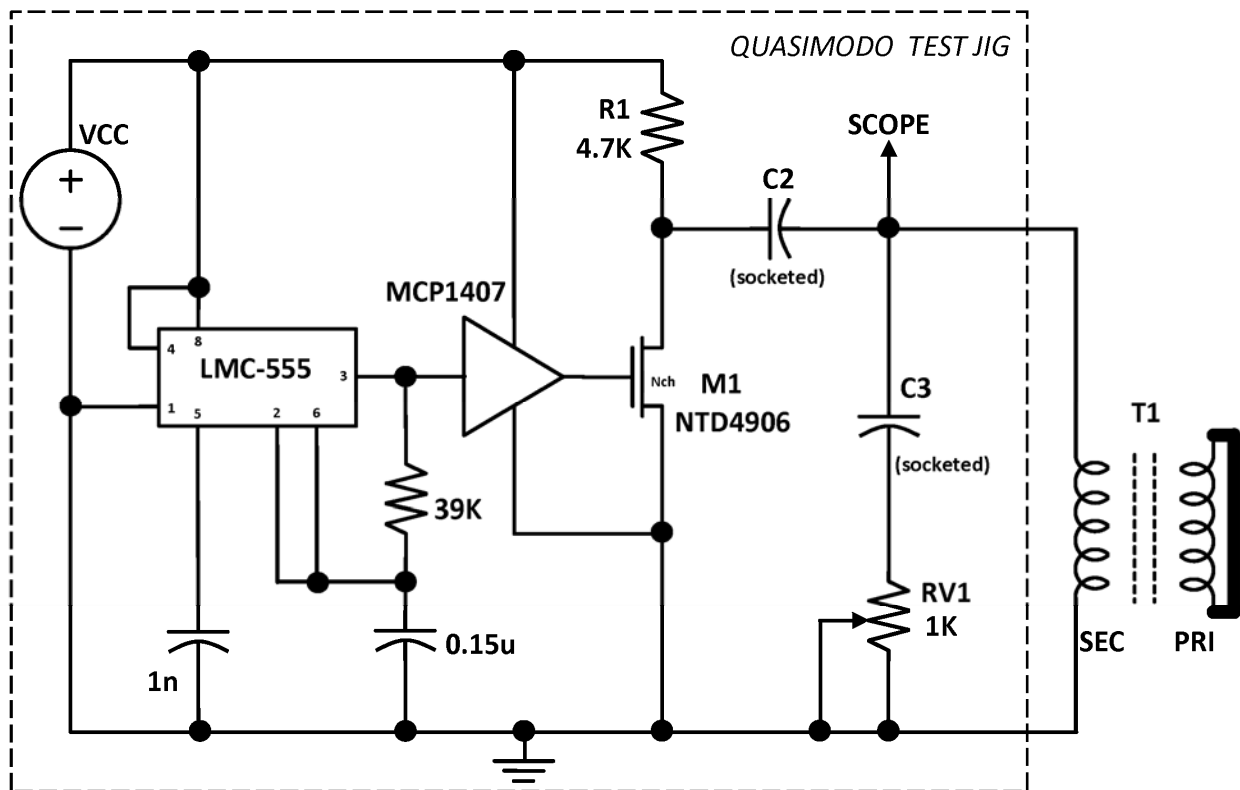


Рисунок 4.

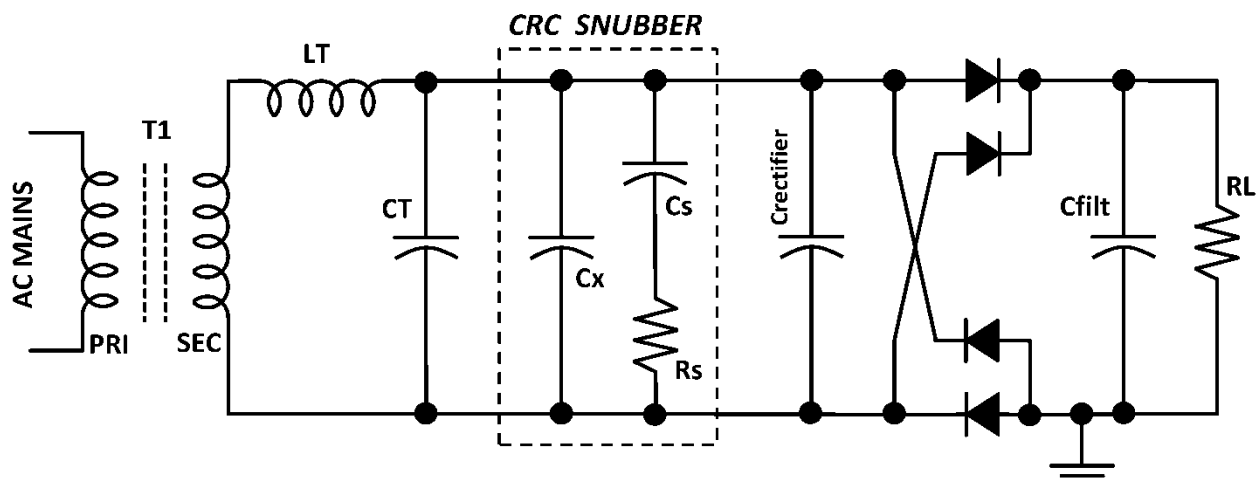


Рисунок 5.

### Моя предпочтительная реализация демпфера: трехэлементный демпфер CRC.

На рисунке 5 показана часть линейного источника питания, включая трансформатор, снаббер, выпрямительный мост, конденсатор фильтра и нагрузку. Демпфер на рис. 5 состоит из трех элементов схемы: (i) параллельного конденсатора  $C_x$ , подключенного непосредственно к вторичной обмотке трансформатора; (ii) снабберный резистор  $R_s$ , который включен последовательно с (iii) последовательным конденсатором  $C_s$ . Сеть серии  $R_s$ - $C_s$  включена параллельно вторичной обмотке трансформатора.

Демпферный конденсатор CRC  $C_x$  подключается параллельно вторичной емкости трансформатора  $C_T$ . ( $C_x$  также включен параллельно емкости выпрямителя(ов)). Следовательно, общая емкость резонансного контура представляет собой параллельную комбинацию ( $C_T + C_x + C_{\text{выпрямитель}}$ ), *именно эта общая емкость определяет колебательное поведение*. Я думаю, что есть четыре веские причины использовать конструкцию демпфера CRC, включающую конденсатор  $C_x$ .

Во-первых, топология CRC дает свободу выбора  $C_x \gg C_{\text{выпрямитель}}$ , в результате чего емкость выпрямителя составляет незначительную долю от общей суммы. Таким образом, можно использовать выпрямительные диоды, емкость которых при нулевом смещении не указана в технических характеристиках, или чьи характеристики емкости неоднозначны, или чья кривая зависимости емкости от напряжения особенно крутая. Если  $C_x \gg C_{\text{выпрямитель}}$ , просто не имеет значения, каково фактическое значение  $C_{\text{выпрямитель}}$  бывает.

Во-вторых, демпфер CRC дает свободу выбора  $C_x \gg (C_{\text{выпрямитель}} + C_T)$ , если вы того пожелаете. Это отображает ваш дизайн демпфера *нечувствителен к изменениям*  $C_{\text{выпрямитель}}$  и/или  $C_T$ . Если существует значительная вариабельность емкости выпрямителя или межобмоточной емкости трансформатора, или того и другого, вы можете легко устранить это, выбрав достаточно большое значение  $C_x$ . Поскольку  $C_x \gg (C_{\text{выпрямитель}} + C_T)$ , общая емкость ( $C_T + C_x + C_{\text{выпрямитель}}$ ) нечувствителен к изменениям  $C_T$  и/или  $C_{\text{выпрямитель}}$ , так что вам не придется о них беспокоиться.

В-третьих, при ремонте или модификации существующего аудиооборудования вполне вероятно, что  $C_x$  уже установлен в схеме. Например, в усилителе мощности Akitika GT-101 конденсатором «C5» является конденсатор  $C_x$ . В Crown IC-150 конденсаторы «C33» и «C36» — это конденсатор  $C_x$ . А в Elektor Preamp-2012 Д.Селфа  $C_x = C_{14} - C_{17} = 47 \text{ нФ}$ .

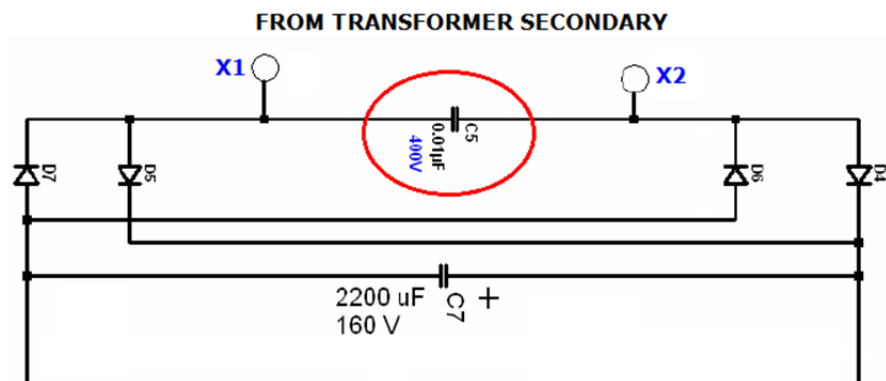


Рисунок 6. Плата блока питания Akitika GT-101, частичная схема

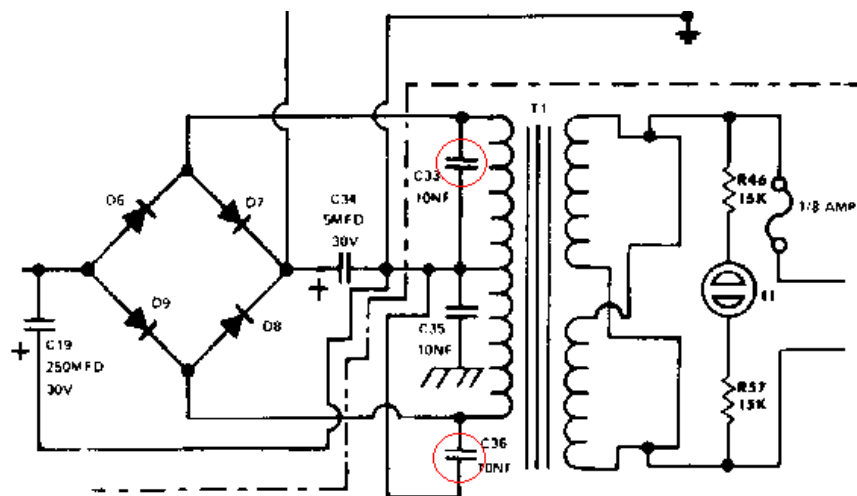


Рисунок 7. Crown IC-150, частичная схема

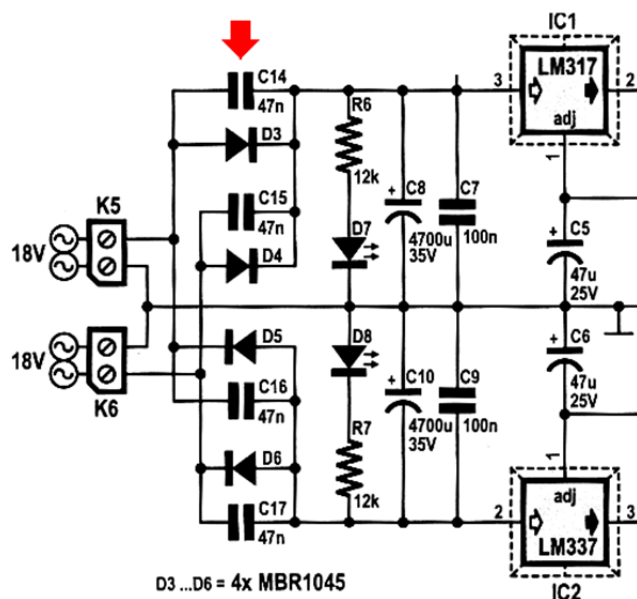


Рисунок 8. Preamp-2012, частичная схема платы питания

В-четвертых, снабберная топология CRC *явно включает в себя* Инжекционный конденсатор Квасимодо C2: Cx — это C2, а C2 — это Cx (см. рисунки 4 и 5). Таким образом, Quasimodo напрямую создаст оптимизированный демпфер CRC, не требуя каких-либо дальнейших расчетов или изменений компонентов. Когда используется демпфер CRC, нам не нужно притворяться, что C2 Квасимодо намного меньше, чем CT (см. обсуждение рисунка 2 выше).

### Рекомендации по выбору компонентов демпфера CRC

Рекомендую Cx=10 нФ, Cs=150 нФ, RV1=25 витков, триммер 1К, хотя бы как отправную точку для дальнейших экспериментов. По моему опыту, эти значения дают разумные демпферы для самых разных трансформаторов. Я предпочитаю использовать металлизированные пленочные конденсаторы для Cx и Cs из-за их превосходного коэффициента рассеяния ( $\tan \delta$ ); серия EPCOS B32529 является фаворитом.

Большинство выпрямителей имеют емкость нулевого смещения от 50 до 300 пФ. Четыре из них параллельно дают от 200 до 1200 пФ, поэтому выбор Cx = 10 нФ гарантирует  $C_x \gg C_{\text{выпрямитель}}$ .

Хотя подробности выходят за рамки этой «нематематической» заметки, я измерил/оценил вторичную емкость ТТ нескольких силовых трансформаторов, используя программу многомерного метода наименьших квадратов, чтобы соответствовать модели с шестью параметрами. Самая большая вторичная емкость, которую я когда-либо видел, составляет CT = 1,6 нФ. Таким образом, выбор Cx = 10нФ дает желаемый результат:  $C_x \gg (CT + C_{\text{выпрямитель}})$ , даже в худшем случае.

Cs должен быть больше, чем Cx (последний абзац Приложения А объясняет, почему) и в своей работе со звуком я обычно выбираю Cs примерно в 15 раз больше, чем Cx. При установке демпфера на существующее оборудование, на котором уже установлен Cx, я бы, конечно, установил Cx того же значения в испытательный стенд Quasimodo, а также установил бы Cs, который в 10 или 20 раз больше.

В конечной конструкции изделия Rs представляет собой постоянный резистор, заменяющий подстроечный резистор RV1. Быстрое моделирование SPICE {источник синусоидального сигнала ( $\text{SecondaryVrms} * 1,414$ ), управляющий демпфером CRC} покажет вам рассеиваемую мощность в рупиях. Или вы можете нарисовать цепь переменного тока и с помощью математических вычислений вычислить рассеиваемую мощность в рупиях. Для вторичного напряжения ниже прикл. Среднеквадратичное напряжение 75 В, а для типичных значений снабберного резистора ( $50 \text{ Ом} < R_s < 500 \text{ Ом}$ ) средняя рассеиваемая мощность в Rs будет менее 70 милливатт. Тем не менее, я предпочитаю использовать постоянный резистор мощностью 0,5 Вт или 0,6 Вт, чтобы обеспечить комфортный запас прочности. Некоторые авторы предлагают использовать резистор из углеродного состава для Rs, но может быть сложно найти его номиналом E48 или E96, мощностью 0,5 Вт. Я часто использую деталь из металлической пленки мощностью 0,5 Вт.

### Квасимодо в действии: отказ от трансформатора Avel Lindberg Y236602 230VA

Я купил комплект усилителя мощности Akitika GT-101, в котором в источнике питания постоянного тока используется тороидальный трансформатор AL; см. рисунок 9. GT-101 соединяет две вторичные обмотки последовательно, обеспечивая выходное напряжение 70 В переменного тока. Для работы при напряжении 115 В в США две первичные обмотки подключаются параллельно, а при работе при напряжении 230 В первичные обмотки подключаются последовательно.

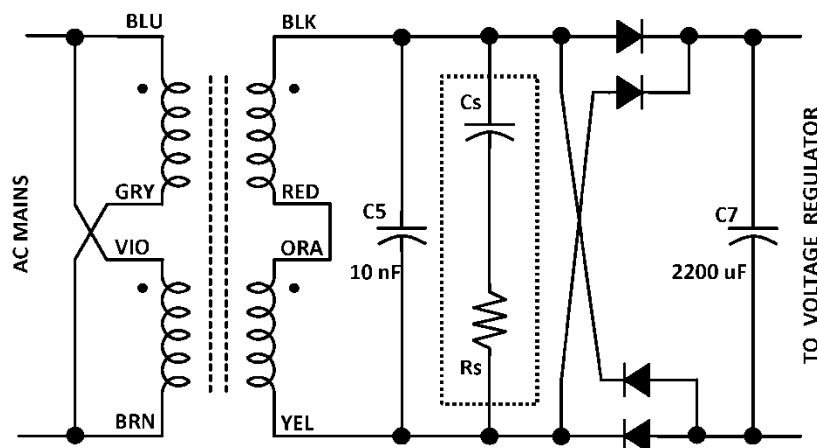


Рисунок 9. Блок питания Akitika GT-101 (конфигурация 115В)

Поскольку на плате блока питания GT-101 имеется конденсатор «C5» (0,01 мкФ), расположенный непосредственно на вторичной обмотке трансформатора, конденсатор Квазимодо  $C_x = C2$  был установлен на то же значение 0,01 мкФ. Я выбрал  $C_s = 150$  нФ (а именно  $15 \times C_x$ ), а подстроечный  $RV1 = 1$  К, 25 витков. Поскольку я планирую эксплуатировать GT-101 в США с сетью 115 В, первичные обмотки были соединены параллельно, и в результате две клеммы сети были закорочены. Вторичные обмотки были соединены последовательно и прикреплены к приспособлению Квазимодо. Результаты измерений показаны на рисунке 10.

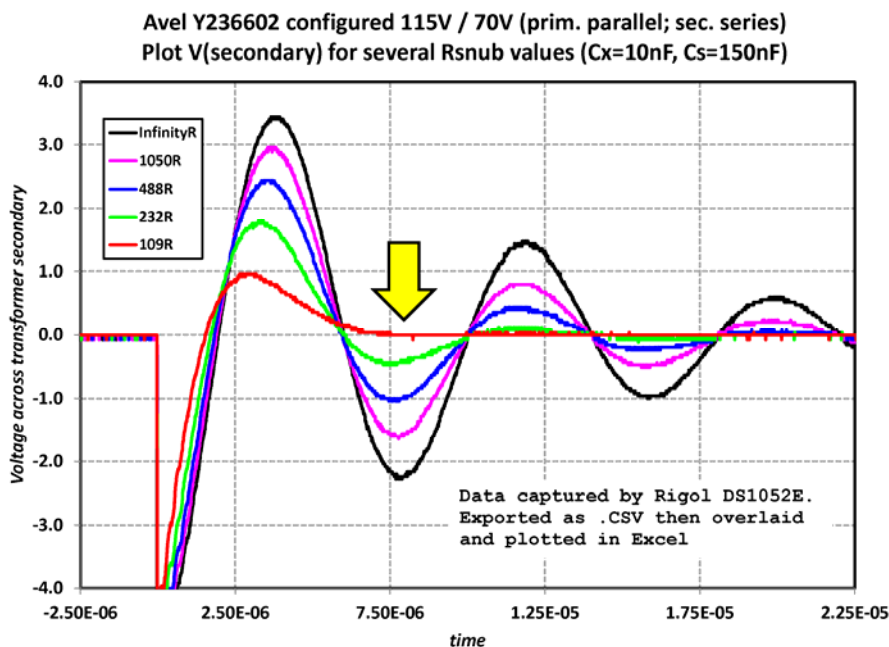


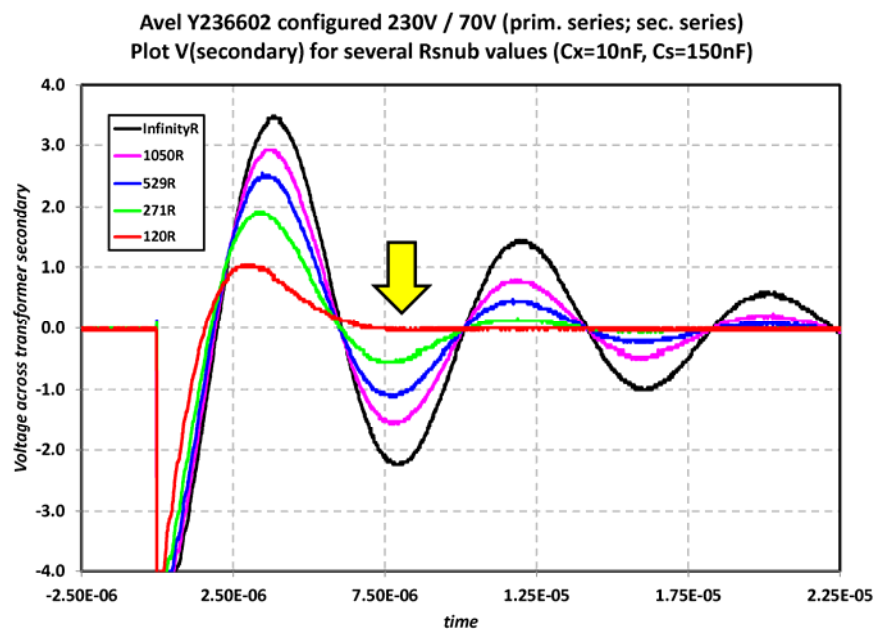
Рисунок 10.

Когда триммер 1К вынут из гнезда,  $R_s = \infty$ . Это черная линия на рис. 10. После установки триммера в положение maxR ее измеренное сопротивление составило 1050 Ом. При установке в гнездо  $RV1$  я получил розовую кривую на рис. 10. Повторив эту процедуру (adjust, save\_waveform, Measure\_trimmer) еще несколько раз, я получил синюю, зеленую и красную дорожки на рис. 10. Они соответствуют 488 Ом., 232 Ом и 109 Ом соответственно. Мой некалиброванный глаз говорит мне, что красная кривая приближается к критическому затуханию ( $\zeta = 1$ ) в точке желтой стрелки, поэтому я думаю, что



Подходящая конструкция демпфера для этой схемы трансформатора: ( $C_x=10\text{nF}$ ;  $C_s=150\text{nF}$ ;  $R_s=110\text{R}$ ). На самом деле, я бы сказал, что этот демпфер практически оптимален.

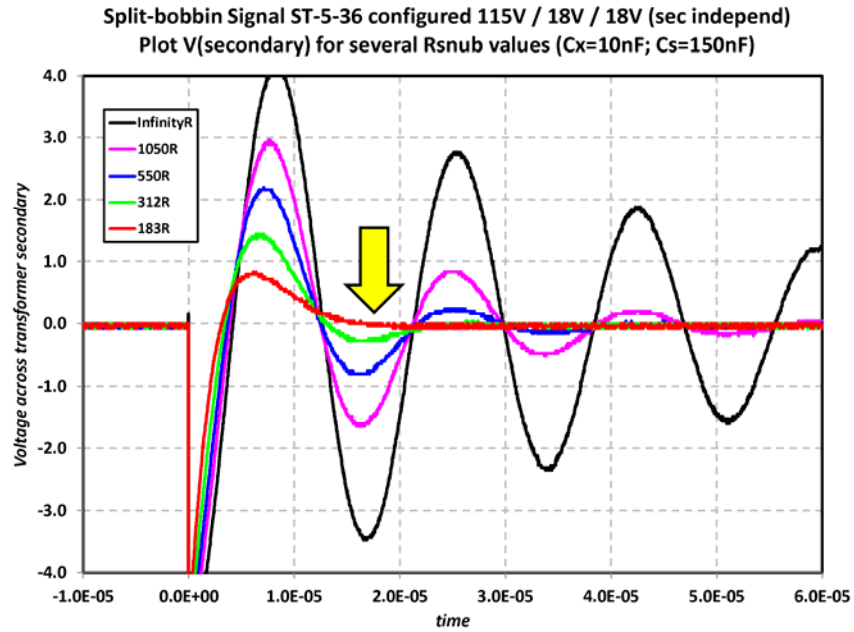
Тогда я задался вопросом: если первичная обмотка этого трансформатора настроена на напряжение 230 В вместо 115 В, потребуется ли другой демпфер на вторичной обмотке? Поскольку индуктивность рассеяния первичной обмотки отражается обратно на вторичную обмотку (умноженная на квадрат коэффициента витков), а конфигурация на 230 В (первичные обмотки соединены последовательно) будет иметь в 4 раза большую индуктивность рассеяния первичной обмотки, я сделал безрассудное предположение, что индуктивность рассеяния первичной обмотки на 230 В Конфигурация будет иметь больший LT (если смотреть на вторичную обмотку), следовательно, больший характеристический импеданс, поэтому потребуется более высокий демпфер  $R_s$ . К счастью, Квасимодо позволяет измерения (а не просто гадать) оптимальное сопротивление демпфера; Результаты измерений представлены на рисунке 11. Как и предполагалось/предполагалось, снаббер конфигурации 230 В действительно имеет более высокое оптимальное значение  $R_s$ .



**Рисунок 11.**Оптимальное значение  $R_s$  для конфигурации 230 В выше: 120 Ом, а не 110 Ом.

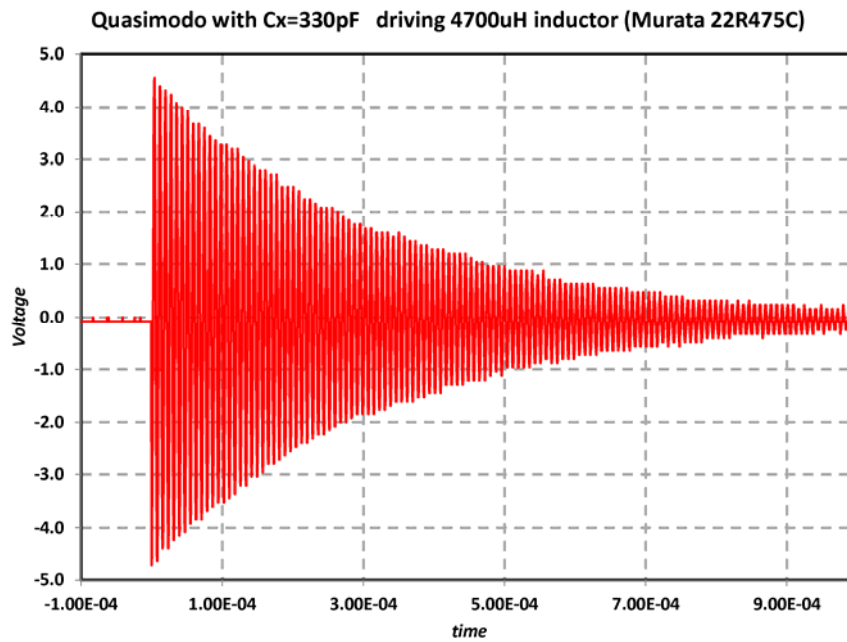
### Дополнительные примеры измерений Квасимодо

На рисунке 11 показана сходимость к оптимальному демпферу CRC для модели трансформатора сигналов ST-5-36 (трансформатор с разъемным катушечным сердечником). При  $C_x=10\text{nF}$  и  $C_s=150\text{nF}$  оптимальное значение  $R_s$  составило 183 Ом.



**Рисунок 11.**

На рисунке 12 показано, как Квазимодо управляет фиксированной катушкой индуктивности, а не вторичной обмоткой трансформатора. Инжекционный конденсатор  $C_x$  имел емкость 330 пикофарад, демпфер не был установлен ( $R_s$  = бесконечность). Очень низкий коэффициент демпфирования  $\zeta$  (очень высокая добротность) указывает на то, что приспособление Квазимодо само по себе вносит очень незначительное дополнительное (паразитное) демпфирование. Это связано с очень низким значением  $R_{DS(on)}$  MOSFET и компоновкой печатной платы с очень низким импедансом силовых прямых и обратных путей.



**Рисунок 12.**

Демпферы для различных вторичных цепей трансформатора и способы подключения каждой из них к Квазимодо

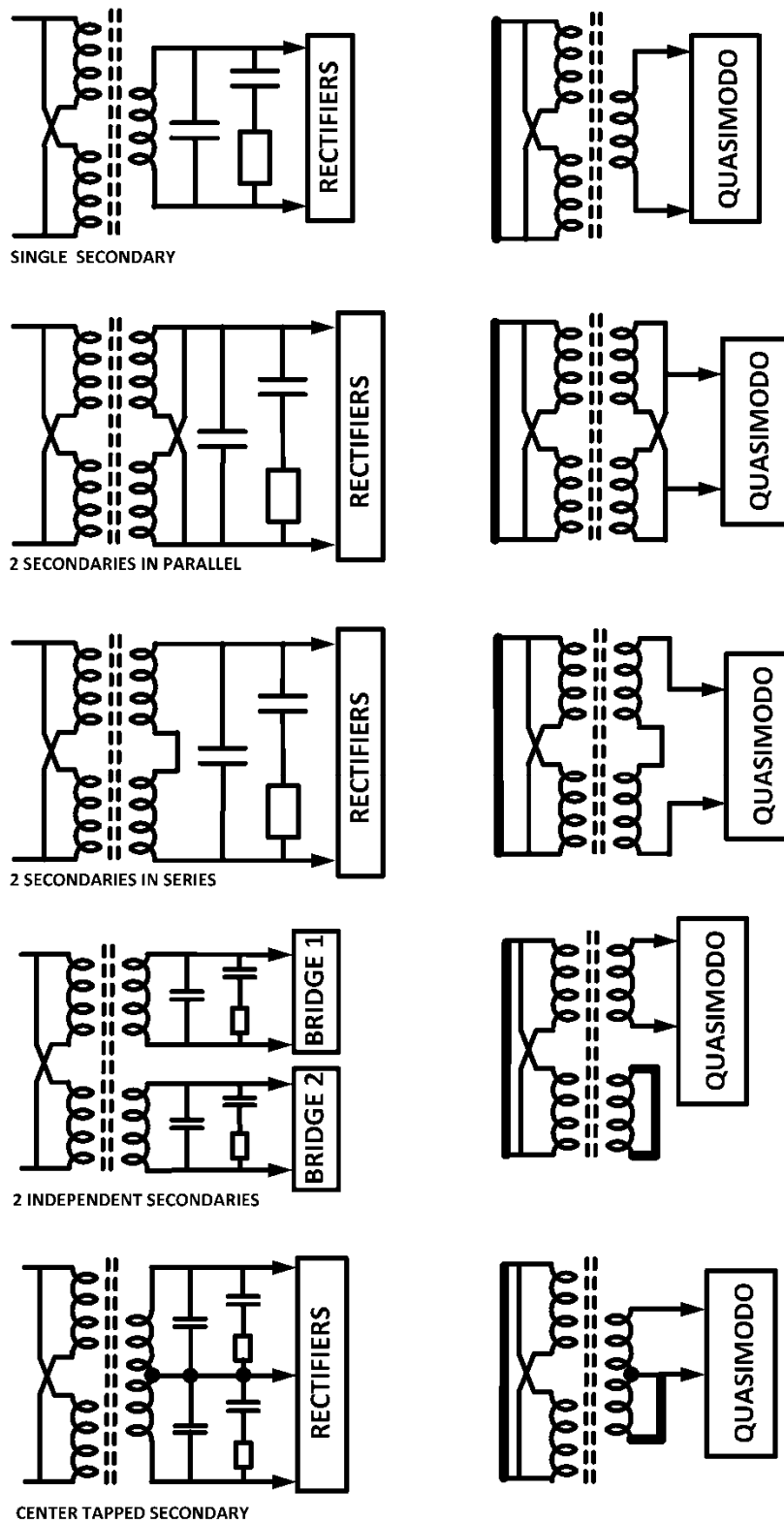


Рисунок 13.

Первые три конфигурации просты. В каждом случае нижестоящая схема источника питания подключается к трансформатору ровно в двух узлах. Демпфер подключен между этими двумя узлами. Таким образом, к этим же двум узлам схемы подключается испытательное приспособление Квазимодо, которое на самом деле представляет собой не что иное, как демпфер.

Двойной вторичный трансформатор с независимыми вторичными цепями (4-й ряд) подключается на выходе *четыре* узлы схемы, и для этого нужны два демпфера. Один демпфер для верхней вторичной цепи, а другой демпфер для нижней вторичной цепи. Закоротите Нижнюю вторичную обмотку при подключении Верхней обмотки к Квазимодо и наоборот. Я проверяю только одну обмотку, а затем предполагаю, что другая примерно идентична. Скептик дважды выдвинул бы Квазимодо.

Трансформатор с центральным отводом (5-й ряд) подключается к нисходящему источнику питания на *три* узлы схемы. Ему необходимы два демпфера: первый демпфер между верхней обмоткой и центральным отводом; и второй демпфер между нижней обмоткой и центральным отводом. Чтобы оптимизировать демпфер, закоротите одну из вторичных обмоток на центральный отвод, а другую обмотку + центральный отвод подключите к Квазимодо. Скептик предположил бы, что две обмотки не идентичны, и поэтому скептик оптимизировал бы верхний демпфер, а затем отдельно оптимизировал бы нижний демпфер. Я запускаю Квазимодо только на одной обмотке, а затем использую эти значения для обеих. Я не скептик.

## Запуск осциллографа

Вы можете получить удивительно чистые и стабильные осциллограммы от Квазимодо, если используете двухканальный осциллограф. Как показано на рисунке 4, канал 1 подключается к дренажному контакту полевого МОП-транзистора (левая сторона C2), а канал 1 запускает осциллограф по очень острому и чистому спадающему фронту. Канал 2 подключается к вторичной обмотке трансформатора (правая сторона C2) и отображает колебательный звон. Это именно та установка, которая использовалась для создания фотографии прицела, показанной на рисунке 3. Подсказка № 1: Если у вас есть гнездо для C2, и если в этом гнезде есть множество отверстий для размещения нескольких выводов конденсатора, вы можете подключить отрезки соединительного провода длиной ~ 1 см. в неиспользуемые гнезда и прикрепите к ним зонды. Совет №2: после настройки уровня запуска на канале 1 и получения стабильных сигналов вы можете настроить осциллограф так, чтобы он работал только *дисплей* канал 2. Это упрощает экран.

Если у вас есть только одноканальный осциллограф (или если вы можете найти только один рабочий зонд!), вы можете просмотреть вторичную форму сигнала трансформатора. *итриггер* на нем: показано на рисунке 3. Подключив пробник к узлу трансформатора (нижняя кривая), выполните запуск по спадающему фронту и установите уровень запуска в самом низу начального спадающего фронта. На рисунке 3 это будет примерно на два с половиной деления ниже базовой линии; т. е. около  $(-2,5 \times 5 \text{ В/дел}) = -12,5 \text{ В}$ . Это будет не так чисто, как двухканальная установка, но ее можно будет использовать.

## Двухэлементный RC-демпфер (не рекомендуется)

Некоторые люди предпочитают исключить конденсатор Cx из рисунка 5, который образует двухэлементный демпфер «RC», состоящий из R и Cs. Эту конструкцию демпфера можно заставить работать, но я считаю, что он уступает демпферу CRC по четырем причинам, обсуждавшимся ранее. Тем не менее, если вы абсолютно настаиваете на создании двухэлементного демпфера, Quasimodo все равно может оказаться полезным инструментом.

Один из подходов — выбрать в Квазимодо инжекционный конденсатор очень маленького размера  $C_x = C_2$ . Поскольку  $C_x$  увеличивает общую емкость ( $C_T + C_x + C_{\text{выпрямитель}}$ ) во вторичной обмотке, RC-демпфер хочет, чтобы  $C_x$  было пренебрежимо малым по сравнению с ( $C_T + C_{\text{выпрямитель}}$ ). Если это так, то ошибка, возникающая из-за присутствия крошечного  $C_x$  в тестировании Квазимодо, но отсутствующего в окончательном проекте продукта, очень мала.

Я успешно использовал Quasimodo для оптимизации двухэлементных RC-демпферов с инжекционным конденсатором  $C_x = C_2$  емкостью всего 33 пФ. Естественно, это дает очень слабый выходной сигнал, но я считаю, что он наблюдаем и измерим. Регулировка напряжения питания, питающего Квазимодо, может помочь зафиксировать сплошной сигнал на экране осциллографа. На рисунке 14 показан пример.

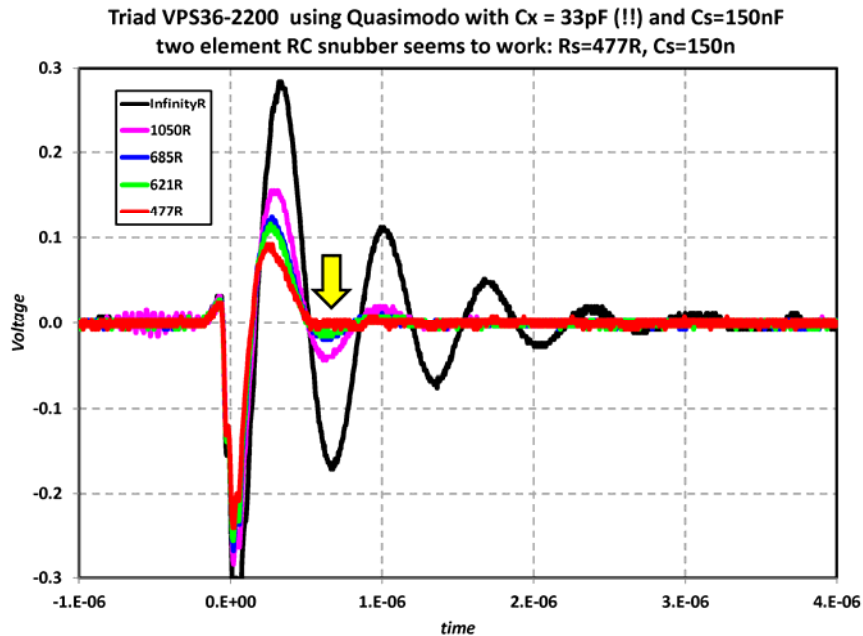


Рисунок 14.

Общая емкость вторичной обмотки при использовании двухэлементного RC-демпфера значительно ниже, чем при использовании CRC. Таким образом, характеристическое сопротивление вторичной обмотки намного выше, и поэтому оптимальное демпфирующее сопротивление намного выше: 477 Ом, а не прибл. 120 Ом, как в демпферах CRC, использующих  $C_x=10$  нФ. Критическое демпфирование с помощью двухэлементного демпфера выглядит довольно хорошим, хотя отображение сигналов с напряжением менее 100 мВ на этом осциллографе оставляет желать лучшего.

Если вы все же решите использовать двухэлементный RC-демпфер, обязательно смоделируйте или рассчитайте среднюю мощность, рассеиваемую на резисторе  $R_s$ , и выберите деталь, номинальная мощность которой значительно выше.

#### **Звонок (стимул), вызывающий колебания реального источника питания: выключение диода.**

До сих пор мы просто наблюдали, что вторичная обмотка силового трансформатора может проявлять колебательный звон, если стимулировать. Мы также научились переглушать вторичную обмотку, чтобы полностью исключить ее звон даже при стимуляции. Но до сих пор мы не обсуждали, что может быть стимулом. Ответ: выключение выпрямительного диода.

Синусоидальное выходное напряжение вторичной обмотки трансформатора подается на выпрямитель(и) + конденсатор(ы) фильтра. Когда вторичное напряжение превышает  $V_{cap} + V_{diode}$ , выпрямитель включается и трансформатор подзаряжает конденсатор фильтра. После того, как синусоида достигает пика и вторичное напряжение начинает падать, в конечном итоге оно падает ниже  $(V_{cap} + V_{diode})$  и выпрямитель отключается. К сожалению, некоторые выпрямительные диоды имеют неконтролируемые или плохо контролируемые характеристики выключения и выключаются чрезвычайно быстро. Особенно неприятны выпрямители, которые выключаются «резко», т. е. при очень больших  $dI/dt$ . ***Резкое выключение диода с чрезвычайно большим  $dI/dt$  является стимулом, вызывающим колебательный звон во вторичных цепях трансформатора.*** Большой  $dI/dt$  немедленно проявляется в виде большого напряжения на индуктивности рассеяния (напомним:  $V = L dI/dt$ ), и этот большой скачок напряжения является началом колебательного звона.

"Aga!" люди восклицали: «Тогда давайте найдем и будем использовать выпрямительные диоды, закрытие которых гарантированно будет иметь небольшое значение  $dI/dt$ !» Наш колокольчик-трансформер никогда не зазвонит, потому что в него никогда не ударят!» Такие выпрямительные диоды существуют, и в технических характеристиках их производителя гарантировано небольшое значение  $dI/dt$  в выключенном состоянии. Они называются диодами с «мягким восстановлением», и новейшие модели имеют спецификацию в таблице данных под названием «коэффициент мягкости» ( $T_b / T_a$ ), который количественно определяет, насколько на самом деле низко их  $dI/dt$ . Будьте осторожны: диоды с мягким восстановлением часто имеют очень большое падение напряжения в прямом направлении, иногда превышающее 2,5 В, поэтому очень внимательно рассчитывайте запас по напряжению питания (запас). Также рассчитайте рассеиваемую мощность выпрямителя; для диодов с мягким восстановлением может потребоваться радиатор значительно большего размера, чем для стандартных диодов (или диодов Шоттки) с низким  $V_{fwd}$ .

С философской точки зрения я предпочитаю использовать подход «ремни и подтяжки»: предотвратить вторичный звон трансформатора двумя разными способами. Во-первых, приглушите (слишком ослабьте) вторичную обмотку, чтобы она не могла звонить, даже если ее стимулировать. Во-вторых, используйте выпрямители с мягким восстановлением, чтобы вторичную обмотку нельзя было стимулировать. Особенно в самодельном оборудовании, где стоимость демпфера CRC совершенно незначительна, *Я считаю, что вообще нет смысла игнорировать демпферы.* Выпрямители с мягким восстановлением Fairchild «Stealth» немного дороже, чем кремниевые мостовые выпрямители в сборе, а диоды Vishay «Hex FRED» еще дороже. Но даже это всего лишь 2,28 доллара в количестве десять; покупка 8 из них для пары полностью независимых мостовых выпрямителей на шинах самодельного усилителя мощности обойдется всего в 18,25 доллара. Менее двух входных билетов в кино. Бюджеты проектов DIY могут себе это позволить.

Я думаю, что на конкурентной арене коммерческих продуктов, рассчитанных на определенную цену, демпферы (изготовленные из низкотехнологичных пассивных компонентов) значительно дешевле в поиске и внедрении, чем новые, современные выпрямители с мягким восстановлением. Поэтому, если бы передо мной стояла задача создавать и продавать усилители мощности по цене менее 2 долларов США за среднеквадратичный ватт, я бы, вероятно, включил демпферы и оставил диоды мягкого восстановления.

#### **Другое испытательное оборудование, подобное Квазимодо.**

Через несколько недель после того, как я создал и начал использовать первую версию Quasimodo, я обнаружил, что другие люди уже давно делали очень похожие вещи. В частности, компания Boonton Radio Corporation продала «измеритель добротности», который измеряет добротность катушек индуктивности и трансформаторов, используемых в радиочастотных приложениях. Его принцип работы такой же, как у Квазимодо: Q-метр управляет индуктором или трансформатором на частотах, близких к собственному резонансу, от генератора сигналов с чрезвычайно низким выходным сопротивлением. Контролируя форму сигнала на катушке индуктивности с помощью усилителя с высоким входным сопротивлением (Квазимодо использует осциллограф), Q-метр измеряет затухание и, следовательно, добротность. Напомним, что  $Q = 1/(2 \times \zeta)$ .

Компания AnaTek продает электронный комплект под названием «Тестер синего кольца», который проверяет высокочастотные индукторы и обратноходовые трансформаторы на наличие коротких обмоток и других дефектов, ухудшающих добротность. Подобно Квасимодо, он подает импульс тока через конденсатор связи переменного тока в испытуемый индуктор. Затем он подсчитывает количество циклов колебательного звона до полного затухания синусоиды. Множество колец соответствуют множеству светящихся светодиодов на передней панели измерителя. На рисунке 15 из руководства пользователя показано, как он работает.

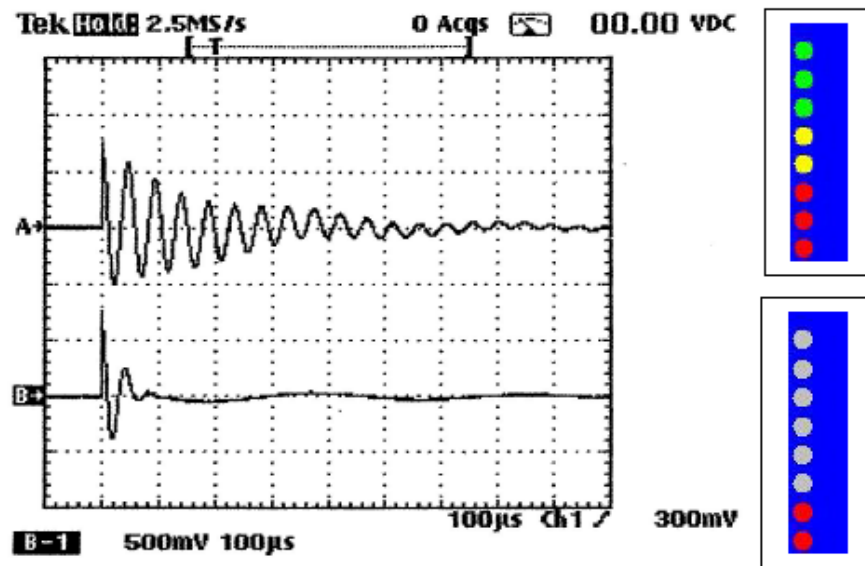


Рисунок 15.Комплект AnaTek Blue Ring для проверки исправных (вверху) и закороченных (внизу) индукторов

#### Рекомендации

Хагерман, Джим (1995). *Расчет оптимальных демпферов*. Получено 7 сентября 2013 г. с:

<http://www.hagtech.com/pdf/snubber.pdf>.

Джонс, Морган (2013). Шумоподавление выпрямителя – предыстория и передовой опыт, *Линейное аудио – Том 5*, (стр. 7-26). Кастрикум (Нидерланды): F&N Эйген Бехеер. Также <http://www.linearaudio.net>.

Отдел приложений, APD Semiconductor (2006). *AN1012 – Обратное время восстановления супербарьера выпрямитель*. Получено 7 сентября 2013 г. с: [http://www.diodes.com/pdfs/apd/AN-1012\\_TRRComparison\\_v0.2.pdf](http://www.diodes.com/pdfs/apd/AN-1012_TRRComparison_v0.2.pdf).

Корнелл Дубилье, Инс. (2005). *Руководство по применению – Проектирование RC-снабберных сетей*. Получено в сентябре. 7, 2013 от: <http://www.cde.com/catalogs/igbtAPPguide.pdf>.

Бассо, Кристоф (2005). *Как бороться с элементами утечки в обратноходовом преобразователе: AN1679/D*. Получено 7 сентября 2013 г. с: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Col Lateral/AN1679-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Col Lateral/AN1679-D.PDF).

Hewlett Packard. (2012). *Измеритель добротности Boonton Type 160-A, 1946 год*. Получено 7 сентября 2013 г. с: <http://www.hp.com/hpinfo/about/hp/histnfacts/museum/earlyinstruments/0010/>.

Батлер, Ллойд (1988). *Экспериментальный «Q»-метр*. Получено 7 сентября 2013 г. с: <http://users.tpg.com.au/users/ldbutler/QMeter.htm>.

АнаТек Корп (2012). *Комплект тестера Blue Ring в сборе и руководство пользователя*. Получено 7 сентября 2013 г. с: <http://shop.anatekcorp.com/clientuploads/directory/products/pdfs/BLUErt%201.pdf>.

## Приложение А: Анализ резонансного контура RLC

На принципиальной схеме, показанной на рисунке 16, источник напряжения (стимул) управляет цепью RLC через инжекционный конденсатор  $C_x$ . Источник напряжения представляет собой генератор импульсов Квасимодо;  $C_x$  – инжекционный конденсатор Квасимодо  $C_x = C_2$ ; дроссель  $L$  — вторичная индуктивность рассеяния трансформатора; конденсатор  $CT$  — это вторичная емкость трансформатора плюс емкость выпрямителя; а резистор  $R$  представляет собой «снабберный» резистор, оптимальное значение которого мы ищем.

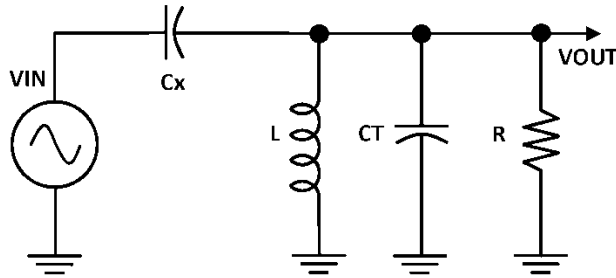


Рисунок 16.

Передачная функция  $V_{out}/V_{in}$  представляет собой простой делитель напряжения, состоящий из двух импедансов. Нижнее сопротивление « $Z_p$ » представляет собой параллельное соединение  $L$ ,  $CT$  и  $R$ :

$$\frac{1}{\frac{1}{L} + \frac{1}{CT} + \frac{1}{R}} \quad \text{---} \quad (A.1)$$

а верхний импеданс — это инжекционный конденсатор  $C_x$ :

$$\text{---} \quad \frac{1}{C_x} \quad (A.2)$$

подставляя (П.1) в (П.2):

$$\frac{\text{---}}{\frac{1}{\frac{1}{L} + \frac{1}{CT} + \frac{1}{R}}} \quad (A.3)$$

умножив числитель и знаменатель на  $sC_x$ :

$$\frac{\text{---}}{1 \cdot \text{---}} \quad (A.4)$$

очистка дробей:

$$\text{---} \quad (A.5)$$



собираю слагаемые в знаменателе:

$$\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{A.6})$$

Теперь разделим числитель и знаменатель на  $LR(Cx+CT)$ :

$$\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{A.7})$$

Заметим, что это система второго порядка, поскольку знаменатель квадратичен по  $s$ . Каноническая форма знаменателя системы второго порядка:

$$\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{A.8})$$

Приравнявая знаменатели (П.7) и (П.8), получаем

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (\text{A.9})$$

Их решения (подставив второе уравнение в первое):

$$\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{A.10})$$

$\omega_n$  – «собственная частота» системы, а  $\zeta$  – коэффициент затухания. Наша цель — выбрать демпфирующий резистор  $R$  так, чтобы ( $\zeta > 1$ ), т. е. передемпфировать систему. Цель достигается, когда

$$2\zeta\omega_n > \omega_n^2 \quad (\text{A.11})$$

Правую часть уравнения (A.11) иногда называют «характеристическим сопротивлением» резонансного контура, поскольку оно принимает ту же функциональную форму, что и характеристическое сопротивление  $Z_{0из}$  линия передачи без потерь:

На практике значения снабберного резистора, определяемые (A.11), обычно довольно малы (менее 1 кОм), и поэтому идеализированная схема на рисунке 16 рассеивает большую мощность на резисторе  $R$ . Чтобы устранить эту бесполезную потерю мощности, Конденсатор  $C_s$  включен последовательно с  $R$ , выбранным таким образом, чтобы полное сопротивление  $C_s$  было очень большим на частоте сети переменного тока, но очень малым на резонансной частоте  $\omega_n$ . На практике установка  $C_s$  в десять или двадцать раз больше, чем  $C_x$ , оказалась полезной эвристикой.

## Приложение В: Оценка $\zeta$ резонансного контура по его форме сигнала во временной области

Форма сигнала затухающих колебаний резонансного контура во временной области, например, показанная на осциллограмме на рисунке 3, представляет собой затухающую экспоненту, умноженную на синусоида:

$$u(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (\text{Б.1})$$

Если мы измерим напряжения на двух пиках формы сигнала с интервалом в  $N$  циклов, отношение этих напряжений будет равно

$$\frac{u_1}{u_2} = e^{\delta T_d} \quad (\text{Б.2})$$

где  $T_d$  это период синусоиды.

Теперь вычислим «логарифмический декремент»  $\delta$ , определяемый как

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{u_1}{u_2} \quad (\text{Б.3})$$

Подставляя (Б.2) в (Б.3):

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{u_1}{u_2} = \frac{1}{N} \ln \frac{A e^{-\delta T_d} \sin(\omega t_1)}{A e^{-\delta T_d} \sin(\omega t_2)} \quad (\text{Б.4})$$

таким образом, коэффициент затухания  $\zeta$  можно извлечь из логарифмического декремента  $\delta$ :

$$\zeta = \frac{\delta}{\omega} \quad (\text{Б.5})$$

В качестве примера давайте рассчитаем  $\delta$  и  $\zeta$  для сигнала во временной области, показанного на рисунке 3.

Первый положительный пик на рисунке 3 расположен приibl. (12 мкс, 11 В), а четвертый положительный пик расположен приibl. (88 мкс, 2 В). Пики находятся на расстоянии 3 циклов друг от друга:  $N = (4 - 1) = 3$ . Таким образом,  $\delta = (1/3) \ln(11/2) = 0,568$ . Подставив это в (Б.5), получим, что  $\zeta$  равно 0,09. Форма сигнала во временной области на рисунке 3 сильно затухает!

Если вы сохраните точки выборки цифрового осциллографа (время, напряжение) в файле .CSV, вы сможете более точно определить местонахождение пиков сигнала и, следовательно, более точно оценить  $\zeta$ .

#### Приложение С: Использование Quasimodo и математика

Несмотря на то, что эта заметка обещает «не математические» демпферы, использующие Квазимодо, стоит помнить, что *выдопустимый* использовать математику с Квазимодо, если хотите; это не противоречит закону. Чтобы назвать один пример, вы можете использовать Quasimodo и математику, чтобы оценить числовые значения LT (вторичной индуктивности рассеяния) и СТ (вторичной емкости), если вы того пожелаете.

Для этого выньте СЗ из гнезда, затем с помощью Квазимодо простимулируйте вторичную обмотку трансформатора при закороченной первичной обмотке. Запустите его с несколькими различными номиналами инжекционного конденсатора Сх и запишите в таблицу измеренные резонансные частоты в зависимости от Сх. (Вот почему вам нужно, чтобы Сх был подключен к разъему.) Обычно я использую два значения емкости за декаду, поэтому я проверяю с Сх = 33 пФ, 100 пФ, 330 пФ, 1 нФ, 3,3 нФ, 10 нФ, 33 нФ и т. д. Квазимодо измеряет резонансы ( LT || (33пФ+ТТ)), (LT || (100пФ+ТТ)), (LT || (330пФ+ТТ)) и так далее.

Резонансный контур с высокой добротностью (низким ζ), состоящий из катушки индуктивности LT, включенной параллельно с конденсатором (Сх + СТ), будет резонировать на частоте f, определяемой уравнением (С.1):

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{\text{---}} \quad (\text{C.1})$$

Перестановка,

$$\frac{1}{2} = \text{---} \quad (\text{C.2})$$

Обе стороны возведите в квадрат:

$$\frac{1}{2} = \text{---} \quad (\text{C.3})$$

Теперь произведем замену переменных:

$$\frac{1}{2} = \text{---} \quad (\text{C.4})$$

Который дает:

$$(\text{C.5})$$

Вуаля, (В.5) представляет собой линейное уравнение стандартной формы, что предполагает использование *линейная регрессия* чтобы извлечь крутизну m (индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора LT) и точку пересечения b (которая равна LT\*СТ). Вы можете регрессировать Сх против (1/2πf) либо с помощью MS Excel, либо с помощью калькулятора HP; Excel построит линию регрессии поверх ваших данных, чтобы вы могли увидеть, насколько хорошо модель соответствует измеренным резонансным частотам. Но вообще, зачем вам измерять LT и СТ? Вы можете построить оптимальный демпфер, даже не зная его числовых значений.

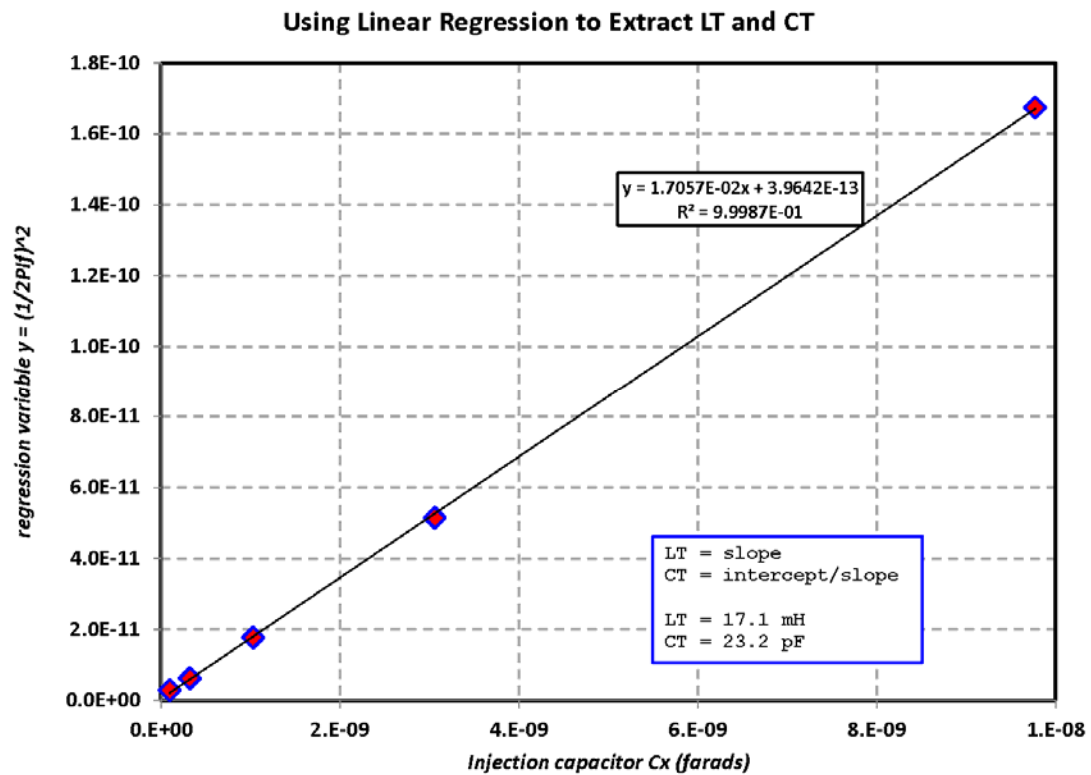
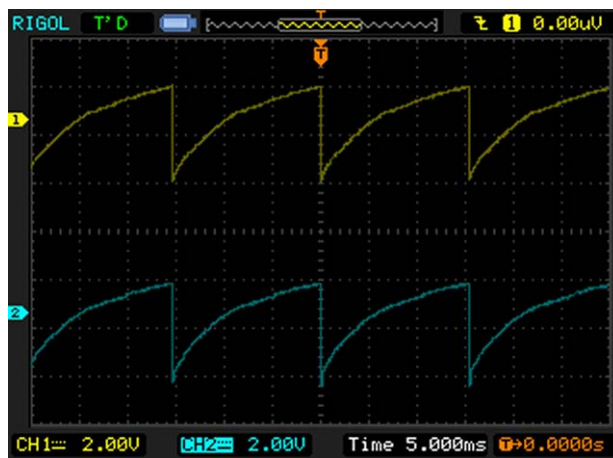


Рисунок 17.

#### Приложение D: Проверка полярности обмотки трансформатора

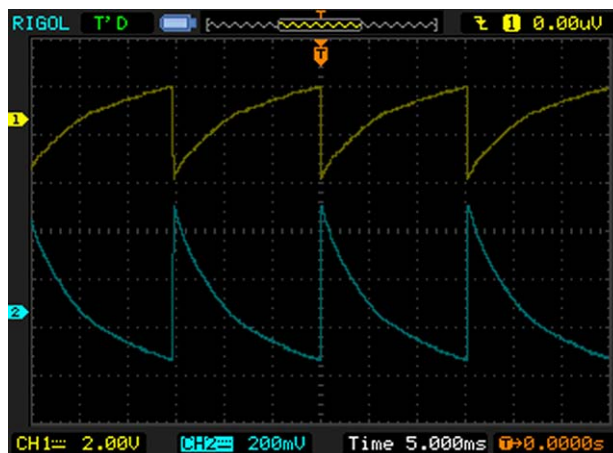
Чрезвычайно важно правильно маркировать полярность обмоток трансформатора; «точечное соглашение» на принципиальных схемах обозначает клеммы с одинаковой полярностью. К сожалению, не на всех трансформаторах имеются этикетки с точками полярности обмотки. Еще хуже, *некоторые трансформаторы маркированы неправильно (!)* Это та область, где оправдан здоровый скептицизм; небезопасно и неразумно слепо доверять данным производителя или этикетке, наклеенной на трансформатор. Вы, конечно же, не захотите взорвать дорогой трансформатор, случайно подключив одну из его обмоток наоборот. Не доверяйте; проверяйте.

Я считаю, что самый простой способ проверить полярность — использовать тестовый сигнал с крайне асимметричной формой волны. Не синусоида, не треугольная волна, не идеально прямоугольная волна; все они симметричны. Я использую пилообразную волну, но подойдет и прямоугольная волна с коэффициентом заполнения 10%. Вам нужна форма волны, которую легко отличить от перевернутой. Подайте тестовый сигнал на точечный конец обмотки 1 и проконтролируйте обмотку 2 на прицеле. Если он расположен правой стороной вверх, то щуп прицела находится на конце обмотки 2 с точкой. Если перевернут, щуп находится на конце без точек.



(вверху): Датчик канала 2 подключен к «точечному» концу обмотки 2.

(внизу): Датчик канала 2 подключен к «непунктированному» концу обмотки 2.



Quasimodo — это инструмент для тестирования, и я призываю читателей модифицировать и улучшать его по своему усмотрению. Проект, представленный в этой заметке, вероятно, включает в себя несколько решений, которые другие приняли бы иначе. Измени это! Настройте Quasimodo в соответствии со своими потребностями.

Например, я намеренно построил приспособление «Квазимодо» для питания от внешнего источника питания с регулируемым напряжением. Я хотел иметь возможность выбирать напряжение питания от очень низкого (2,5 В) до очень высокого (18 В, ограниченное VGSmax MOSFET). Возможно, вам не нужен или не нужен такой большой диапазон питания, поэтому вы можете построить испытательное приспособление Quasimodo с разъемом «бочонок» для входной мощности, которая поступает от адаптера переменного тока Wall Wart. Или вы можете запустить его от аккумуляторной батареи на 9 В.

Если вам не нужна или не нужна работа при низком напряжении, вы можете выбрать стандартный пороговый MOSFET вместо порогового логического вентиля NTD4906, который я использовал. Между прочим, несмотря на то, что NTD4906 находится в корпусе IPAK (между выводами 0,090 дюйма), я разместил свою печатную плату со сквозными отверстиями с размером корпуса TO220 (между выводами 0,100 дюйма). Это дает возможность при желании заменить другие МОП-транзисторы. Выводы IPAK легко распределить так, чтобы он соответствовал занимаемой площади TO220.

Я также построил Quasimodo на печатной плате для поверхностного монтажа. Для LMC555 я выбрал 8-выводной корпус SOIC. *идля* микросхемы драйвера затвора полевого транзистора, *идля* самого силового МОП-транзистора. SO8 относительно шаден и его легко паять вручную, поскольку у него открытые выводы. Также для удобства ручной пайки я выбрал резисторы и конденсаторы типоразмера 1206. Люди с более устойчивыми руками и более молодыми глазами, чем у меня, могут решить использовать более мелкие детали и, возможно, даже корпуса, предназначенные только для оплавления, для своего SMD Quasimodo. Для простоты установки конденсаторов SMD (которые не имеют маркировки!), я выбрал одно значение емкости, которое будет использоваться в каждой позиции конденсатора: 0,15 мкФ. Конденсатор синхронизации генератора имеет емкость 0,15 мкФ, конденсатор развязки управляющего напряжения 555 на выводе 5 — 0,15 мкФ, а все семь развязывающих конденсаторов питания — 0,15 мкФ. Имея только один конденсатор на всю плату, невозможно припаять крышку неправильного номинала в неправильном положении.

Я планирую загрузить схемы, спецификацию материалов и файлы производства печатных плат «Gerber» для моих проектов печатных плат V.3 (SMD) и V.4 (сквозное отверстие) на веб-сайт [www.diyaudio.com](http://www.diyaudio.com) Веб-сайт. Найдите там Квазимодо. Вы можете не согласиться с некоторыми из моих решений:

- Диод Шоттки, включенный последовательно с источником питания +V, защищает от обратной полярности. Множество керамических
- развязывающих конденсаторов VCC/GND и электролитических развязывающих конденсаторов 220 мкФ. Светодиодный индикатор
- включения питания.
- DIP-переключатель, изменяющий частоту генератора (только печатная плата со сквозными отверстиями; переключатель
- ОГРОМНЫЙ) Соединения (контакты) типа «крокодил» для источника питания и щупа осциллографа
- Детали демпфера C2, RV1 в гнездах и съемные. Разъем C3 на печатной плате со сквозными отверстиями

Не стесняйтесь опускать все, что вам не нравится. Следует отметить, что все данные осциллографа, показанные в этой заметке, были сняты на одной частоте генератора Квазимодо: 120 Гц.