

## Передатчик AM класса D на 75 метров

Майк Хэмел WO1U  
2.26.2012

То, что началось как любопытство по поводу возможности использования AM с трансформаторной связью с твердотельными усилителями, превратилось в более крупный проект. Я слышал, как некоторые говорили, что нецелесообразно выполнять модуляцию высокого уровня твердотельных усилителей с помощью трансформатора из-за низкого сопротивления модуляции. Когда я случайно осмотрел лачугу, я вспомнил, что у меня был блок питания мощностью 1000 Вт 50 В постоянного тока, основанный на тороидальном трансформаторе 60 Гц. Я решил оценить пригодность трансформатора для использования в амплитудном модуляторе. Если бы можно было реализовать практическую и разумную полосу пропускания звука, я подумал, что это будет хорошая платформа для создания высокоэффективного законного предельного AM-передатчика. Цели проектирования заключались в следующем:

- Достаточно высокая эффективность для работы ВЧ-деки и модулятора от стандартной розетки 120 В переменного тока 15 А.
- Используйте стандартный высокоэффективный аудиоусилитель в качестве источника звука для модулятора.

### Фон:

Твердотельные усилители мощности RF обычно имеют очень низкий импеданс модуляции из-за относительно низкого напряжения источника питания. Типичные ВЧ-устройства питания обычно работают при напряжении питания в диапазоне от 13,8 В до 50 В постоянного тока, за некоторыми исключениями. Импеданс модуляции рассчитывается по простому закону сопротивления,  $V_{dd} / I_{dd}$ . Для типичного линейного ВЧ-модуля мощностью 1 кВт, работающего от 50 В постоянного тока, это работает до 1,66 Ом.

Такой низкий импеданс был бы непрактичным для соответствия традиционному модулирующему трансформатору, предназначенному для ламповых передатчиков, а большинство аудиообразователей в целом просто не подходят для такого высокого тока. Кроме того, трансформаторы, изготовленные с сердечниками из ламинированной электротехнической стали, требуют тщательного проектирования для достижения полосы пропускания звукового диапазона, превышающей кГц или даже меньше.

Трансформаторы, используемые в силовых установках самолетов с частотой 400 Гц, часто наматываются на тороидальные сердечники. Ради эффективности эти сердечники обычно «наматываются», когда одна непрерывная тонкая плоская полоса из высококремнистой электротехнической стали покрывается и скручивается, как рулон ленты, и заливается заливкой, чтобы обеспечить гладкую поверхность катушки. По этой причине я решил проверить частотную характеристику мощного трансформатора с ленточной обмоткой, аналогичного тем, которые используются в аудиоаппаратуре высокого класса. Один такой трансформатор рассчитан на непрерывную работу 1000 Вт с «большим запасом по перегрузке» в своих консервативных оценках, доступный от Antek (не путать с компанией Antec, производящей компьютерные блоки питания). Различные модели от малой мощности до 1500 ВА можно приобрести [www.antekinc.com](http://www.antekinc.com).

Модель трансформатора, протестированная и использованная в передатчике, - AN-10440, доступная примерно за 100 долларов. Качество конструкции этих трансформаторов превосходное.

### Тестовое задание:

Лучше всего проверить частотную характеристику при нагрузке с приблизительным предполагаемым входным и выходным импедансом для обеспечения точных измерений. Схема тестирования показана на следующей диаграмме:

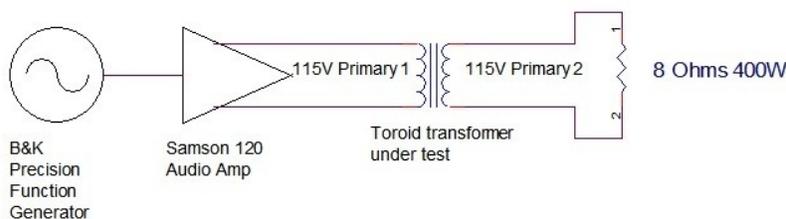
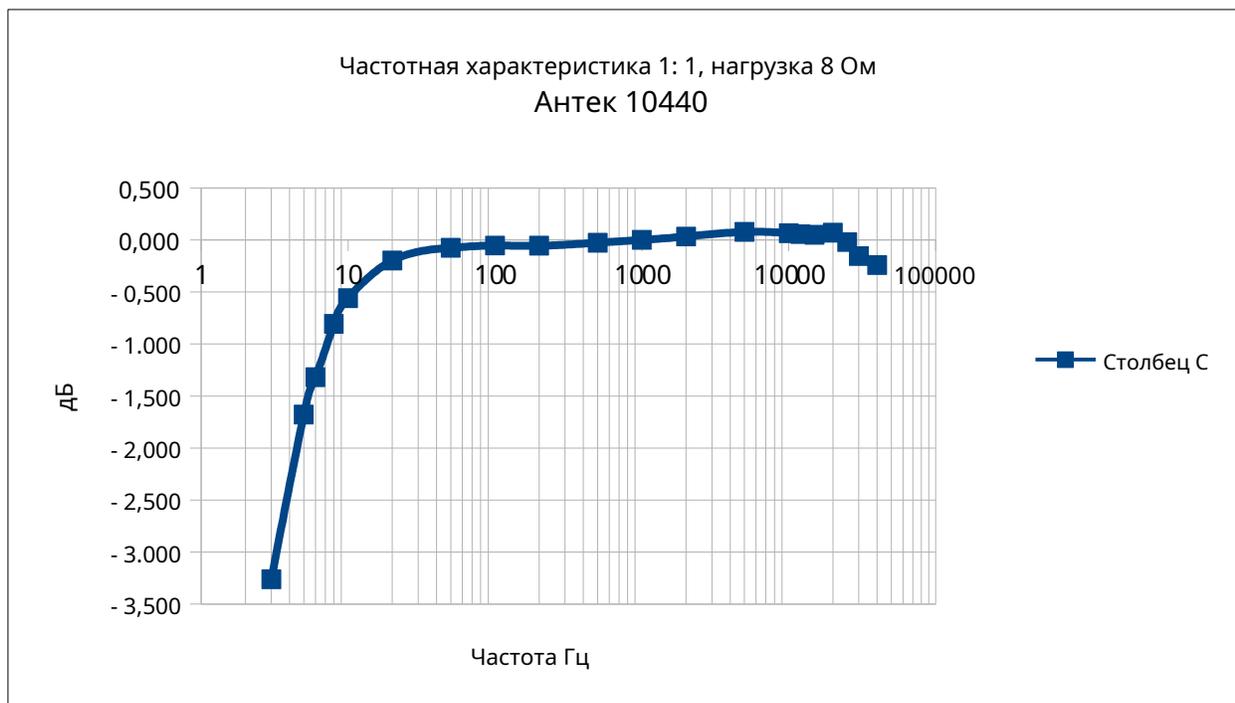


Схема установки теста

Напряжение и частота измерялись на резисторе звуковой нагрузки 8 Ом, а тестируемый трансформатор приводился в действие 120-ваттным звуковым усилителем в мостовом режиме.

#### Полученные результаты:

Результаты на удивление хороши. В приведенной ниже таблице показаны измеренные частотные характеристики. Измерения были нормализованы к среднеквадратичному значению 10 В переменного тока для нагрузки при 1000 Гц.



Этот трансформатор абсолютно плоский до более чем 20 кГц, а точка -3 дБ составляет 3,3 Гц на нижнем уровне.

#### Заявка:

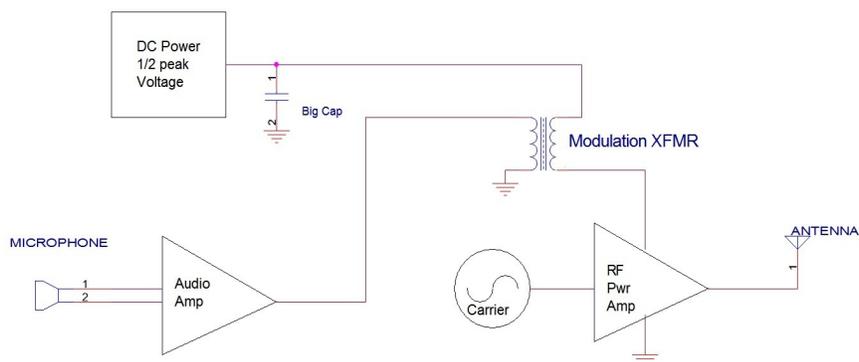
Этот тест подтверждает возможность использования готового аудиооборудования высокой мощности с низким выходным сопротивлением в качестве источника звука для модуляции. Имейте в виду, что средняя необходимая мощность звука по-прежнему составляет 50% от средней выходной мощности несущей передатчика, поэтому для 100% модуляции передатчика мощностью 1,5 кВт требуется чудовищный усилитель звука.

Хотя можно использовать любой аудиоусилитель с необходимой выходной мощностью, для любой разумной эффективности аудиоусилитель должен быть типа класса D, так как они почти на 90% эффективны от вилки переменного тока до подаваемой звуковой мощности.

Об усилителях RF класса E написано много, и в настоящее время в эфире довольно большой контингент активных пользователей. Для этой конструкции рассматривался класс E, но в конечном итоге для колоды RF был выбран класс D. Таким образом, детали класса E выходят за рамки данной статьи. Простой поиск в Google предоставит много информации по этому вопросу.

Идеальным ВЧ-каскадом для использования был бы класс D или E по эффективности, а также потому, что он может работать при гораздо более высоких напряжениях, чем допускают типичные специальные ВЧ-транзисторы. Например, РЧ-усилитель класса E мощностью 1 кВт для низких частот, работающий при 160 В постоянного тока (прямая выпрямленная линия 120 В переменного тока), может быть построен с дешевыми и легкодоступными силовыми полевыми транзисторами. Однако для класса E максимальное  $V_{dd}$  полевого транзистора должно быть рассчитано на 4-кратное напряжение питания для надежности, поэтому при рассмотрении работы усилителя класса E выше 150 В существует очень мало вариантов устройств с достаточным номинальным напряжением. Многие производители в конечном итоге используют более низкое напряжение питания и объединяют в пары много полевых транзисторов для обработки необходимого тока. Однако в конфигурации «H-Bridge» класса D значение  $V_{dd\_max}$  устройства может достигать максимального значения  $V_{dd}$ , на которое рассчитаны устройства, без каких-либо последствий. В идеале вы должны использовать устройства, рассчитанные на 1,5-кратное пиковое напряжение питания при модуляции или более для обеспечения запаса прочности и надлежащей инженерной практики. Обратной стороной класса D является то, что это ненастроенный усилитель и требует агрессивного выходного фильтра низких частот из-за богатой

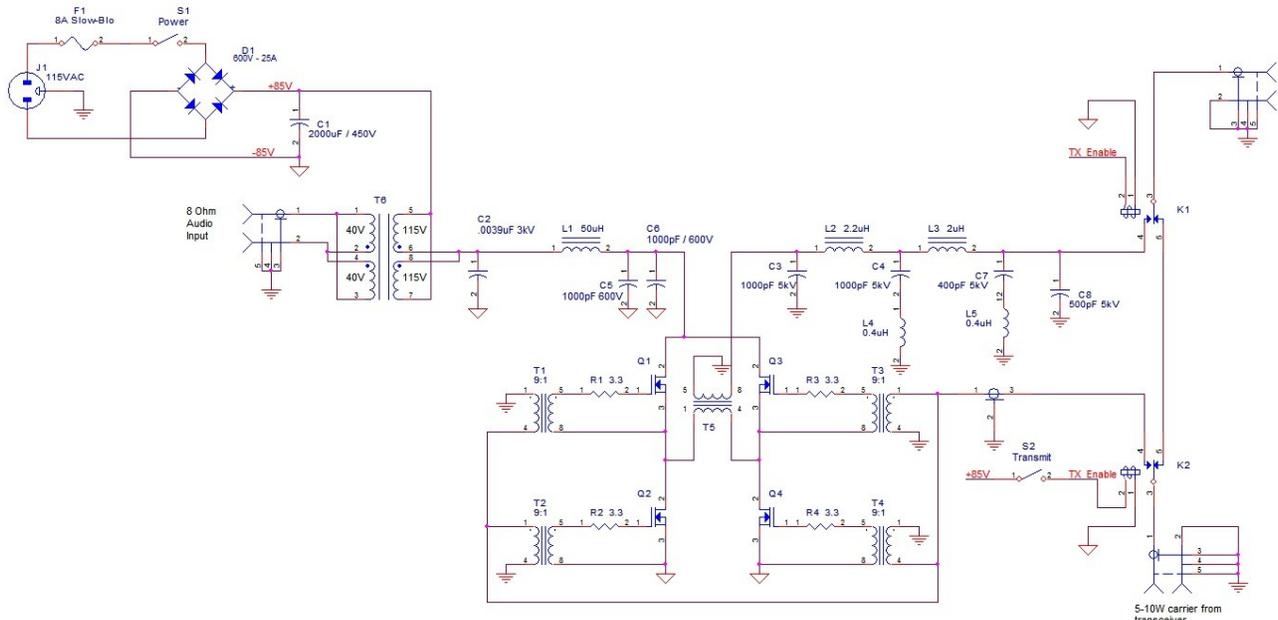
гармоническое содержание. Плюс к классу D заключается в том, что из него можно получить две или три полосы без тщательной настройки, необходимой для ступеней класса E для поддержания оптимального уровня эффективности. Типичная топологическая схема AM-передатчика с использованием внешнего аудиоусилителя с трансформаторной связью показана ниже.



Давайте посмотрим на некоторые цифры для РЧ-каскада класса D, работающего при 320 В постоянного тока (пик при модуляции), предполагая выходную мощность PEP 1,5 кВт и эффективность 83%. Вторичная обмотка трансформатора модуляции должна выдерживать пик только 5,64 А. Таким образом, сопротивление модуляции составляет 56 Ом. Коэффициент импеданса трансформатора - это квадрат отношения витков. Отношение напряжений равнод к коэффициенту оборотов. Чтобы правильно загрузить аудиоусилитель на 8 Ом, необходимо соотношение импеданса 7: 1 или соотношение витков

$\sqrt{7}$  или 2,64: 1. Поскольку наш трансформатор имеет обмотки 115 В переменного тока, соотношение 2,64: 1 будет означать  $115 / 2,64 = 43,28$ , поэтому обмотка на 40 В будет довольно близкой. Он будет работать в повышенном режиме, и аудиоусилитель будет питать обмотку 40 В, а обмотка 115 В будет нести постоянный ток для РЧ-каскада и обеспечивать необходимые 56 Ом. Для этого ВЧ усилителя класса D потребуется подача сигнала без модуляции 160 В постоянного тока при 2,82 А. Это предполагает, что выходная мощность несущей составит 374,4 Вт при КПД 83%.

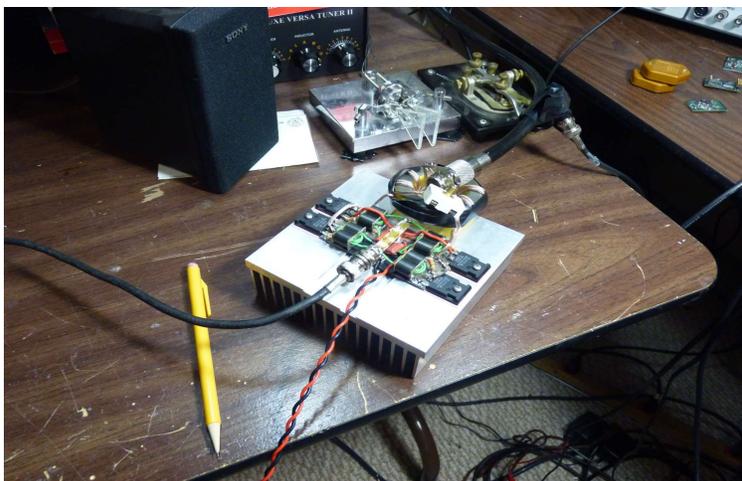
Кажется очевидным, что каскад класса D, работающий при модулированном пике 320 В постоянного тока и мертвой несущей 160 В постоянного тока, будет правильным выбором. Схема усилителя класса D показана на следующей странице.



### Конструкция усилителя:

В этом усилителе четыре устройства используются по цене 4,12 долл. США за шт. Они рассчитаны на максимальное напряжение 500 В и 16 А и используют корпус TO247. Емкость затвора у них составляет около 2600 пФ. Хотя «логический уровень» может быть реализован с использованием микросхем драйвера затвора, оптических изоляторов и изолированных источников питания для драйверов затвора с высокой стороны, был сделан вывод, что широкополосные трансформаторы с ферритовой нагрузкой 9: 1 значительно упростят конструкцию, устраняя необходимость в изолированном высоком уровне. боковые блоки питания. Другое преимущество понижающих задающих трансформаторов состоит в том, что они делают усилитель менее чувствительным к повреждению из-за непреднамеренной перегрузки. Затворы на этих полевых транзисторах выдерживают напряжение +/- 40 В без повреждений, но для полного насыщения требуется только 10 В. Несмотря на то, что входной КСВ очень высокий с трансформаторами затвора 9: 1, при мощности всего в несколько ватт от трансивера мощностью 100 Вт такой высокий КСВ не имеет никакого значения для трансивера. Трансформаторы широкополосных драйверов можно легко приобрести у поставщиков, которые поставляют детали для твердотельных ВЧ-усилителей. Я использовал типы RF400-77-9 от Communications Concepts Inc.д. Они меньше 5 долларов каждый. Выходной трансформатор намотан на тороид из порошкового железа T225-6 смеси №6.

Из приведенного выше расчета импеданса модуляции мы получаем сопротивление модуляции 56 Ом. Для H-моста это также выходной импеданс, поэтому подходит выходной трансформатор 1: 1. У меня был шнур с застежкой-молнией для динамика 14AWG, и я намотал 12 витков на сердечник диаметром 2,25 дюйма. С 1000 пФ на выходной стороне трансформатора, чтобы уменьшить индуктивность рассеяния, я провел несколько измерений эффективности при 160 В постоянного тока от прямого выпрямленного линейного напряжения переменного тока. Это стало возможным без какого-либо изолирующего трансформатора, поскольку и вход, и выход усилителя изолированы ВЧ трансформаторами. Без фильтра нижних частот эффективность стока более 90% была достигнута на частоте 3,88 МГц и эффективность стока 95% на частоте 1,88 МГц. Для доведения устройств до насыщения требовалось примерно 5 Вт мощности, а выходная мощность составляла 375 Вт на несущей на 75 м и 400 Вт на 160 м.



RF палуба

Интегрировать трансформатор модуляции и установить все в старый корпус аудиоусилителя было не так уж сложно. Изображение почти готового передатчика показано ниже.



Передатчик в сборе

#### Фильтр низких частот:

Одной из сложных задач в этом была моя попытка реализовать работу на двух диапазонах, 160 и 75 м. Я смоделировал и протестировал несколько конструкций фильтров нижних частот, пытаясь включить ловушку на частоте 5,64 МГц, служа двойной цели подавления 3<sup>ей</sup> гармоника 160 м и обеспечивающая резкое срезание выше 4 МГц для работы на 75 м. Хотя мне удалось разработать фильтр, отвечающий этим требованиям, мне не удалось найти достаточное количество избыточных конденсаторов передающего класса. Я попытался соединить параллельно несколько конденсаторов из полиэфирной пленки 1 кВ меньшего номинала, «рассчитанных на импульс», и они работали хорошо, пока не применялась модуляция. В конце концов, после 6 доработок и множества взорванных крышек, я решил, что на данный момент достаточно 75 метров. Я смог найти конфигурацию, основанную на доступных значениях формованных слюдяных передающих колпачков, которые у меня были под рукой, чтобы реализовать эффективную работу на 75 м без риска перегрузки по току в колпачках. На самом деле фильтр нижних частот был сложнее, чем остальной усилитель. Все шпоры и гармоники теперь лучше, чем -50 дБн на 75 м, однако 3<sup>ей</sup> гармоника 160 м с этим фильтром составляет -40 дБн, что недопустимо. Требование: все шпоры и гармоники должны быть > -43 дБн. Таким образом, он не будет работать на 160 м до тех пор, пока не будут установлены и повторно протестированы правильные детали.

Переключатель T / R состоит из двух реле Omron на 16 А с катушками 120 В переменного тока. Я использую необработанный источник питания 160 В постоянного тока, и они работают нормально, катушки не рассеивают избыточное напряжение.

## Усилитель звука:

Изначально я купил аудиоусилитель Behringer EPQ1200 для использования в качестве модулятора с этой установкой. Когда он прибыл, я провел несколько первоначальных стендовых испытаний и обнаружил некоторые проблемы. Этот усилитель относится к типу класса Н с импульсным источником питания. Эта конструкция является лучшим из обоих миров в том, что она работает с классом АВ, за исключением того, что при приближении к насыщению источник питания увеличивается по мере необходимости, чтобы избежать клиппирования и искажений. Я измерил выходную мощность при 685 Вт RMS при 8 Ом, что было достаточно для работы, однако во время стендовых испытаний я понял, что охлаждающий вентилятор не работает. После проведения дополнительных испытаний на средней мощности CW, вызывающих срабатывание схемы тепловой защиты, вентилятор так и не сработал, и после нескольких разговоров с менеджером национального сервиса Behringer мы определили, что он неисправен, и его вернули.

Но здесь главное внимание уделялось эффективности, а также высококачественному звуку. Поэтому я купил усилитель Crown XLS1000 класса D. Несмотря на то, что он имеет немного меньшую производительность, его все же более чем достаточно для задачи. Crown оказался чрезвычайно прочным, за что я был очень благодарен при окончательном тестировании всей системы.

### Системное тестирование:

Есть несколько характеристик этой топологии, которые я не предусмотрел при разработке. Первый - это очень большой скачок мощности, появляющийся на входе модуляции, который возникает при отключении несущей. Падение тока в первичной обмотке трансформатора модуляции эффективно снижается и подается на входную обмотку аудиоусилителя. Этот выброс имеет уровень энергии в килоджоулях из-за очень низкого сопротивления постоянному току обмоток модулирующего трансформатора. Обеспокоенный моим новым аудиоусилителем, я обнаружил, что мне пришлось откатывать несущий привод с моего трансивера Kenwood TS930 с помощью регулятора несущей, а не просто выключать переключатель передачи. Хотя это устраняет всплеск, но снижает удобство эксплуатации.

Вторая непредвиденная характеристика - это характеристики насыщения модулирующего трансформатора. Это ядро начинает насыщаться, как только я достиг 100% модуляции, потому что он пытается перевести внутренние диоды в полевых транзисторах РЧ-деки в проводимость, поскольку Vdd пытается стать отрицательным. Это вызывает быстрое падение импеданса нагрузки, подаваемого на аудиоусилитель, и регулярно отключает схему защиты. Благодарим компанию Crown за разработку усилителя, способного выдержать сброс полной мощности нагрузки с 8 Ом до 0,05 Ом (сопротивление постоянному току обмоток 40 В) за один цикл! Поначалу эта проблема показалась остановкой. Я был обеспокоен тем, что в этой конструкции никогда не будет 100% модуляции. Тогда у меня возникла идея поставить нагрузку 4 Ом 200 Вт между усилителем и передатчиком, так что при 100% -ной модуляции звуковой каскад будет видеть скачок с нагрузки 12 Ом до 4 Ом вместо полного короткого замыкания. Хотя при этом расходуется часть звуковой мощности в нагрузке, это оказалось эффективным решением. Это также решает проблему пиков, ограничивая энергию пиков, подаваемую на выход аудиоусилителя, когда несущая привода отключается при переходе от передачи к приему.

Тестирование в прямом эфире дало очень положительные отзывы о качестве звука. Конечно, важно контролировать ширину звуковой полосы входящего сигнала, поскольку этот передатчик может легко воспроизводить сигнал шириной 30 кГц. Кроме того, многое было сделано для устранения электромагнитных помех в моей стереосистеме наверху после того, как я получил хорошие чистые аудиочеты от моей жены Деб, когда она наверху пыталась смотреть телевизор.

Следующим этапом разработки будет реализация некоторой формы линеаризации с помощью EER или смещения фазы или некоторой комбинации существующих методов, за исключением упора на сохранение простоты и низкой стоимости.

## Благодарности

Я должен снять шляпу перед Брюсом Франклином, K7DYU для вдохновения в этом проекте. В то время как я сделал несколько вещей, отличных от его проектов, чтобы приспособиться к цели использования готового аудиооборудования, Брюс проделал превосходную работу над своим дизайном и конструкцией своих AM-передатчиков. Я слышал многие из них в эфире, и они работают очень хорошо и имеют огромную ценность. Его использование концепции изоляции ВЧ и отсутствия необходимости в изолированном силовом трансформаторе послужило источником вдохновения для создания этого передатчика.

Я также хотел бы поблагодарить Horace N1HC за пожертвование колпачков для передачи, Mike N1FBZ, Dan N1FYL, Bob W1FP, Doug KB1PJM, Brian WB2JIX, Joe KZ1J, Bob W1ICW, Ben K1AUE, Les W1UT и Joe WB8DNO, без чьих вкладов, поощрение ( и толерантность) от всего, я бы не закончил этот этап проекта.

[1] Технические данные IXFH16N50P: <http://ixdev.lays.com/DataSheet/99357.pdf>

[2] Драйверные трансформаторы RF400: <http://www.communication-concepts.com/prod02.htm>

[3] «75-метровый передатчик класса E быстрой сборки» W01U, ноябрь 2010 г. <http://hrlselectronics.com/amtX/amtX.html>

[4] <http://www.k7dy.com/>