

# Простой лабораторный инвертор для индукционного нагрева

С.В.Кухтецкий

Институт химии и химической технологии, СО РАН, г. Красноярск

ku\_@mail.ru

Введение.....	1
Принцип работы полумостового инвертора .....	2
Предупреждение об опасности.....	4
Описание макета лабораторного инвертора .....	4
Выпрямитель .....	4
Модуль управления.....	6
Силовой модуль.....	10
Первое включение инвертора .....	11
Индукционный нагрев .....	13
Нагрузка .....	14
Дополнительная диагностика.....	15
Проверка работоспособности установки индукционного нагрева.....	15
Левитационная плавка .....	17
Заключение и выводы .....	17
Литература.....	18
Благодарности.....	18
Приложение .....	19

*В статье подробно описана схема, конструкция и приведены советы по изготовлению лабораторного инвертора, предназначенного для индукционного нагрева и плавки. Инвертор может быть легко интегрирован в существующее оборудование лабораторных установок (трубчатые печи, прогреваемые трубопроводы, нагрев электропроводных тиглей и т.п.). Он может также использоваться автономно для закалки и плавки (в том числе - во взвешенном состоянии) небольших образцов металлов и сплавов (несколько грамм). Мощность инвертора регулируется от 0 до 2 кВт, диапазон рабочих частот – от 60 кГц до 300 кГц, питание – от сети 220В.*

## Введение

Инверторами называют устройства, обратные выпрямителям, т.е. - преобразователи постоянного напряжения в переменное. Обычно термин «инвертор» используется более узко: генератор переменного напряжения, используемый в качестве источника питания. Выходное напряжение инвертора может быть как промышленной частоты (50 Гц), так и повышенной (десятки, сотни кГц и выше). Одно из важнейших преимуществ источников питания повышенной частоты это резкое уменьшение массогабаритных параметров трансформаторов. Другой положительный момент связан с тем, что переключающие силовые элементы инверторов работают в ключевом режиме, т.е. основная часть потерь энергии происходит лишь в моменты переключения. Таким образом, современные быстродействующие полупроводниковые ключи позволяют существенно увеличить КПД преобразователей, приближая его для некоторых конструкций к 100%.

Быстрое развитие и удешевление элементной базы силовой электроники привело к тому, что некоторые классы инверторов прочно заняли свои ниши уже даже в быту. Это мощные импульсные блоки питания современных персональных компьютеров, электронные балласты для люминесцентных ламп, сварочные инверторы и бытовые индукционные электроплитки. Доступность и умеренная цена транзисторных инверторов также могли бы способствовать более широкому их внедрению и в практику физико-химического эксперимента. Вот далеко не полный список возможных приложений инверторов в экспериментальной лаборатории.

1. Источники питания для печей с низкоомными трубчатыми нагревателями.
2. Источники питания дуговых разрядов (плазмохимические реакторы с дуговым разрядом, электродуговая плавка).
3. Источники питания высоковольтных неравновесных разрядов (импульсные разряды, высокочастотные коронные и дуговые разряды, барьерные разряды (озонаторы)).
4. Индукционный нагрев (индукционные печи, закалка, плавка).

К сожалению, приобрести за разумную цену универсальный инвертор мощностью несколько киловатт с регулируемой частотой преобразования до двух-трех сотен килогерц – задача практически неразрешимая. Таких просто нет в продаже по вполне понятным причинам. Во-первых, очень непростая разработка такого универсального инвертора, пригодного к серийному производству. Во-вторых, у таких унифицированных

инверторов нет непосредственного применения в быту. Поэтому производителям бытовой техники проще и дешевле использовать специализированные решения для каждого класса задач (сварка, электропитание, балласты и т.д.).

С другой стороны, для исследовательской лаборатории универсальность и гибкость оборудования – обычно один из самых важнейших критериев, часто перевешивающий остальные. Это несколько смещает акценты в сторону универсальных решений. Конечно, в ряде случаев можно попытаться приспособить некоторые бытовые решения для исследовательских задач. Например, можно приобрести и модифицировать готовый сварочный инвертор для питания низковольтной дуги. Это может оказаться дешевле, чем изготавливать инвертор в непрофильной лаборатории. Или можно переоборудовать компьютерный блок питания для получения среднечастотного инвертора на пару сотен ватт. Но грамотное выполнение таких задач потребует от экспериментатора квалификации не меньше, чем изготовление собственного инвертора, а гибкость и универсальность полученного решения будет весьма невелика.

Приведем еще несколько соображений, почему изготовление самодельного лабораторного инвертора может оказаться неплохим решением.

1. Во-первых, «нагрузка» на лабораторный инвертор обычно существенно меньше, чем на бытовые или промышленные образцы. Поэтому лабораторный инвертор может представлять собой скорее макет (прототип), чем промышленный образец, готовый к серийному производству.
2. Во-вторых, в условиях обычной исследовательской экспериментальной лаборатории нет таких жестких требований к надежности и экономичности устройства, как в промышленности или в быту. Это существенно «облегчает обвязку», связанную с автоматическим контролем функционирования устройства, защитой от внештатных ситуаций и перегрузок. Этот фактор становится еще более весомым, если учесть, что работа с этим оборудованием будет вестись достаточно квалифицированным персоналом.
3. В-третьих, поскольку речь не идет о серийном выпуске отработанного прототипа, то силовые комплектующие можно взять с большим избыточным «запасом прочности». Одновременно можно упростить и схемотехнические решения, повышающие надежность устройства.
4. Ну и, наконец, универсальный лабораторный инвертор может (как «конструктор») представлять собой набор отдельных модулей, часть из которых может быть выполнена в виде макетов с навесным монтажом, упрощающих их модификацию, анализ и ремонт. Модернизация и развитие этих модулей («обвязка» защитными и диагностическими цепями, автоматизация защиты и контроля) в условиях ограниченного бюджета может проводиться постепенно, лишь по мере необходимости.

С учетом этих соображений в лаборатории плазмохимии ИХХТ СО РАН был разработан и изготовлен прототип лабораторного инвертора, описанию которого посвящена данная статья. Инвертор может работать в диапазоне частот 60-300 кГц, мощность (для полумоста) – до 2 кВт. Все модули и основные технические детали рассмотрены с детализацией, достаточной для воспроизводства устройства любым квалифицированным экспериментатором, не имеющим специальной подготовки в области силовой электроники. В конце статьи приводятся примеры практического использования макета для нагрева и плавки.

## Принцип работы полумостового инвертора

Различные варианты инверторов подробно описаны литературе [1, 2]. В данной статье речь пойдет о так называемом двухтактном «полумостовом» инверторе. Блок-схема полумостового инвертора представлена на рис.1.

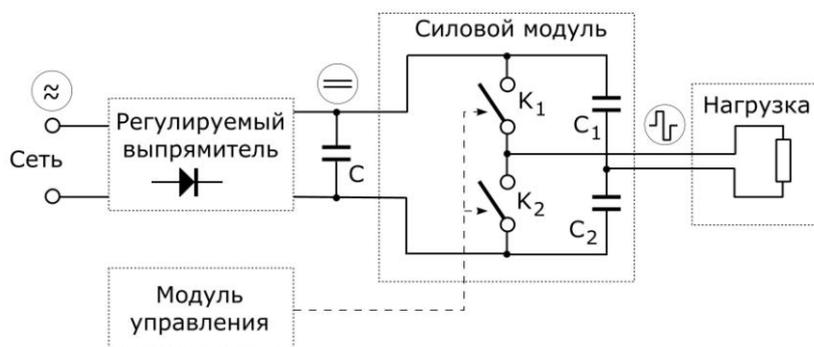


Рис.1. Блок-схема полумостового инвертора

Принцип его работы очень прост. Сетевое напряжение выпрямляется и подается на конденсатор C, к которому подключен силовой модуль. Силовой модуль содержит два полупроводниковых ключа ( $K_1$  и  $K_2$ ) и  
© Кухтецкий С.В., 2010

конденсаторный делитель ( $C_1$  и  $C_2$ ). Нагрузка подключается к общим точкам ключей и конденсаторов делителя. При помощи модуля управления ключи  $K_1$  и  $K_2$  включаются/выключаются попеременно с заданной частотой, подключая связанный с ними конец нагрузки то к верхней (по схеме), то к нижней шине питания. В результате на нагрузке получается переменное напряжение с амплитудой, равной половине напряжения питания.

Работа такого идеального инвертора, состоящего из идеальных ключей, действительно выглядит довольно просто. Проблемы начинаются тогда, когда мы приступаем к изготовлению реального инвертора из реальных компонентов. Эти проблемы приводят не только к усложнению схемотехнических решений, но и формируют вполне определенные требования к типу используемых компонентов, качеству монтажа, правилам компоновки, запуску и отладки. Без учета большинства этих требований сделать работоспособный инвертор не удастся. Дорогие силовые транзисторы будут сгорать либо сразу при включении питания, либо в первые секунды работы.

Рассмотрим вкратце некоторые из этих требований. Более подробно они будут обсуждаться при описании конкретных модулей.

Первое требование - к модулю управления. Оно заключается в том, что работа ключей  $K_1$  и  $K_2$  должна быть согласованной, т.е. они должны открываться/закрываться попеременно и никогда не должны быть полностью открыты одновременно. Это необходимо для устранения так называемых «сквозных токов», текущих через оба открытых ключа, минуя нагрузку. Обычно это приводит к разрушению ключей. Кроме этого, поскольку реальные ключи имеют конечное (ненулевое) время открытия/закрытия, то открывающие сигналы модуля управления должны подаваться с некоторой задержкой после сигнала закрытия другого ключа. Эти задержки называются «мертвым временем» (dead-time) и должны быть предусмотрены в любом варианте модуля управления.

Другая проблема связана с тем, что все реальные элементы и соединения имеют конечную индуктивность. Поэтому даже при работе на чисто активную нагрузку при закрытии ключей возникают «выбросы» напряжения. Естественно, эти эффекты существенно возрастают при работе на индуктивную нагрузку, которая и нужна для данной задачи. Для решения этой проблемы обычно используют так называемые «возвратные диоды», включенные параллельно ключам. Кроме этого, необходимо выбирать ключи с некоторым запасом по рабочему напряжению (как минимум, вольт на 200).

Еще одна группа проблем связана с паразитными индуктивностями монтажа. Дело в том, что при очень быстром коммутировании больших токов заметные «наводки» появляются даже на очень небольших индуктивностях. С первого взгляда – просто «на пустом месте». Для того, чтобы «почувствовать» эти эффекты, сделаем простую оценку. Пусть мы коммутируем ток  $\Delta I \sim 10\text{A}$  за время  $\Delta t \sim 10\text{нс}$  ( $10^{-8}$  с). Напряжение  $U$ , возникающее на индуктивности  $L$ , можно оценить как  $U \sim L \Delta I / \Delta t$ . Индуктивность одного дюйма (2.54 см (!)) провода диаметром 1 мм порядка 10 нГн ( $10^{-8}$  Гн). В результате получаем наводку на этом дюйме провода  $U \sim 10^{-8} * 10 / 10^{-8} = 10\text{ В}$  (!). Это напряжение сравнимо с напряжением питания микросхем драйверов для управления ключами! Такая наводка вполне может открыть ключ в самый неподходящий момент (например, когда уже открыт второй ключ) со всеми вытекающими печальными последствиями. Поэтому правильная компоновка и монтаж играют особую роль в быстродействующей силовой электронике.

Единого рецепта здесь нет, но нужно придерживаться нескольких простых правил, уменьшающих паразитные индуктивности (либо эффекты от их наличия). Суть этих правил в следующем.

1. Силовые проводники, по которым текут коммутируемые токи, нужно делать как можно короче, прямее и толще. Стараться избегать петель таких проводников.
2. По-возможности, необходимо разделять силовые и управляющие цепи, а сами силовые элементы располагать как можно ближе друг к другу.
3. При разводке земляных цепей придерживаться правила «одной точки». Всегда нужно помнить о том, что на любом проводнике, по которому течет большой ток, есть разность потенциалов, которая сопоставима с уровнем управляющих сигналов. Поэтому не стоит, например, заземлять различные элементы управляющих цепей в разных точках земляной шины, по которой течет большой импульсный ток. Это чревато непредсказуемой работой управляющего модуля.

На самом деле все не так уж страшно. Более того, многие разработчики указывают правила монтажа для критических узлов в документации к ним. Главное – не делать грубых ошибок. Тогда можно изготовить, пусть не идеальный, но вполне работающий прибор.

## Предупреждение об опасности

**Цепи выпрямителя и силового модуля находятся под высоким напряжением без гальванической развязки от питающей сети. Поэтому при работе с инвертором нужно соблюдать предельную осторожность. ВСЕ МАНИПУЛЯЦИИ с этими модулями можно проводить ТОЛЬКО ПОСЛЕ ВЫКЛЮЧЕНИЯ ПИТАНИЯ И ПОЛНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ПРИБОРА ОТ СЕТИ!**

## Описание макета лабораторного инвертора

Перейдем теперь к описанию отдельных узлов лабораторного инвертора. Начнем с выпрямителя.

### Выпрямитель

В данной реализации инвертора это самый простой, но и самый громоздкий узел. Он содержит большой и тяжелый ЛАТР (лабораторный автотрансформатор) для регулирования выходного напряжения выпрямителя и один громоздкий низкочастотный развязывающий трансформатор. Выбор такого решения обусловлен следующими причинами.

1. На стадии первоначального знакомства с силовой электроникой и отладки желательно иметь возможность плавно регулировать постоянное напряжение, подаваемое на ключи. Самый простой способ, доступный практически в любой экспериментальной лаборатории – это ЛАТР.
2. Если взять за правило начинать и заканчивать работу инвертора при «нулевом» положении ЛАТРа, то можно избежать необходимости создания специальных цепей для первоначальной зарядки больших электролитических конденсаторов фильтра.
3. ЛАТР обладает большой индуктивностью, поэтому на первых порах можно убрать высокочастотные фильтры по цепи питания.
4. На стадии знакомства с силовой электроникой возникает много вопросов, ответы на которые проще найти экспериментально, путем осциллографирования сигналов в различных точках схемы. Поскольку силовые узлы инвертора не имеют гальванической развязки с питающей сетью, то на первых порах ее лучше сделать. Хотя бы для процесса отладки, при работе на малых мощностях. Самый эффективный способ – запитать весь инвертор через развязывающий трансформатор подходящей мощности. Естественно, коэффициент трансформации его должен быть близок к единице. Такая развязка желательна также и для дополнительной безопасности самого экспериментатора при отладке инвертора.

С учетом этих соображений первый вариант регулируемого выпрямителя для лабораторного инвертора получается простым. Его схема представлена на рис.2. Выпрямитель не содержит каких-нибудь дефицитных деталей и узлов, надежен и весьма удобен в работе.

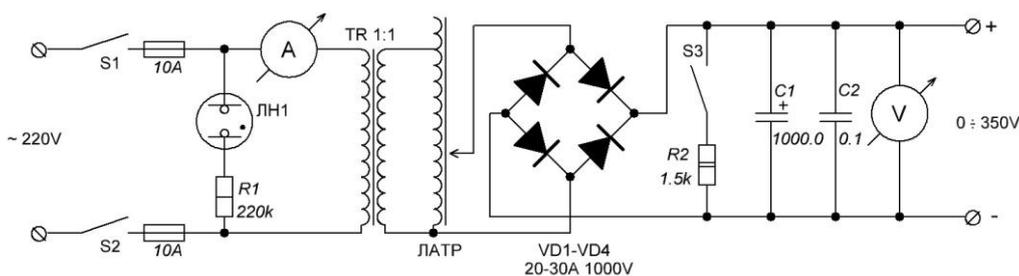


Рис.2. Схема выпрямителя

Рассмотрим некоторые детали реализации выпрямителя. В качестве выключателя и предохранителей можно взять обычный бытовой сдвоенный автомат на 10-16 ампер. Подходящий 8-амперный ЛАТР можно найти в любой экспериментальной лаборатории «со стажем». При отсутствии ЛАТРа на стадии отладки (при работе на малых мощностях – 200-300 Вт) можно использовать электронный аналог ЛАТРа на биполярных транзисторах (см., например, [3]). При больших мощностях придется делать импульсный регулятор, естественно, со всеми вытекающими последствиями. Поэтому на начальных стадиях лучше все-таки приобрести ЛАТР, хотя стоят они сейчас недешево. Как, впрочем, и другие низкочастотные трансформаторы. Это, кстати, еще один аргумент в пользу перевода лабораторного хозяйства на импульсные преобразователи.

Развязывающий трансформатор TR можно заказать отдельно или же сделать из старого ЛАТРа подходящей мощности. В последнем случае, если использовать уже существующую обмотку ЛАТРа в качестве первичной, нужно обратить особое внимание на межвитковую изоляцию. Желательно хорошенько очистить обмотку от

угольной пыли и залить лаком дорожку, где изоляция обмотки снята. В качестве развязывающего трансформатора можно также взять пару силовых (или небольших сварочных) трансформаторов, подходящей мощности и включить их встречно. Например, у трансформаторов 220 на 36 вольт соединить 36-вольтовые обмотки, и использовать 220-вольтовые обмотки как обмотки развязывающего трансформатора. После отладки инвертора развязывающий трансформатор желательно убрать (особенно, если он маломощный).

Диодный мост VD1 лучше выбрать с запасом, ампер на 20-30 и рабочим напряжением 1000 В. Например, КВРС3510, КВU25М и т.п.. Их лучше установить на небольшую металлическую пластину в качестве радиатора, хотя при мощности инвертора 1-2 кВт они практически не греются.

Кнопка S3 и резистор R2 предназначены для разряда конденсатора C1 в случае аварии. Например, при выгорании силовых ключей, на этом конденсаторе может остаться высокое напряжение опасное для жизни. В начале работы с силовой электроникой вероятности аварий достаточно велики, поэтому желательно предусмотреть такой разрядник.

Сам конденсатор C1 – электролитический, с рабочим напряжением не менее 400 В. Он может быть составным. В случае последовательного соединения конденсаторов обязательно нужно поставить выравнивающие резисторы на 150-200 кОм, подключенные параллельно каждому конденсатору. Конденсатор C2 – пленочный, с рабочим напряжением не менее 400 В.

И, наконец, 10-амперный измеритель переменного тока на входе инвертора и вольтметр постоянного напряжения на выходе выпрямителя предназначены для контроля полного тока, потребляемого инвертором из сети, и напряжения, подаваемого на полумост силового модуля. Этот контроль особенно актуален при ручной регулировке мощности инвертора. В качестве вольтметра очень удобно использовать недорогой китайский цифровой мультиметр. К сожалению, такие мультиметры не рассчитаны на длительное измерение больших токов (например, 10-амперный режим – не дольше 10 сек с перерывами 15 мин), поэтому в качестве амперметра проще использовать обычный стрелочный амперметр переменного тока.

Никаких особых требований к компоновке выпрямителя нет. Поскольку по цепям выпрямителя текут довольно большие токи (до 10 А в данном инверторе), то монтаж необходимо выполнять короткими и толстыми проводами сечением не менее 1.5 – 2 мм<sup>2</sup>. Общий вид одного из вариантов выпрямителя представлен на рис.3 (без развязывающего трансформатора).

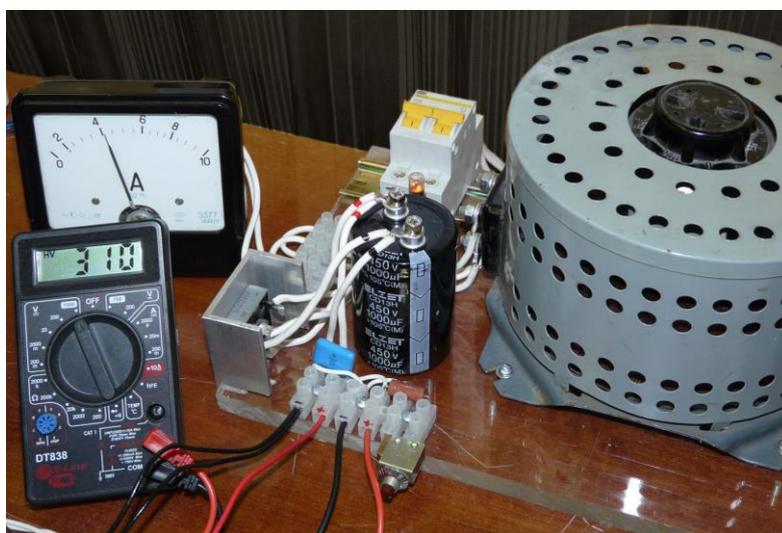


Рис.3. Общий вид выпрямителя

Конечно же, в перспективе желательно заменить такой регулятор с громоздким ЛАТРОм на подходящий импульсный регулятор. Во-первых, он гораздо компактнее и, во-вторых, он мог бы обеспечить некоторый запас по мощности (до 6-10 кВт). Однако в данном проекте главная цель – получить реально работающий инвертор для физико-химических экспериментов максимально простым способом. Поэтому остановимся на этом варианте, а импульсный регулятор оставим на будущее.

Перейдем теперь к модулю управления.

## Модуль управления

Естественно, схемотехника модуля управления определяется тем, какими ключами он будет управлять. В данном инверторе в качестве ключей используются мощные полевые транзисторы с изолированным затвором, известные под аббревиатурой MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) или по-русски - полевые МОП-транзисторы (Метал-Оксид-Полупроводник). Популярно о таких транзисторах можно почитать, например, в [1]. Однако, для данного раздела достаточно просто представлять MOSFET как некий электронный выключатель, который управляется напряжением на затворе (относительно истока). В открытом состоянии сопротивление между истоком и стоком мало (в зависимости от типа транзистора - от нескольких Ом до сотых долей Ома), а в закрытом – велико (десятки МОм и выше). Для большинства транзисторов напряжение на затворе может изменяться в пределах от -20 до +20 Вольт. Если напряжение на затворе выше порогового (порог обычно от +2 до +4 В) транзистор открывается, если ниже – закрывается.

Таким образом, для управления ключами мы должны подавать на затворы транзистора положительные импульсы с напряжением 12-18 В. Это должны быть две последовательности импульсов, передаваемые по двум отдельным управляющим шинам, сдвинутые по времени относительно друг друга (рис.4). Как уже отмечалось выше, для устранения сквозных токов должны быть предусмотрены паузы (dead-time).

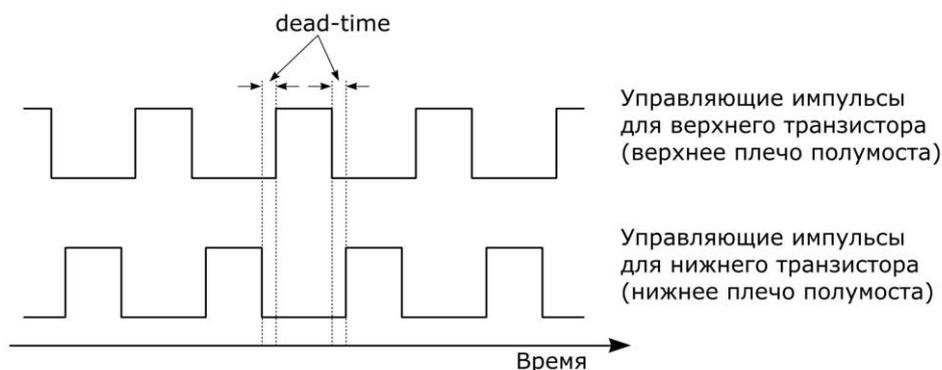


Рис.4. Диаграммы управляющих импульсов

Существует множество вариантов таких генераторов управляющих импульсов. В данном проекте применено одно из простейших решений на основе распространенной и недорогой микросхемы IR2153. Эта микросхема представляет собой законченный автоколебательный драйвер полумоста для электронных балластов люминесцентных ламп. Драйвер имеет фиксированную длительность dead-time (1.2 мкс). Максимальное время нарастания и спада импульсов 150 и 100 нс, соответственно. Поэтому максимальная частота управляющих импульсов ограничена значением 300-350 кГц.

К сожалению, мощность выходных каскадов этого драйвера ( $I_{o+} = 200 \text{ mA}/400 \text{ mA}$ ) не позволяет его использовать непосредственно в качестве драйвера затворов полевых транзисторов нашего инвертора. Причина в том, что затворы мощных MOSFET-ов имеют довольно большую емкость (доходящую до нескольких тысяч пикофард), т.е. драйверы вынуждены работать на большую емкостную нагрузку. Поэтому драйверы должны выдавать большие токи. Иначе время переключения (и, следовательно, тепловые потери) транзисторов будут велики. Оценим эти токи.

В данном проекте в качестве ключей используются транзисторы IXFH30N50. Производитель декларирует суммарную емкость затвор-исток и затвор-сток  $C_{iss} = 5200-5700 \text{ пФ}$ . Однако, в действительности реальная (эффективная) емкость затвора гораздо больше. Здесь для оценки нужно брать полный заряд, который необходимо передать затвору для того, чтобы транзистор полностью открылся. Обычно эта величина тоже приводится в datasheet. Для IXFH30N50  $Q_{g(on)} \sim 200-300 \text{ нКл}$ . Таким образом, для напряжения затвор-исток 10 В получаем  $C_{эфф} \sim 20-30 \text{ нФ}$ . Это в 4-6 раз больше, чем  $C_{iss}$ ! Для того, чтобы время включения транзистора было порядка 100 нс, драйвер должен заряжать емкость затвора током порядка  $(2-3) \cdot 10^{-7} \text{ Кл} / 10^{-7} \text{ сек} \sim 2-3 \text{ А}$ . Такой ток драйвер IR2153 выдать не может. Поэтому в данном проекте IR2153 используется только как задающий генератор, сигналы которого затем будут усиливаться. Схема генератора представлена на рис.5.

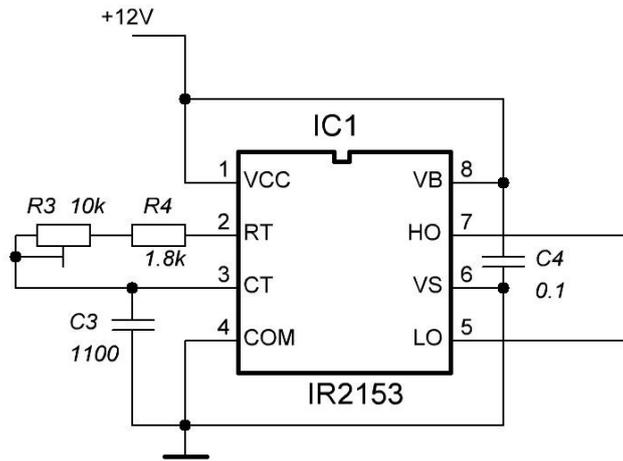


Рис.5. Генератор управляющих импульсов на IR2153

С выводов 5 (LO) и 7 (HO) мы получим сигналы, точно совпадающие с сигналами, представленными на рис.4. Резисторы R3 и R4 и конденсатор C3 определяют частоту генерирования импульсов. Для указанных номиналов при помощи резистора R3 эту частоту можно изменять в пределах приблизительно от 60 до 300 кГц.

Для усиления сигналов генератора управляющих импульсов существует множество схемотехнических решений, как на дискретных элементах, так и специализированные интегральные микросхемы (см., например, [4, 5]). В данном инверторе был применен не самый дешевый, но зато очень простой вариант. Были использованы 6-амперные быстрые драйверы MAX4420. Естественно, вместо этих драйверов можно поставить продукты других производителей или собрать их на комплементарных парах транзисторов (полевых или биполярных). Главное условие – они должны быть быстродействующими (фронты и спады – до сотни наносекунд) и обеспечивать токи несколько ампер. Однако проще и экономичнее – готовые интегральные драйверы. Схема включения драйверов MAX4420 показана на рис.6.

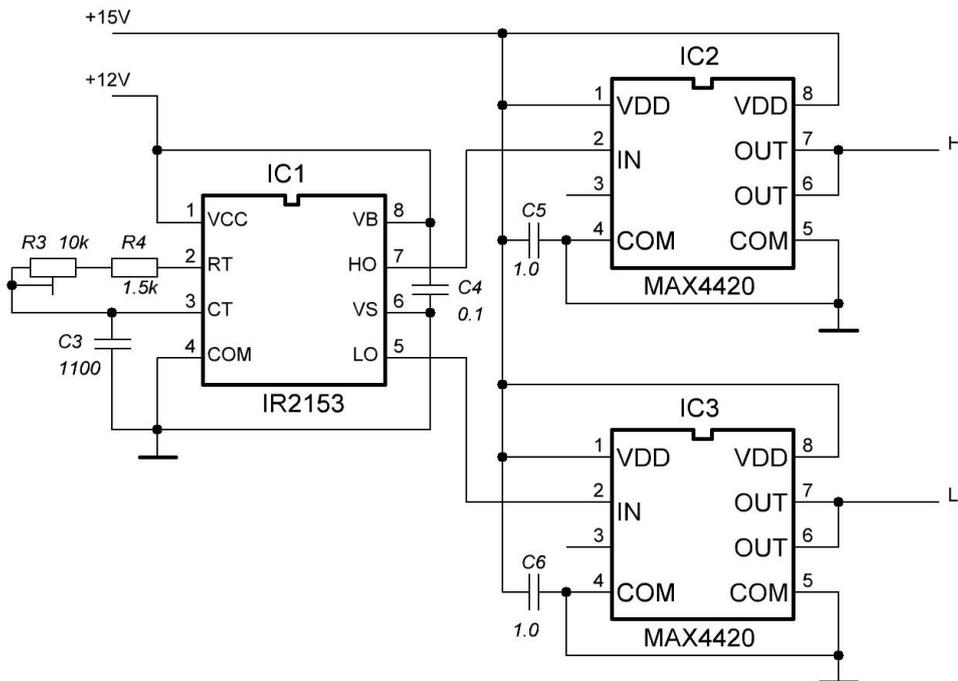


Рис.6. Фрагмент модуля управления

С выходов L и H мы получим усиленные управляющие импульсы, по форме совпадающие с сигналами на рис.4.

Теперь осталось рассмотреть очень важный и непростой вопрос - согласование уровней управляющих сигналов. Поскольку в основу силового модуля у нас положен полумост, то возникает известная проблема



важно. Мотать обмотки лучше сразу в три провода, параллельно или перевив их, равномерно распределяя витки по сердечнику. На рис.9 представлен вид модуля управления, собранного на макетной плате.

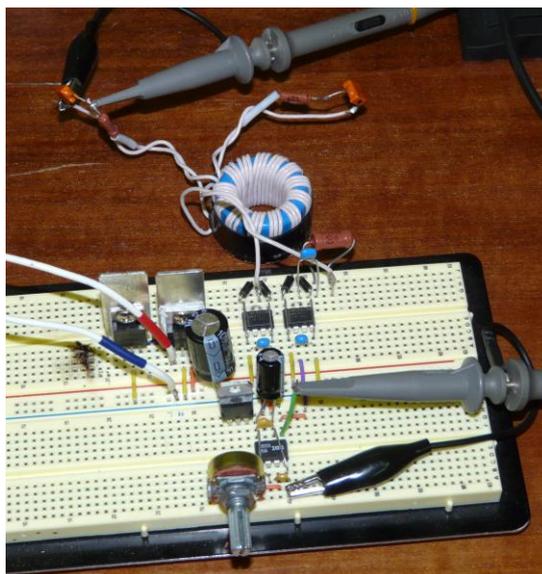


Рис.9. Общий вид макета модуля управления

Особых требований к монтажу здесь нет, кроме обычных правил для импульсных схем. Нужно стараться располагать компоненты поближе к друг другу, соединительные провода должны быть покороче и попрямее. Конденсаторы C4, C5 и C6 необходимо располагать непосредственно у корпусов соответствующих микросхем у ножек питания. В данном инверторе модуль управления неплохо работает и просто на макетной плате (как на рис.9).

Питание модуля управления осуществляется от единого нестабилизированного источника постоянного напряжения (20В, 8А), представляющего собой накальный трансформатор, выпрямительный мост и электролитический конденсатор на 1000 мкФ в качестве фильтра. Для получения стабилизированных напряжений 12В и 15В используются микросхемы стабилизаторов LM7812 и LM7815, включенных согласно datasheet. В принципе, драйвер IR2153 содержит внутри стабилитрон, поэтому его можно просто запитать через резистор от тех же стабилизированных 15В. Но для повышения помехоустойчивости лучше его запитать через отдельный стабилизатор. От этого же общего нестабилизированного источника питается и вентилятор силового модуля (через еще одну LM7812 с небольшим радиатором). На рис.9 эти стабилизаторы находятся в левой части платы.

На рис.10 представлена осциллограмма сигнала на выходе блока управления (на конденсаторах  $C_{эфф} = 3300$  пФ, на щупе осциллографа – делитель 1:10).

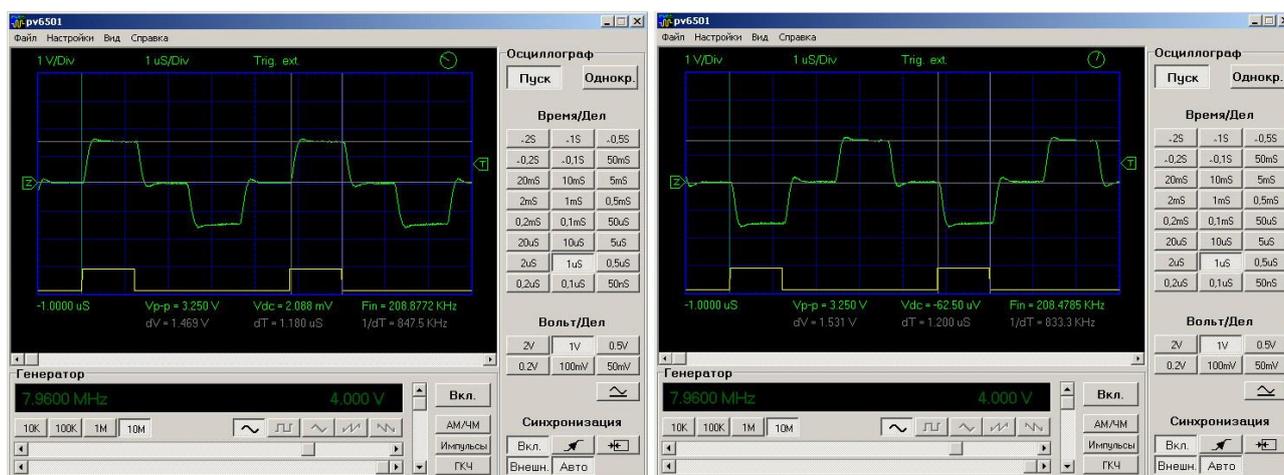


Рис.10. Осциллограммы управляющих сигналов на эквивалентах затворов (нижнее плечо слева и верхнее - справа).

Фронты и спады на емкостную нагрузку порядка 130-160 нс, «полочки» хорошо выражены, выбросы не превышают 0.5В. Необходимо учесть, что эффективная емкость реальных транзисторов гораздо больше (как правило, в 4 и более раз), поэтому при работе на реальные затворы фронты будут положе.

Подобная форма импульсов и длительности переходов сохраняются во всем рабочем диапазоне 60-300 кГц (см. рис.11). На этом рисунке представлены осциллограммы на границах диапазона. Видно, что спад вершины импульса при низких частотах (правая осциллограмма) незначительный.

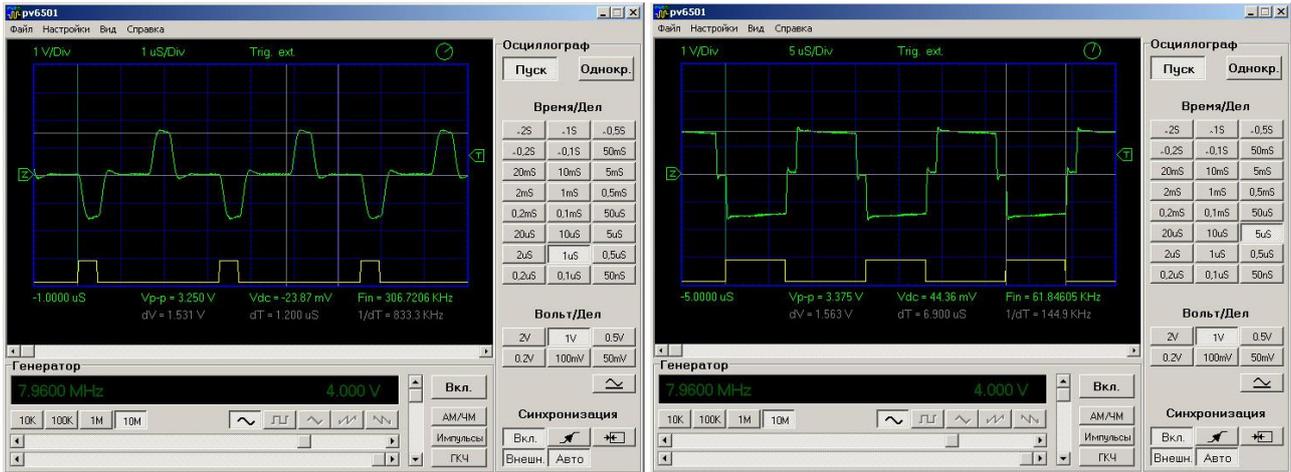


Рис.11. Форма сигналов на высоких (306 кГц) и низких (62 кГц) частотах

В заключение этого раздела отметим еще один положительный момент, связанный с применением трансформаторной развязки. Такое включение трансформатора, как на рис.8, превращает наш однополярный драйвер в двухполярный. Т.е. в полупериод, когда транзистор силового модуля должен быть закрыт, на его затвор подается отрицательный импульс (а не ноль, как в однополярном). Для приборов с изолированным затвором это допускается. Подача отрицательного сигнала на затвор позволяет существенно повысить помехоустойчивость силового модуля от наводок, избежать ложных срабатываний (открытий) транзисторов без дополнительных «обвязок» их затворов.

## Силовой модуль

Как уже отмечалось выше, в данном инверторе силовой модуль представляет собой полумост. Его полная схема представлена на рис.12.

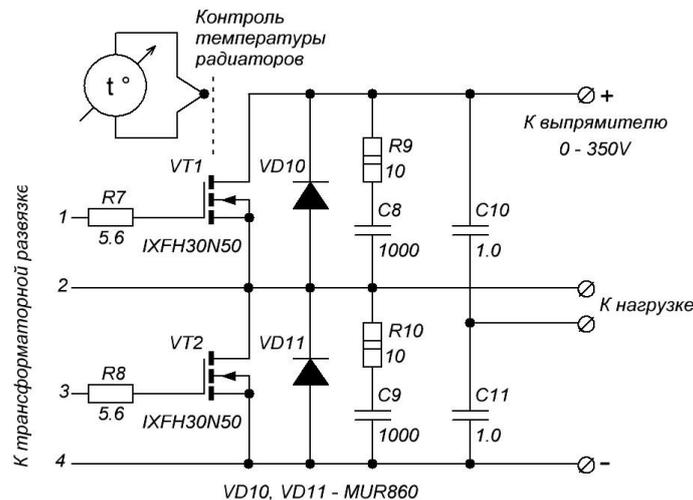


Рис.12. Схема силового модуля

В качестве ключей использованы транзисторы IXFH30N50 фирмы IXYS. Они почему-то гораздо дешевле аналогичных приборов других производителей. Эти транзисторы рассчитаны на ток до 30 А и рабочее напряжение до 500 В. Сопротивление «исток-сток» в открытом состоянии – 0.16 Ом. Можно было бы поставить и менее мощные транзисторы, но экономия будет незначительной, а запас мощности никогда не помешает. Единственной веской причиной для использования транзисторов попроще было бы уменьшение емкости затвора и заряда, необходимого для открытия транзистора. Но в данной разработке мы используем драйверы достаточно мощные и для этих транзисторов.

В цепях затворов мы используем только резисторы R7 и R8, которые ограничивают токи зарядки емкостей затворов и гасят высокочастотный «звон». В данном варианте силового модуля никаких дополнительных элементов в цепях затворов нет.

Силовые транзисторы шунтированы возвратными диодами VD10 и VD11. В принципе, их можно не ставить, так как используемые транзисторы (IXFH30N50) сами содержат не такие уж плохие внутренние диоды ( $t_{rr} < 250$  нс). Однако, если работать на повышенных частотах (сотни килогерц), лучше поставить сверхбыстрые диоды. Под рукой оказались MUR860 с  $t_{rr} < 60$  нс, ток 8 А и напряжение 600 В. Вместо них можно использовать другие сверхбыстрые диоды (например, HER или SF), сопоставимые по параметрам. Можно взять и менее мощные (по току) диоды, но тогда их желательно разместить в зоне обдува радиаторов транзисторов.

Снабберы R9-C8 и R10-C9 также шунтируют ключи. Они служат для подавления выбросов и особенно желательны при работе на индуктивную нагрузку. Резисторы R9 и R10 заметно греются, поэтому их лучше разместить в зоне обдува, либо использовать более мощные резисторы (5 – 10 Вт). Конденсаторы C8 и C9 должны быть рассчитаны на напряжение не менее 600-800 В.

Конденсаторы C10 и C11 тоже должны быть высоковольтными (не менее 400 В) и пленочными. Если они будут монтироваться вне зоны обдува, то лучше их собрать из нескольких (3-4) конденсаторов меньшей емкости, включенных параллельно. В данной работе каждый конденсатор собран из трех по 0.47 мкФ. Их нагрев был незначительным даже без обдува.

Теперь немного о конструкции силового модуля.

Несмотря на то, что мы взяли довольно мощные транзисторы, нагрев их в процессе работы будет все-таки ощутимым. Высоковольтные MOSFET имеют, к сожалению, все-таки достаточно высокое сопротивление открытого канала. Действительно, даже в полностью открытом состоянии на транзисторе будет выделяться порядка 10-16 Вт тепла ( $0.16 \text{ Ом} * (10 \text{ А})^2 = 16 \text{ Вт}$ ). Плюс еще потери при переключении и еще при повышенных частотах. Поэтому ключи обязательно необходимо размещать на радиаторах. Разумные размеры радиаторов получаются при условии их принудительного обдува. Очень удобно использовать для этой цели кулеры (теплосъемники) мощных компьютерных процессоров. Они содержат радиатор и вентилятор, объединенные в одну конструкцию. В последние годы ассортимент кулеров сильно расширился, и они заметно упали в цене. Цена бывшего в употреблении кулера, даже с медным радиатором и сносно работающим вентилятором, гораздо ниже стоимости большого дюралюминиевого радиатора. Такой кулер и был положен в основу конструкции силового модуля, представленного на рис.13.

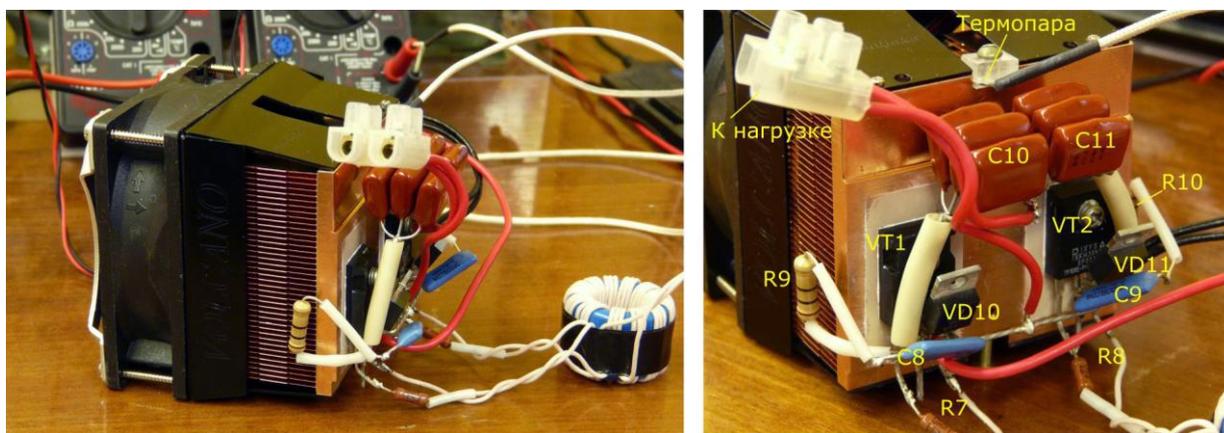


Рис.13 Силовой модуль

Транзисторы VT1 и VT2 размещены на изолирующих прокладках из слюды непосредственно на подошве радиатора. Остальные компоненты припаяны к выводам этих транзисторов и, по сути дела, на них и держатся. Термопара для контроля температуры транзисторов размещена сверху и прижата к медному основанию радиатора тоже через изолирующую прокладку. Прокладка необходима для устранения наводок на термопару, так как радиатор не заземлен и находится под плавающим потенциалом.

Ну вот, по сути дела, и весь инвертор. Осталось соединить все модули вместе и приступить к испытаниям.

## Первое включение инвертора

Для первого включения необходимо подключить развязывающий трансформатор и небольшую активную нагрузку. В качестве нагрузки возьмем лампу накаливания на 100 Вт. Вид собранного для испытаний инвертора представлен на рис.14.

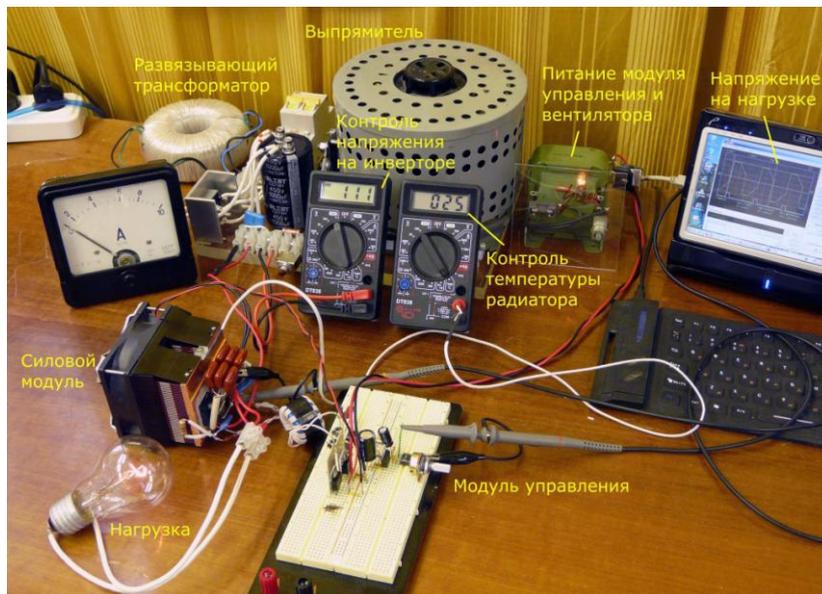


Рис.14. Готовый к испытаниям инвертор

Первое испытание инвертора проводим по шагам.

Шаг 1. Еще раз проверяем правильность монтажа и сборки инвертора. Полезно убрать все лишнее со стола.

Шаг 2. Включаем питание блока управления. Только блока управления! Высокое напряжение пока не включаем. Смотрим на экране осциллографа сигналы на затворах ключей. Земляной разъем щупа осциллографа подключаем к истоку соответствующего транзистора. Сигналы должны быть похожи на сигналы, представленные на рис.10. В зависимости от используемых транзисторов и драйверов фронты могут быть более пологие. Обязательно проверяем фазировку сигналов. Для этой цели, конечно, лучше двухлучевой осциллограф, но можно и однолучевым. В последнем случае запуск развертки осциллографа необходимо выполнять от отдельного сигнала синхронизации. В качестве такого сигнала удобно использовать один из выходов IR2153 (см. рис.8). Осторожнее с земляными разъемами щупов! В данном случае мы используем трансформаторную развязку, поэтому земляной разъем щупа в силовом блоке можно спокойно подключать к истокам обоих транзисторов полумоста. В противном случае для сигнала синхронизации нужно сделать развязку. Иначе могут быть большие искры.

Шаг 3. Если шаг 2 пройден успешно, подключаем щупы осциллографа параллельно нагрузке. Проверяем положение ручки ЛАТРа. Она должна быть на нуле! После этого включаем высокое напряжение. ЛАТРом плавно поднимаем напряжение до 15-20 В. Контролируем это напряжение по вольтметру выпрямителя. На экране осциллографа мы должны увидеть импульсы напряжения на нагрузке, симметричные относительно нуля (как на рис.15 слева).

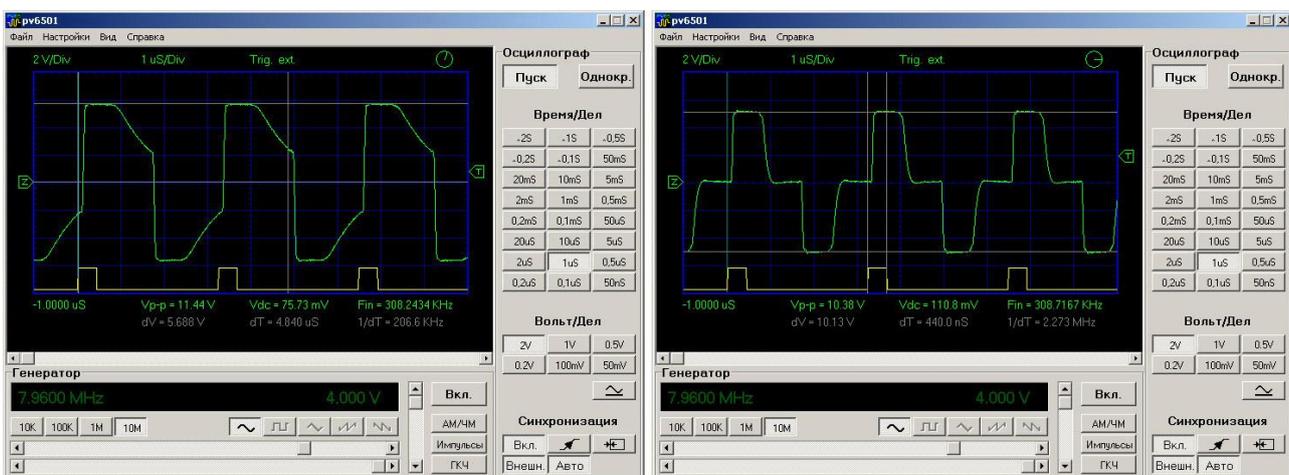


Рис.15. Осциллограммы сигналов на активных нагрузках. Высокоомная (лампочка 100 Вт, 40 Ом) слева, низкоомная (лампочка 500 Вт, 8 Ом) справа. Щуп с делителем 1:10.

На самом деле это осциллограммы с шага 5. Но на этом шаге сигналы должны быть точно такие же, только меньшей амплитуды. Я их привел здесь для того, чтобы обсудить их форму. Мы видим медленно спадающие в течение dead-time «хвосты» на высокоомной нагрузке (рис.15 слева). Это связано с тем, что в течении dead-time оба транзистора закрыты. Поэтому чисто активная нагрузка вместе со щупом осциллографа

© Кухтецкий С.В., 2010

просто, как говорят, «висит в воздухе». При отсутствии нагрузки (бесконечное сопротивление) потенциал средней точки (между ключами) вообще не изменяется в течение dead-time. Поэтому не нужно обращать внимание на эти хвосты. При уменьшении сопротивления нагрузки форма сигнала будет приближаться к классической (с «плечиками» dead-time). Чтобы убедиться в этом можно взять более мощную лампочку с меньшим сопротивлением нити накала или вообще другую нагрузку с сопротивлением 10-20 Ом. Осциллограммы для лампочки на 500 Вт приведены на рис.15 справа. Мы видим, что все работает правильно.

Продолжим работу с лампочкой на 100 Вт.

Шаг 4. Изменяем частоту инвертора от минимума до максимума. Форма импульсов не должна радикально меняться. По крайней мере они должны оставаться симметричными относительно нуля.

Шаг 5. Если на шаге 3-4 все нормально, постепенно увеличиваем напряжение до 100-120 вольт. Спираль лампочки начнет светиться. Первая мощность от инвертора получена! «Погоняем» его так минут 30-40. Температура радиатора не должна заметно уходить от комнатной.

Шаг 6. Если осциллограф не позволяет работать при высоких напряжениях, то отключим щуп и плавно выведем напряжение на уровень 300-310 В. Лампочка ярко светится. Следим за температурой радиаторов. Если нагрев существенный – придется все-таки возиться с разрядкой затворов MOSFET. В моих экспериментах в течение часа температура радиаторов превысила комнатную лишь на 2-3 градуса. Не таким уж страшным оказалось наше «недозакрывание» транзисторов. Спокойно работаем дальше. Общий вид инвертора во время этого шага представлен на рис.16.

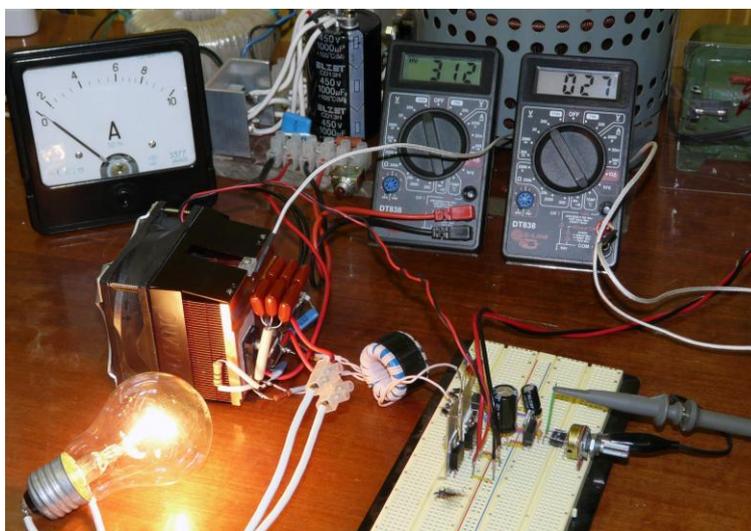


Рис.16. Общий вид инвертора в процессе испытаний (через час работы на шаге 6)

Шаг 7. Быстро выводим ЛАТР в 0 и быстро выключаем все питание (сначала высокое, затем - питание модуля управления с вентилятором). Внешней стороной пальца проверим температуру резисторов снабберов и конденсаторов делителя (R9, R10 и C10, C11). Они не должны быть горячими. Заодно проверим и радиатор. Так, на всякий случай. Вдруг у терморпары – плохой тепловой контакт.

Все. Первые испытания инвертора закончены. Теперь можно переходить к индукционному нагреву.

## Индукционный нагрев

Индукционный нагрев это технология, связанная с возбуждением вихревых токов в проводящих образцах для их нагрева. В настоящее время индукционный нагрев широко используется в различных отраслях промышленности и даже в быту (например, бытовые индукционные плитки). Однако, в исследовательской лаборатории индукционный нагрев – пока еще экзотика. Может быть лабораторный инвертор, о котором идет речь в данной статье, облегчит внедрение технологий индукционного нагрева в практику физико-химического эксперимента. Мы продемонстрируем замечательные возможности высокочастотных инверторов на одном красивом примере. Это – плавка металла (алюминия) во взвешенном состоянии. Иногда этот процесс называют плавкой в электромагнитном тигле или просто «левитационной плавкой» (с англоязычного термина «levitation melting»). Здесь высокочастотное электромагнитное поле не только греет и плавит металл, но и удерживает его в пространстве без каких-нибудь тиглей или ограничивающих стенок. Для того, чтобы осуществить такую плавку, нам необходимо изготовить водоохлаждаемую нагрузку с индуктором специальной формы и предусмотреть в системе некоторую дополнительную диагностику. Начнем с нагрузки.

## Нагрузка

Эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева и плавки представлена на рис.17.

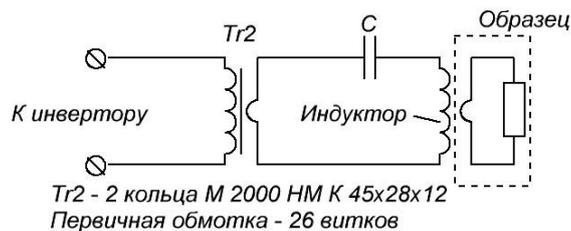


Рис.17. Эквивалентная схема нагрузки для индукционного нагрева

Трансформатор TR2 изготовлен из двух колец К 45x28x12. Марка феррита М 2000 НМ. Первичная обмотка – 26 витков провода МГТФ 0.75. Эта обмотка подсоединяется непосредственно к выходу инвертора. Роль вторичной обмотки, состоящей из одного витка, выполняет одна из отводных трубок индуктора (медь, диаметр 6 мм), проходящая через центр кольца трансформатора. Индуктор представляет собой катушку, содержащую несколько витков (медная трубка диаметром 4 мм). Индуктор вместе с конденсатором С образует последовательный колебательный контур, на резонансную частоту которого должен быть настроен инвертор. Нагреваемый образец, помещенный в индуктор на эквивалентной схеме можно представить как активное сопротивление, индуктивно связанное с индуктором.

Конструкция собранной нагрузки со специальным индуктором для плавки во взвешенном состоянии показана на рис.18 слева.

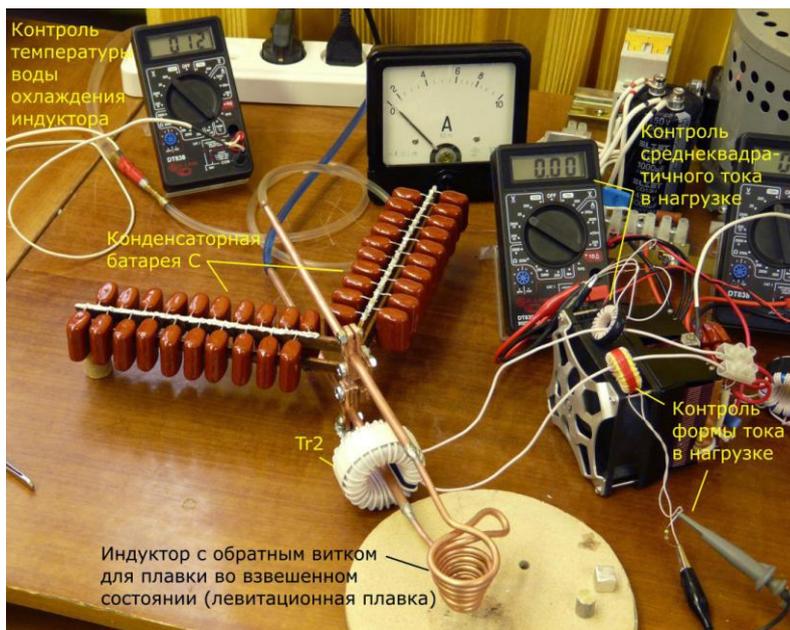


Рис.18. Общий вид нагрузки и дополнительной диагностики

Поскольку данная статья посвящена, в основном, инвертору, а не тонкостям индукционного нагрева, отметим только самые важные моменты, касающиеся конструкции нагрузки.

Во-первых, в нашем колебательном контуре проходят весьма большие токи (сотни ампер). Поэтому медные трубки, образующие индуктор и подводы к нему, при больших мощностях довольно сильно нагреваются. Их нужно обязательно охлаждать. Проще всего использовать водяное охлаждение непосредственно из водопровода. Поскольку в контуре имеется высокое напряжение, необходимо предусмотреть электрическую развязку индуктора от водопровода. Для этого подвод воды делаем тонкими длинными диэлектрическими трубами. Длина этих труб зависит от проводимости водопроводной воды. Проводимость воды в лаборатории автора составляет величину порядка 100 мкСм/см, поэтому развязка в виде трубок диаметром около 6 мм и длиной 5-6 м имеет достаточное для электрической развязки сопротивление (около 50 Ом). Желательно также контролировать и температуру охлаждающей воды. Это легко сделать при помощи металлической вставки в сливной тракт. К ней можно прикрепить термопару, подключенную к недорогому китайскому

тестеру, в котором есть режим измерения температуры (рис. 18 в левом верхнем углу). Очень удобно - сразу видно, если забыл включить воду для охлаждения.

Во-вторых, конденсатор С колебательного контура должен быть рассчитан на довольно большую реактивную мощность. Необходимо использовать либо специальные конденсаторы для индукционного нагрева, либо набирать батарею из достаточно большого количества пленочных конденсаторов меньшей емкости, включенных параллельно. В данном контуре конденсаторная батарея содержит 40 полипропиленовых высоковольтных конденсаторов СВВ81. Емкость каждого конденсатора - 0.033 мкФ, рабочее напряжение 2 кВ. Общая емкость батареи - 1.32 мкФ. Тангенс угла потерь их составляет 0.0008. Поэтому на каждом конденсаторе выделяются в виде тепла лишь десятые доли ватта. Конденсаторы смонтированы свободно и хорошо охлаждаются конвективными потоками воздуха. Поэтому, даже после получаса работы на максимальной мощности они нагреваются незначительно (на 10-20 градусов).

И, в-третьих. Для устойчивой левитационной плавки, конструкция катушки индуктора должна иметь специальную форму. В данном случае индуктор выполнен из медной трубки диаметром 4 мм в виде конуса. Угол между образующей и горизонталью равен 65°. Индуктор содержит четыре витка в прямом направлении и один - в обратном (противовиток). Это нужно для того, чтобы внутри индуктора была область, в которой поле меньше, чем вокруг нее. Проводник, помещенный в переменное электромагнитное поле, выталкивается в область меньших полей. Поэтому без области с минимальным полем положение образца внутри индуктора будет неустойчивым. Для левитационной плавки небольших образцов коническая конструкция индуктора с противовитком - одна из самых простых, но эффективных. Подробнее о плавке во взвешенном состоянии и сравнительный анализ различных конструкций индукторов см. в [5, 6].

## Дополнительная диагностика

Для «ручной» настройки инвертора на резонанс при работе с резонансной нагрузкой и оптимизации процесса нагрева полезно добавить к установке еще пару измерителей, связанных с током, потребляемым нагрузкой.

Первый измеритель предназначен для контроля среднеквадратичного тока. Это трансформатор тока с двухполупериодным выпрямителем. Первичная обмотка представлена проводом, идущим от инвертора к нагрузке и проходящим через центр небольшого ферритового кольца. На этом кольце намотана вторичная обмотка (20 - 30 витков провода с выводом от середины обмотки). Далее при помощи двух диодов сигнал выпрямляется, фильтруется и измеряется при помощи обычного китайского мультиметра.

Второй измеритель также представляет собой трансформатор тока, идущего в нагрузку, но служит для контроля осциллограммы сигнала. Он устроен практически так же, как и в предыдущем случае, но вторичная обмотка не содержит вывода из центра и нагружена на резистор в несколько сотен Ом. С этого резистора сигнал подается на осциллограф. Очень удобно при настройке на резонанс и контроле нештатных ситуаций.

## Проверка работоспособности установки индукционного нагрева

Включаем воду охлаждения и все измерители, необходимые для контроля процесса. Далее, сначала включается питание модуля управления и вентилятора, а затем - источник высокого напряжения (выпрямитель). Плавно при помощи ЛАТРа увеличиваем напряжение до 30-50 В. Затем, медленно изменяя частоту инвертора (резистор R3 на рис. 8), пытаемся настроить инвертор на резонанс. Резонанс настраиваем по максимуму тока, потребляемого нагрузкой, контролируя его амплитуду по осциллографу. После настройки на резонанс увеличиваем при помощи ЛАТРа напряжения на силовом модуле до нужного уровня. Установка для индукционного нагрева готова к работе.

Выключение производится в обратном порядке. Сбрасываем высокое напряжение (выводим ЛАТР в 0), затем выключаем его. После этого выключается источник питания модуля управления. Дальше - в произвольном порядке.

Настройку на резонанс приходится выполнять не так уж часто. Опыт показал, что при внесении в индуктор небольших ферромагнитных образцов, расстройка контура не приводит к фатальному уменьшению поглощаемой образцом мощности и он греется достаточно хорошо даже без дополнительной подстройки частоты. При работе с немагнитными материалами резонансная частота вообще практически не «уходит».

На рис. 19 и рис. 20 представлены два примера, иллюстрирующие работу инвертора в качестве индукционного нагревателя. Первый вариант - ферромагнетик (просто - ручка надфиля), второй - немагнитный (кусоч нержавеющей трубки). По ссылкам ниже можно загрузить видео, показывающие весь процесс. Ни в том, ни в другом случае никакой дополнительной подстройки частоты не производилось.

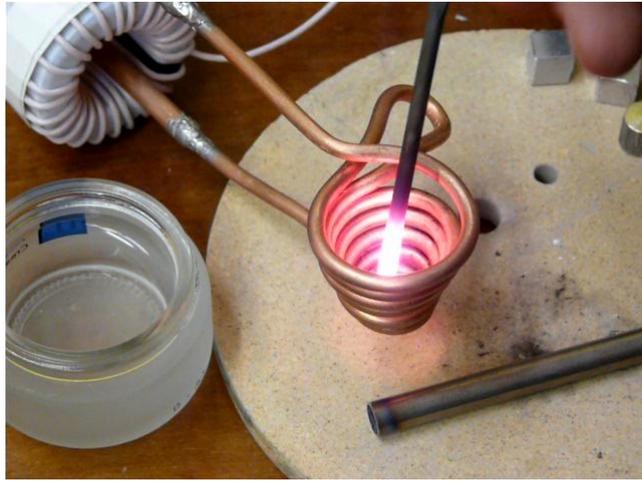


Рис.19. Нагрев ферромагнитного материала

[Посмотреть видео](#)

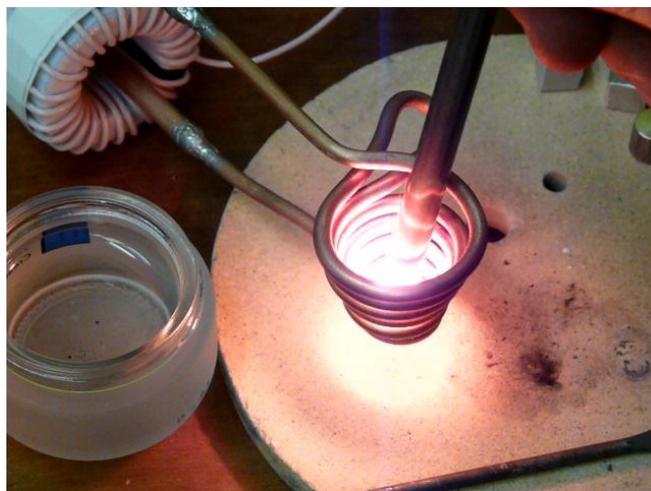


Рис.20. Нагрев немагнитного материала

[Посмотреть видео](#)

При помощи пирометра ПД-4-02 была оценена температура графитового образца, помещенного в индуктор, на воздухе, без теплоизоляции. При максимальной мощности она была около 1300-1350°C. Так что для небольших трубчатых печей с графитовым нагревателем наш инвертор вполне подходит. Перейдем теперь к плавке.

## Левитационная плавка

Плавка во взвешенном состоянии – довольно увлекательное занятие. В качестве образца для плавки выбран кусочек алюминия весом 2.6 гр. Отдельные кадры, иллюстрирующие процесс плавки, приведены на рис.21. Полное видео плавки можно загрузить по ссылке ниже.

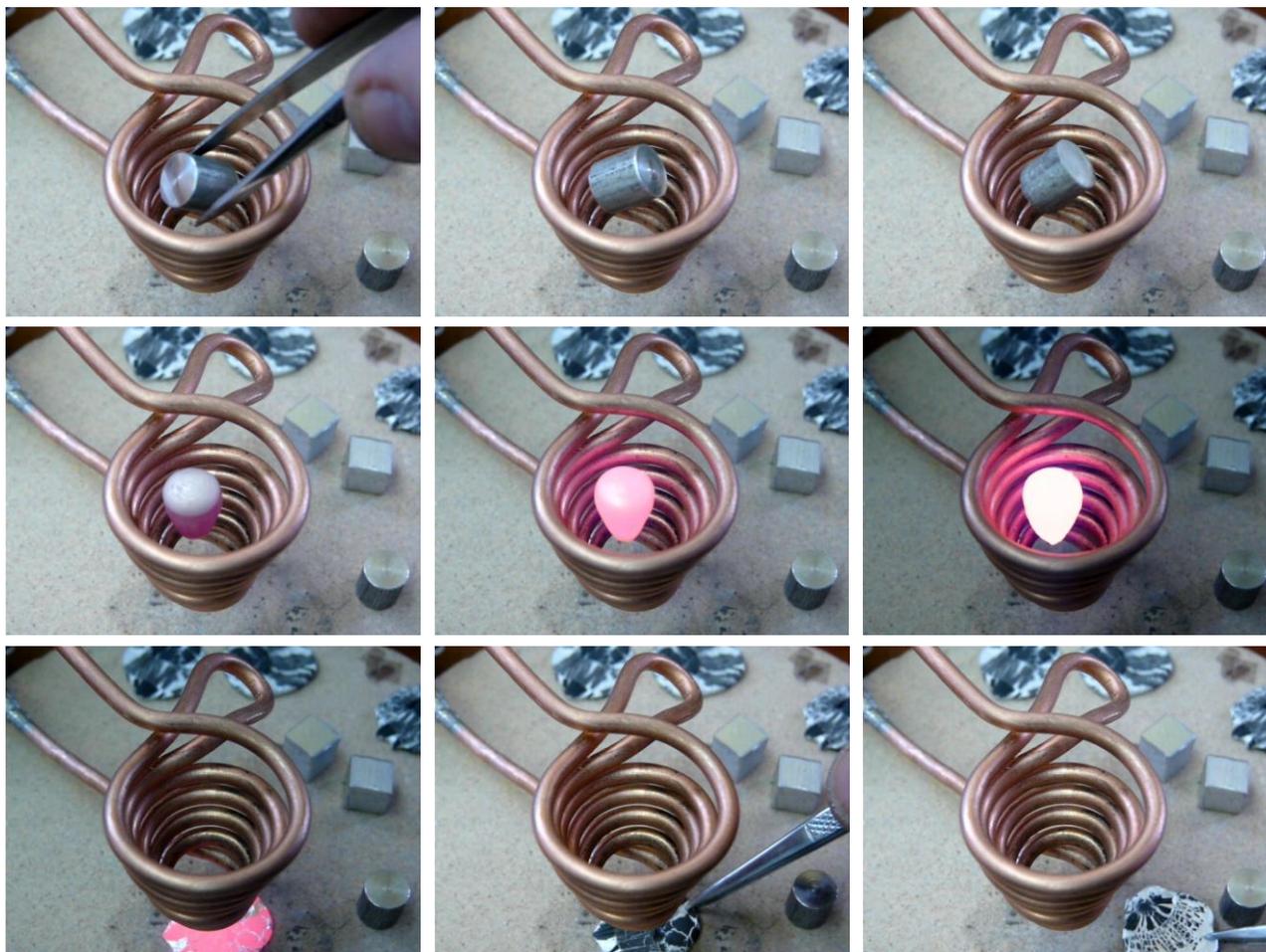


Рис.21. Процесс плавки во взвешенном состоянии

[Посмотреть видео](#)

Во взвешенном состоянии образец может находиться неограниченно долго. Положение его довольно устойчивое. Оценка температуры верхушки образца (в расплавленном состоянии при максимальной мощности) была сделана тем же пирометром ПД-4-02 без поправки на излучательную способность перегретого алюминия. Она равна 1150-1200°C.

## Заключение и выводы

Двухнедельная работа с описанным в данной статье лабораторным инвертором показала, что эта конструкция вполне может «трудиться» в исследовательской лаборатории в качестве устройства для индукционного нагрева и плавки. За это время было расплавлено более полусотни образцов алюминия, около десятка образцов стали и несколько образцов меди. Большинство плавков алюминия были выполнены во взвешенном состоянии. Масса образцов 2-3 гр. Масса стальных и медных образцов тоже составляла несколько грамм. Плавки проводились как в графитовых тиглях, так и без них.

Инвертор работал стабильно. Во всех этих экспериментах не случилось никаких нештатных или аварийных ситуаций. Никаких перегревов или взрывов транзисторов и других компонентов также не произошло. По сути дела, работа с инвертором ничем не отличалась от работы с любым другим несложным лабораторным прибором.

Так что можно считать, что цель создания простого лабораторного инвертора для индукционного нагрева и плавки небольших образцов металлов достигнута.

Естественно, в процессе разработки и практической работы с инвертором накопился список необходимых модернизаций и улучшений, которые желательно провести в ближайшем будущем. Первые в очереди из них перечислены ниже.

1. Выпрямитель. Хотелось бы убрать громоздкий регулятор напряжения на ЛАТРе и поставить что-нибудь более современное, компактное и главное – с запасом по мощности.
2. Модуль управления. Желательно удешевить «оконечники» (усилители) и выбрать более доступные компоненты. В принципе, здесь ничего сложного нет. Нужно просто проанализировать существующие в большом количестве решения и выбрать наилучшее.
3. Трансформаторные развязки. В данной конструкции мы использовали самые простые решения. Мы «заплатили» за эту простоту качеством сигналов и сравнительно пологими фронтами импульсов. В принципе, работать можно, транзисторы греются приемлемо. Однако, лучше поработать в этом направлении дополнительно.
4. Силовой модуль. Желательно увеличить мощность инвертора до 4-5 кВт. В принципе, можно увеличить мощность в два раза, практически ничего не меняя в схемотехнике. Для этого достаточно перейти с полумоста на полный мост. Добавится еще один кулер с парой транзисторов с «обвязкой» и пара дополнительных обмоток на импульсном трансформаторе блока управления.

Поскольку лабораторный инвертор имеет модульную структуру, то все эти модификации легко делать параллельно, не выводя инвертор надолго из работы. Возможно, в результате этих модификаций удастся создать действительно «бюджетный» вариант лабораторного инвертора. Это способствовало бы более широкому внедрению технологий индукционного нагрева в лабораторную практику.

## Литература

1. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М. Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Шандренко Д.А. Транзисторный регулятор напряжения.  
[http://electroscheme.org/2007/08/13/tranzistornyj\\_reguljator\\_naprijazhenija.html](http://electroscheme.org/2007/08/13/tranzistornyj_reguljator_naprijazhenija.html) или  
[http://www.radiolub.orisk.info/Shems/Shems2/tr\\_reg.htm](http://www.radiolub.orisk.info/Shems/Shems2/tr_reg.htm)
4. Design Tips DT92-2A: High Current Buffer for Control IC's. <http://www.irf.com/technical-info/designtp/dt92-2.pdf>. См. русский перевод: Мощный буфер тока для управления затворами МОП-транзисторов [http://vcoder.flyback.org.ru/electronics/power\\_buffer/Power\\_buffer.pdf](http://vcoder.flyback.org.ru/electronics/power_buffer/Power_buffer.pdf)
5. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Л. Машиностроение, 1979. – 104 с.
6. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии. М. Metallurgia, 1974. – 176 с.

## Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ОХНМ РАН (проект №5.5.3) и ГК № 02.740.11.0269.

# Приложение

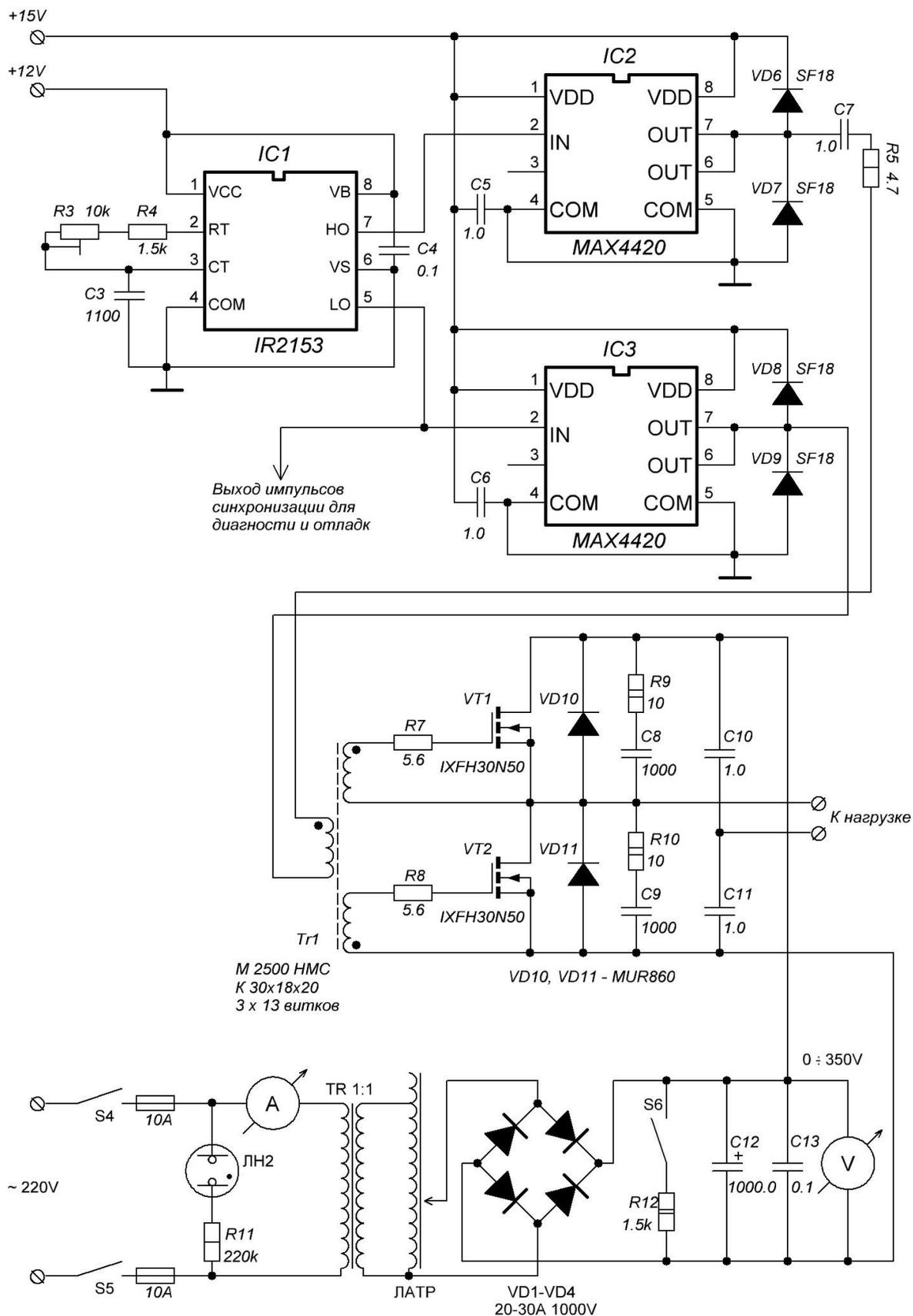


Рис.22. Общая схема инвертора