

В ПОМОЩЬ ДОМАШНЕМУ  
МАСТЕРУ

# СВАРОЧНЫЙ ИНВЕРТОР

теория и практика



АН08

«В помощь домашнему мастеру»

СВАРОЧНЫЙ ИНВЕРТОР

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

г. Рыбинск  
2008

УДК 64  
ББК38.762.3 Б95

Оригинал-макет подготовлен издательством  
«Центр общечеловеческих ценностей»

## Сварочный инвертор теория и практика:

Б95/Сост. В.И. Назаров, В.И. Рыженко. — М.:  
Издательство Оникс, 2008. — 40 с: ил. —  
(В помощь домашнему мастеру).

ISBN 5-488-00630-3

**В нашей книге приводятся сведения о реализации систем  
Сварочный инвертор  
теория и практика**

УДК 64  
ББК 38.762.3

ISBN 5-488-00630-3

ISBN 5-488-00630-3 © Назаров В.И., Рыженко В.И.,  
составление, 2008 © ООО «Издательство Оникс»,  
иллюстрации, оформление обложки, 2008

## 1. Немного теории и основные требования к сварочному инвертору.

Для понимания принципов построения сварочного источника инвертора необходимо немного затронуть процессы возникновения горения сварочной дуги. Начнем с вольтамперной характеристики дуги (в дальнейшем ВАХ)

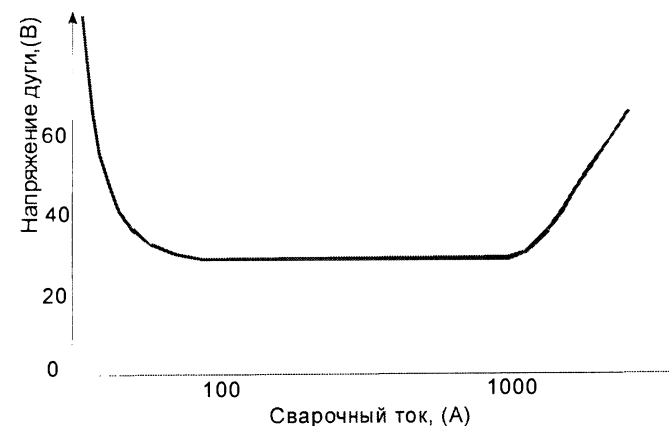


Рис.1

На рис.1 показана ВАХ дуги в общем виде. Как видим при малых токах, примерно до 80А характеристика дуги имеет падающий вид, или если на пальцах - при возрастании тока напряжение дуги падает. Это очень интересное свойство дуги которое можно и нужно использовать! Исходя из приведенного графика можно сделать однозначный вывод - чем выше напряжение, приложенное к искровому промежутку, тем легче процесс возникновения дуги, дуга загорится при токе намного меньше, чем если мы будем пытаться её зажечь на прямолинейном участке ВАХ! Именно с целью облегчения зажигания дуги применяются осцилляторы и различные устройства повышающие выходное напряжение сварочных аппаратов. Стандартное напряжение холостого хода (ХХ) для инверторных сварочных аппаратов колеблется от 70В до 95В, и зависит только от конструкции вольтдобавки.

Основной источник обычно имеет пологопадающую характеристику с крутопадающим хвостовым участком, ограничивающим максимальный ток короткого замыкания (КЗ). Приблизительный график ВАХ сварочного инвертора должен иметь вид, как на рис. 2. Как видим высокое выходное напряжение ХХ обеспечивает стабильный поджиг и поддержание устойчивого горения дуги на всех режимах работы. При такой ВАХ сварочного инвертора, легко поджигаются и устойчиво горят электроды всех марок, в том числе электроды для сварки нержавеющей сталей, цветных металлов и чугуна.

На рис. 2 показан приблизительный график ВАХ, и реальная ВАХ может значительно отличаться, но в идеале нужно стремиться именно к получению похожей выходной характеристики сварочного аппарата. Мы рассмотрели только участок ВАХ дуги для токов менее 100А, но именно от того, насколько характеристика источника на этом участке будет похожа на характеристику дуги, зависит устойчивость дуги, и как следствие качество сварного шва.

Вот мы и сформулировали первое требование к сварочному инвертору - крутопадающая ВАХ. Это обязательное условие, если оно не будет выполнено, то у нас врядли получится сварочный аппарат с достойными параметрами.

Рассмотрим следующий участок ВАХ дуги, который начинается после 80А, и продолжается примерно до 800А. На этом участке ВАХ, дуга является стабилизатором напряжения, именно этот участок является наиболее подходящим для переноса расплавленного металла от электрода к свариваемому изделию. Напряжение в дуге на этом участке не зависит от приложенного тока, а зависит только от длины дуги.

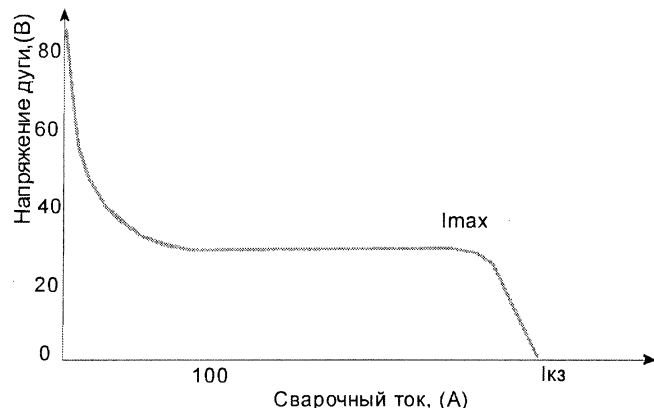


Рис.2

Величину этого напряжения можно вычислить по формуле:

$$U_d = a + b \cdot L$$

где  $U_d$  - напряжение дуги, В;

$a$  - постоянный коэффициент, выражающий сумму падений напряжения на катод и аноде дуги, не зависящий от длины дуги, В;

$b$  - среднее падение напряжения на единицу длины дуги, В/мм;

$L$  - длина дуги, мм.

Для стальных электродов можно в среднем принять  $a=10В$  и  $b=2В/мм$ .

Тогда напряжение дуги длиной  $L=4мм$  составит:

$$U = 10 + 2 \cdot 4 = 18В.$$

При атмосферном давлении, дуга при сварке металлическим электродом горит устойчиво при напряжении 18 - 28В. Это и будет следующее требование к нашему источнику. Во всём рабочем диапазоне, от  $I=80А$  до  $I_{max}$ , напряжение не должно быть меньше 18В, а для стабильной работы не менее 22-24В! А теперь рассмотрим третий, хвостовой участок ВАХ сварочного инвертора. Этот отрезок кривой очень важен для стабильного горения дуги, для ограничения тока КЗ, для ограничения мощности инвертора, для безопасной работы силовых ключей! В разных конструкциях преобразователей он формируется различными способами, и как следствие, имеет разный наклон. В инверторах с ШИМ, ограничение максимального тока силовых ключей организовано через ОС, в качестве датчика может применяться токовый трансформатор. При достижении граничного тока, импульс с токового трансформатора поступает на вход ограничения тока в блок управления, и прерывает управляющий импульс, поступающий на силовые ключи.

На осциллограмме это выглядит, как сужение управляющего импульса. И чем больше нагрузка, тем короче становится импульс управления. Напряжение на выходе начинает понижаться, хотя ток растёт. Крутизна этого участка зависит от времени запаздывания реакции контроллера на изменение нагрузки. Для резонансных инверторов, этот участок ВАХ имеет более пологий наклон, его величина зависит только от добротности резонансной LC цепочки, и чем она выше, тем более крутой этот угол. Как видите, если аппарат правильно настроен, то можно обойтись без ОС по току! Ограничение мощности будет происходить автоматически. Именно поэтому считается, что резонансные преобразователи не боятся режима КЗ! И это правда! Вот сформировалось и третье основное требование - ограничение максимального тока силовых ключей! Это самое важное требование! Эти три условия должны быть выполнены в обязательном порядке! Все остальные требования к сварочному источнику не столь важны. Необходимо о них рассказать.

Это: а) безопасность, сварщик должен быть уверен, что не попадёт под действие напряжения опасного для жизни;

б) наличие защиты от режима длительного КЗ;

в) наличие защиты от перегрева силовых частей аппарата;

г) защищённость от влаги и пыли;

д) наличие системы поджига и стабилизации горения дуги.

## 2. Типы высокочастотных преобразователей, наиболее часто применяемых для построения сварочных инверторов.

Наиболее часто, при построении сварочных инверторов, применяют три основных типа высокочастотных преобразователей: полумост, ассиметричный мост (или "косой мост") и полный мост. Подвидом полумоста и полного моста, являются резонансные преобразователи. В зависимости от системы управления выходными параметрами, преобразователи бывают с ШИМ (широтно-импульсная), с ЧИМ (частотная регулировка), с фазовой регулировкой, и комбинациями из этих трёх. Все эти типы преобразователей имеют свои достоинства и свои недостатки. Начнем с полумоста с ШИМ. Блок схема такого преобразователя показана на Рис.3.

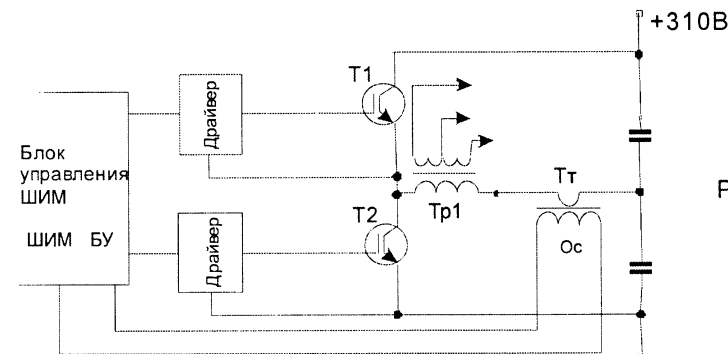


Рис.3

Это самый простой преобразователь из семейства двухтактников, но от этого не менее надёжный. Недостатком этой схемы является то, что "раскачка" напряжения на первичной обмотке силового трансформатора, равна половине напряжения питания. Но с другой стороны, этот факт является плюсом, можно применить сердечник меньшего размера, без опасения захода в режим насыщения.

Для инверторов небольшой мощности (2-3кВт), такой преобразователь весьма перспективен. Но ШИМ управление требует особой тщательности при монтаже силовых цепей, для управления силовыми транзисторами необходимо ставить драйверы. Транзисторы такого полумоста работают в режиме жёсткого переключения, поэтому к управляющим сигналам предъявляются повышенные требования.

Обязательно наличие "мёртвого времени" между двумя противофазными импульсами, отсутствие паузы, или недостаточная её длительность, всегда приводит к возникновению сквозного тока через силовые транзисторы.

Последствия легко предсказуемы - выход транзисторов из строя. Весьма перспективным видом полумостового преобразователя, является резонансный полумост. Блок схема такого полумоста приведена на Рис.4.

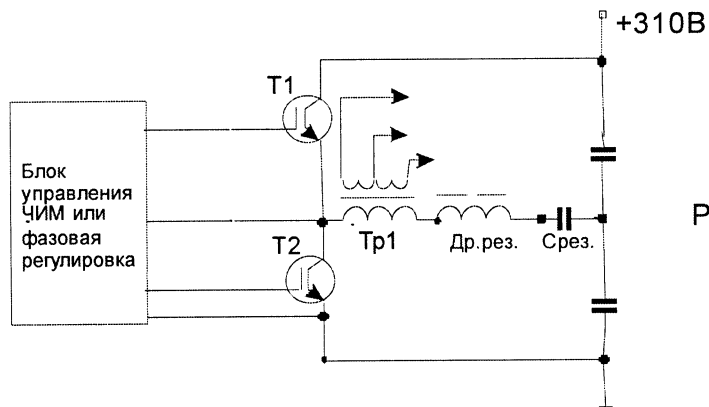


Рис.4

Как видно из блок схемы, резонансный полумост гораздо проще, чем полумост с ШИМ. Простота построения преобразователя по такой схеме обусловлена тем, что коммутация ключей происходит в нуле тока или в нуле напряжения. Паразитные индуктивности монтажа автоматически учитываются, максимальный ток через транзисторы ограничен последовательным резонансным контуром. Др. рез.-срез.

Ток протекающий через силовые цепи имеет форму синусоиды, а это снимает нагрузку с фильтрующих конденсаторов.

При таком построении силовые ключи не нуждаются в драйверах! Достаточно обыкновенного импульсного трансформатора, чтобы переключить силовые транзисторы. Качество управляющих импульсов не столь существенно, как в схеме с ШИМ, хотя пауза ("мёртвое время") должна быть.

Ещё один плюс, эта схема позволяет обойтись без токовой защиты и форма ВАХ (вольт - амперная характеристика) имеет сразу падающий вид и не нуждается в параметрическом формировании.

Выходной ток ограничен только индуктивностью намагничивания трансформатора и может достигать значительных величин при КЗ, это необходимо учитывать при выборе выходных диодов, но это свойство положительно влияет на поджиг и горение дуги!

Обычно выходные параметры регулируются изменением частоты, однако применение фазовой регулировки дает гораздо больше плюсов и является наиболее перспективной для сварочного инвертора, так как позволяет обойти такое неприятное явление, как совпадение резонанса с режимом КЗ, да и диапазон регулировки выходных параметров намного шире. Фазовая регулировка позволяет менять выходной ток практически от 0 до  $I_{max}$ .

Следующая схема - асимметричный мост, или "косой мост". Блок схема такого преобразователя показана на Рис.5.

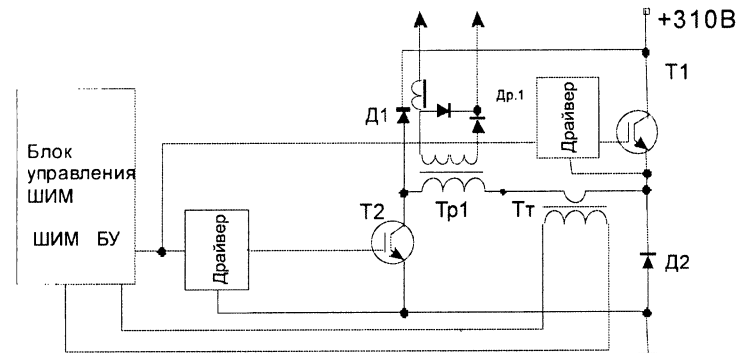


Рис.5

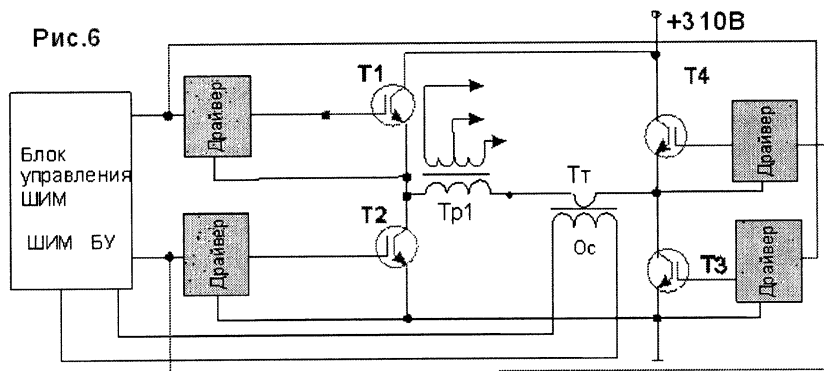
Асимметричный мост - однокатный, прямоходовый преобразователь.

Преобразователь такой конфигурации очень популярен, как у производителей сварочных инверторов, так и у радиолюбителей. Первые сварочные инверторы были построены именно, как "косой мост". Простота и надёжность, широкие возможности для регулировки выходного тока, помехозащищённость - всё это привлекает разработчиков сварочных инверторов до сих пор.

И хотя недостатки такого преобразователя довольно существенны, это большие токи через транзисторы, высокие требования к форме управляющих импульсов, что подразумевает использование мощных драйверов для управления силовыми ключами, высокие требования к монтажу силовых цепей, большие импульсные токи предъявляют высокие требования к конденсаторам входного фильтра, электролитические конденсаторы очень не любят большие импульсные токи. Для удержания транзисторов в ОДЗ (области допустимых значений) требуются RCD цепочки (снабберы).

Но, несмотря на все эти недостатки и малый КПД, "косой мост" до наших дней применяется в сварочных инверторах. Транзисторы T1 и T2 работают синфазно, вместе открываются и вместе закрываются. Энергия накапливается не в трансформаторе, а в выходной катушке индуктивности дросселя. Рабочий цикл не превышает 50%, именно поэтому для получения одинаковой мощности с мостовым преобразователем, требуется двойной ток через транзисторы. Более детально работа такого преобразователя будет рассмотрена на примере реального сварочного инвертора.

Следующий тип преобразователя - полный мост с ШИМ. Классический двухтактный преобразователь!.. Блок схема полного моста приведена на Рис.6.



Мостовая схема даёт возможность получить мощность в 2 раза больше, чем полумост, и в 2 раза больше чем "косой мост", при тех же величинах токов и потерь на переключение. Это объясняется тем, что "раскачка" напряжения первичной обмотки силового трансформатора, равна напряжению питания.

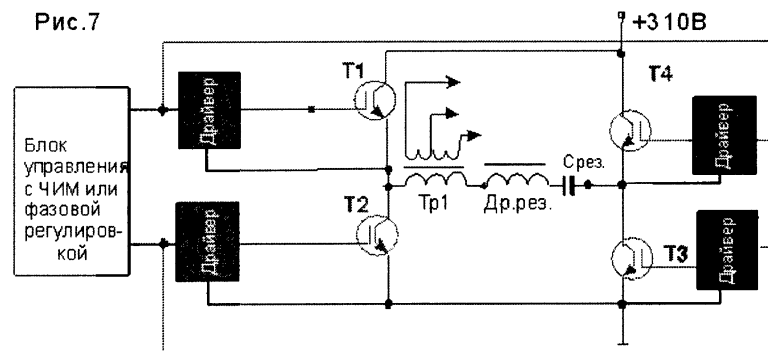
Соответственно для получения одинаковой мощности, например с полумостом (в котором напряжение раскачки равно  $0,5U$  пит.), потребуется ток через транзисторы в 2 раза меньше! Транзисторы полного моста работают по диагонали, когда T1 - T3 открыты, T2 - T4 закрыты, и наоборот. Трансформатор тока отслеживает амплитудное значение тока, протекающего через включенную диагональ. Регулировать выходной ток такого преобразователя можно двумя способами:

- 1) изменять длительность управляющего импульса, оставляя неизменным напряжение отсечки;
- 2) изменять уровень напряжения отсечки приходящего с токового трансформатора, оставляя неизменным длительность управляющих импульсов.

Оба этих способа позволяют изменять выходной ток в достаточно широких пределах. Недостатки и требования у полного моста с ШИМ, точно такие, как и у полумоста с ШИМ. (См. выше). И наконец, рассмотрим наиболее перспективную схему ВЧ преобразователя, для сварочного инвертора - резонансный мост. Блок схема представлена на Рис.7.

Как может показаться на первый взгляд, схема резонансного моста не сильно отличается от моста с ШИМ, и это действительно так. Практически дополнительно введена только LC резонансная цепочка, включенная последовательно с силовым трансформатором. Однако введение этой цепочки полностью меняет процессы перекачки мощности. Уменьшаются потери, увеличивается КПД, на порядок снижается уровень электромагнитных помех, понижается нагрузка на входные электролиты. Как видите можно полностью убрать защиту по току, драйверы силовых транзисторов могут понадобиться лишь в том случае, если применяются MOSFET транзисторы с ёмкостью затвора больше 5000pF. Для IGBT транзисторов достаточно одного импульсного трансформатора.

Более подробное описание работы и настройки, будет приведено чуть дальше, на примере реального сварочного инвертора.



Управлять выходным током резонансного преобразователя можно двумя способами, это частотным и фазовым. Оба они упоминались раньше, в описании резонансного полумоста. И последний тип ВЧ преобразователя - полный мост с дросселем рассеяния. Его схема практически ничем не отличается от схемы резонансного моста (полумоста), точно так включена LC цепочка последовательно с трансформатором, только она не является резонансной.  $C = 22\text{мкФ} \times 63\text{В}$  работает как симметрирующий конденсатор, а L дросселя, как реактивное сопротивление, величина которого линейно зависит от частоты. Управление такого преобразователя - частотное. С увеличением частоты - сопротивление L, увеличивается. Ток через силовой трансформатор уменьшается. Просто и надёжно. Большинство промышленных инверторов построены на таком принципе регулировки и ограничения выходного тока.

Теперь перейдем к электрическим схемам.

### 3. Ассиметричный мост, или одноктный прямоходовой, или просто "косой мост".

На Рис.8,8а, показаны полные принципиальные схемы одноктного прямоходового сварочного инвертора на токи 5 - 160А. Схемы достаточно простые и надёжные, при своей простоте обеспечивают достаточно хорошие характеристики. Единственное отличие этих схем, это задающий генератор. В первой это uc3845, во второй uc3825. Ниже приведены точечные данные трансформаторов и дросселя.

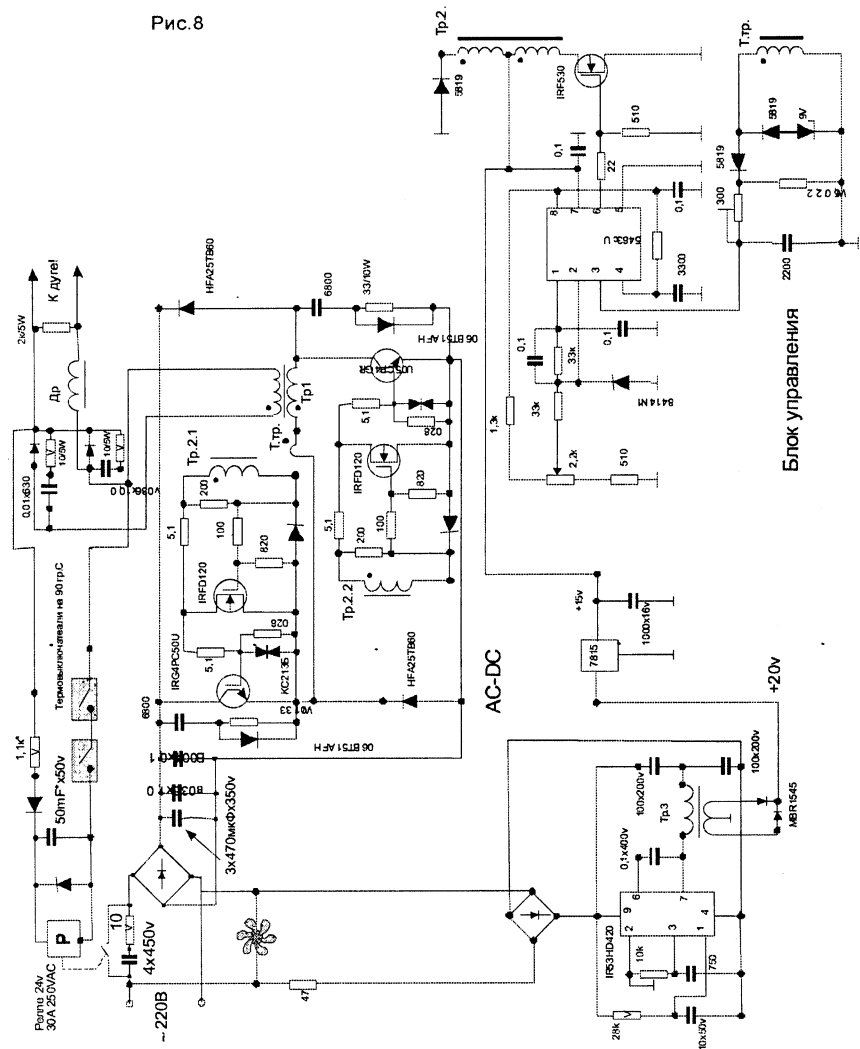
Tr.1, E65 №87, ЭПКОС, зазор 0,1 мм

I - 18-20 витков ПЭТВ-2, диаметр 1,96 мм, в один слой,

II - 6 витков, ПЭТВ-2, диаметром 2,24 мм, мотать в два провода, сначала один слой, затем через изоляцию второй. Обмотки соединить параллельно. В общем, должно получиться сечение около 16мм кв. Прокладки между слоями лучше делать из теплопроводной резины "НОМАКОН", но можно применить и фторопласт.

Тр.2 Ш7х7 2000НМ. Все обмотки по 35 витков, ПЭВ-2 0,35 мм зазор 0,5 мм Т.тр. 2хК20х10х5 2000НМ 100 витков ПЭВ 0,2 мм Др.

Рис. 8

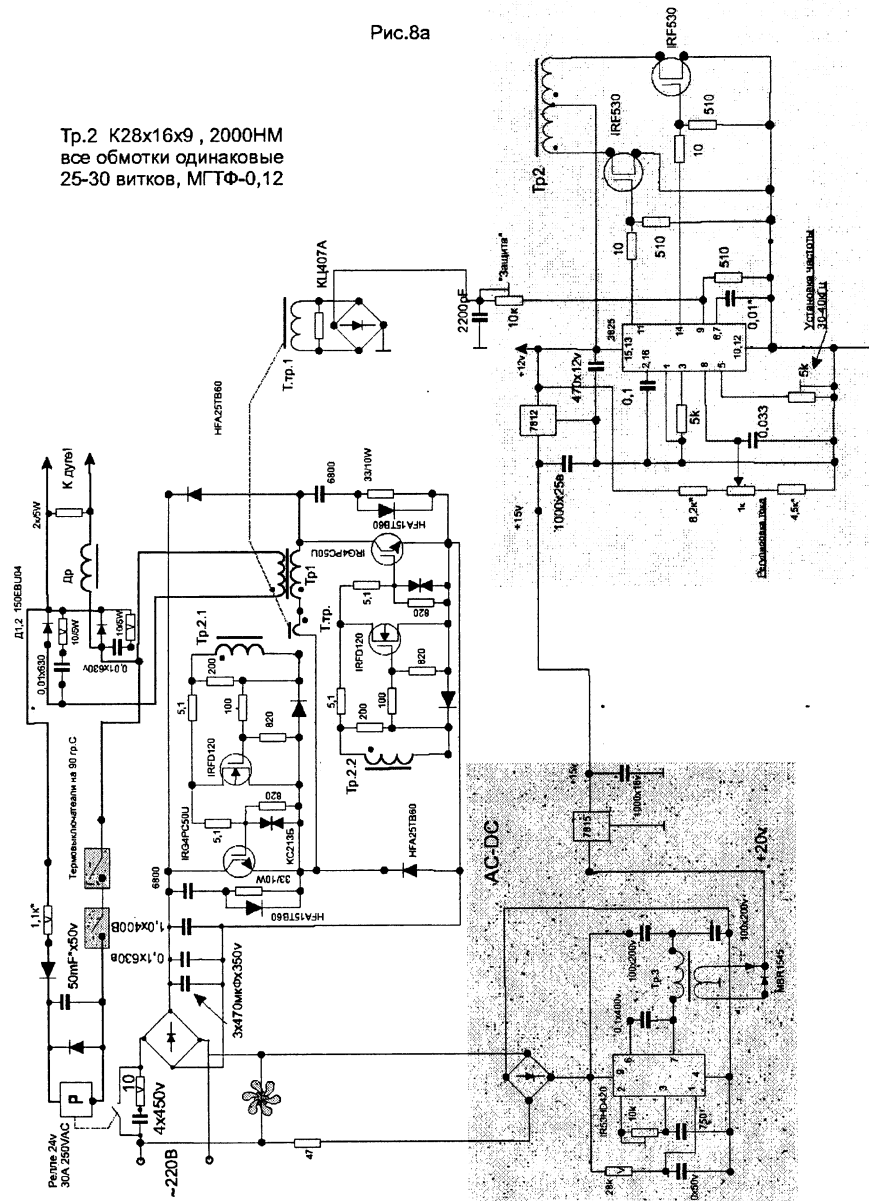


На Ш20х28 2000НМ 12-16 мм кв, многожильным проводом, 6-8 витков, зазор от 0,5мм, подобрать по устойчивому горению дуги. Тр.3 Б-22 2000НМ первичная обмотка 60 витков, провод ПЭВ-2, диаметром 0,3мм, вторичная 8+8 витков, проводом диаметром 0,55мм. Частота преобразования 100 - 120кГц,

Настройку начинаем с задающего генератора блока управления. Подаём питание на Ус3845, ус3825, 12-15В и смотрим форму сигналов в затворах силовых ключей.

Рис.8а

Тр.2 К28х16х9, 2000НМ  
все обмотки одинаковые  
25-30 витков, МГТФ-0,12



В обоих затворах, должны быть абсолютно одинаковые, чистые прямоугольники, осциллограммы показаны на Рис.9.

Если у Вас сигналы сильно отличаются от приведенных, обязательно добейтесь чтобы были похожи. Без этого подавать питание на силовые ключи нельзя! Если всё в порядке, переходим к следующему этапу настройки. Сначала проверяем регулировку длительности, вращая переменный резистор.

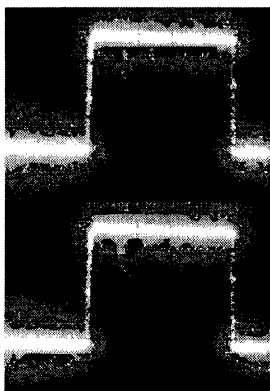


Рис.9



Рис.10

На экране должны наблюдать плавное изменение ширины управляющих импульсов, от 50% до 0 (только для uc3825). Не очень удобно, что Uc3845 не реагирует на регулировку, если на 3 ногу не подаётся сигнал ОС (трапеция с трансформатора тока, или можно соединить 3 ногу через делитель 1\100 с 6 ногой, при этом 6 нога соединяется с землёй через 5кОм и этот резистор зашунтирован ёмкостью 0,01 мкф, это примитивная линия задержки). Далее подключаем латр к выпрямителю силового блока и начинаем постепенно поднимать напряжение до 20-40В. В это время можно подключить осциллограф, например к коллектору-эмиттеру нижнего ключа (10В/клетка), будет похожая картинка, как на Рис.10. Затем, переключив осциллограф на вторичную обмотку, проверить правильность фазировок обмоток силового трансформатора. Идём дальше. Проверка ограничения тока. Осциллограф подключаем на нижний ключ.

Подать силовое напряжение 20-40В, задание на минимум, смотреть импульсы. Замкнуть выход на к.з. Длительность должна схлопнуться. Если нет - проверить также фазировку токового трансформатора. Продеть провод через кольцо в обратную сторону (для uc3845) Подключить на выход силовые провода с прищепками, чтобы можно было делать к.з. На выход шунт с прибором, чтобы смотреть ток. Осциллограф на нижнем ключе.

Регулировка тока на минимум. На выходе к.з. Плавно поднимать напряжение, смотреть импульс на ключе и величину тока, при увеличении напряжения. Если минимальный ток действительно минимальный и ЛАТР не совсем хилый, то можно и от немощного ЛАТРа дойти до полного питания. Всё делать медленно и внимательно.

Смотреть и слушать! Повышая напряжение, надо кое-где останавливаться и пробовать добавлять ток резистором, и тоже смотреть и слушать. В случае появления посторонних звуков в звуковом диапазоне, найти их причину. При срабатывании защиты по току возникает свистящий звук, это нормально. Ток к.з. может быть большим, если слишком большая постоянная времени RC на выв.3 - обычно оптимально 200-250нс, например 100 Ом x 2,2 нФ. Подать питание штатно. Дождаться когда сработает запускающее реле и к обратному диоду подключить осциллограф. Картинка должна быть, как на Рис.11.

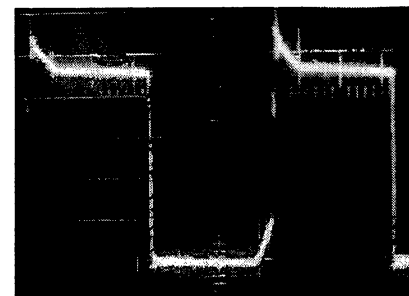


Рис.11.



Если всё прошло удачно и ничего не взорвалось, можно смело подключить на выход балластник на 0,5Ом, и уже на нём проводить дальнейшие эксперименты и измерения. Если на сопротивлении 0,25Ом удастся получить 26-30В, что вполне реально, при тех намоточных данных силового трансформатора, можно смело зажигать дугу и подбирая зазор в выходном дросселе добиваться её устойчивого горения. Ток КЗ можно подрегулировать подстроечником в RC цепочке на 3(9) ноге, обычно это от 30А до 50А сверху, для всех режимов. Этот запас необходим для облегчения поджига дуги, если нет вольтодобавки.

Нюансы конструкции и силового монтажа будут рассмотрены немного позже, они общие для всех типов инверторов. Ниже приведены осциллограммы на вторичной обмотке силового трансформатора, иллюстрирующие процесс регулировки тока.

#### 4. Полумостовой двухтактный инвертор с ШИМ, с дросселем рассеяния, резонансный.

Полумостовые преобразователи применяются в сварочных инверторах достаточно часто. Особенно их любят китайские производители.

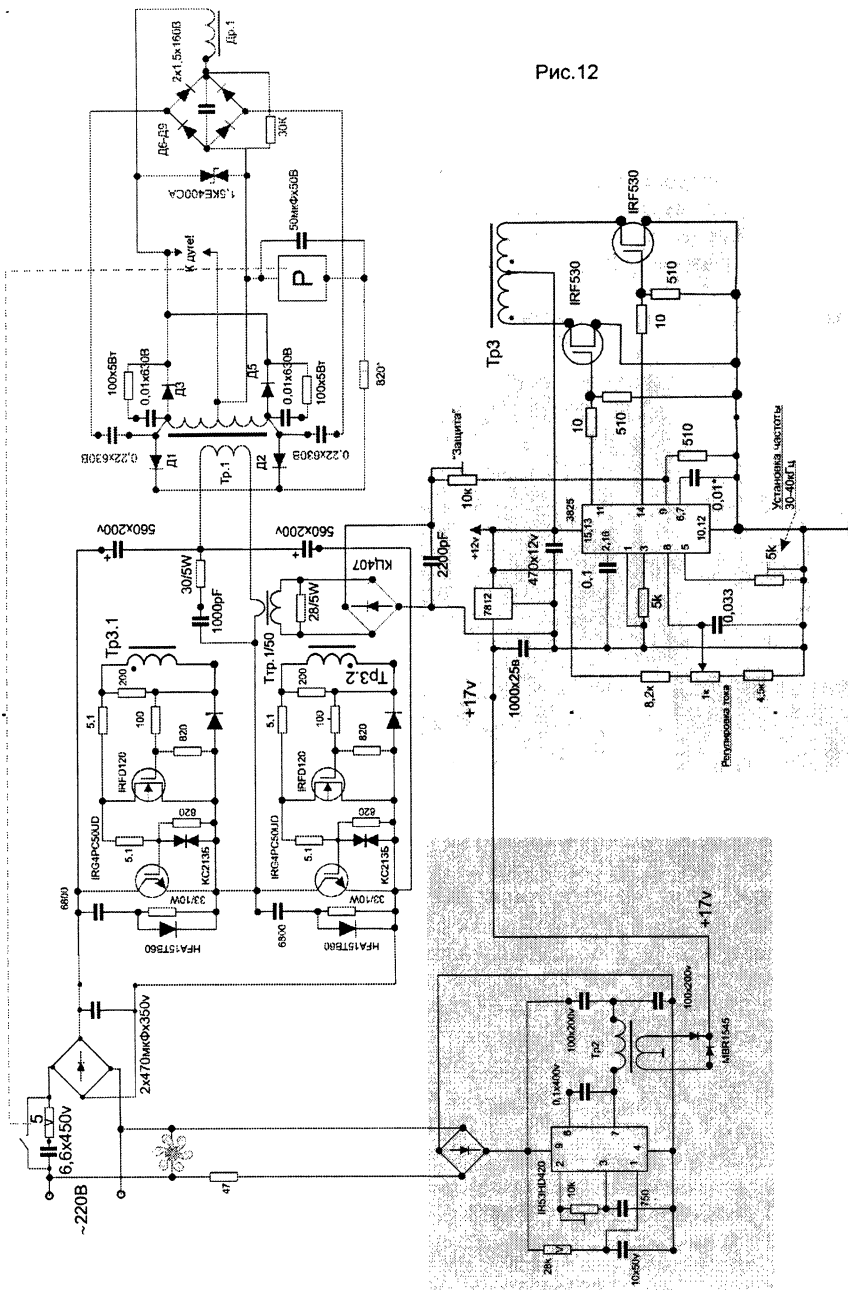


Рис.12

И хотя, для получения приличной мощности, они требуют двойных токов, современные IGBT модули позволяют строить сварочные аппараты с достойными характеристиками, именно на основе полумоста. Простота и минимум деталей, надёжность и высокий КПД. Всё это привлекает разработчиков сварочной техники. В этой главе объединены описания трёх типов полумостовых преобразователей, схемы их очень похожи, различия только в принципах управления выходным током, ограничения тока силовых ключей и передачи энергии в нагрузку. Полная принципиальная схема полумостового сварочного инвертора с ШИМ показана на Рис.12.

Сварочник построенный по такой схеме способен отдать в дугу до 130А, частота преобразования 30-40кГц, определяется применяемыми транзисторами.

Моточные данные приведены ниже.

Tr.1 E65, №87, ЭПКОС

I - 9-10 витков, ПЭТВ-2, диаметр 2,5мм;

II - 3+3 витка (6 с отводом от середины), ПЭТВ-2, диаметр 2,24 в четыре провода.

Tr.2 Б-22, 2000НМ1

I - 60 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3 мм;

II - 7+7 витков, ПЭВ -2, диаметр 0,56

Tr. 2xK20x12x6, 2000НМ1 одна обмотка 50 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3;

Dr.1 K28x16x9, 2000НМ1, 15 витков монтажного провода, 1мм кв.

Tr.3 K28x16x9, 2000НМ1

Все 4 обмотки одинаковые, мотаются одновременно, 30-35 витков, МГФФ-0,12.

Фазировка указана точками. Переходим к электрической схеме.

Задающий генератор собран на микросхеме UC3825, это один из лучших двухтактных драйверов, в нём есть всё, защита по току, по напряжению, по входу, по выходу. При нормальной работе его практически нельзя сжечь! Как видно из схемы ЗГ это классический двухтактный преобразователь, трансформатор которого управляет выходным каскадом. Настраивается ЗГ так, подаём питание и частотозадающим резистором настраиваем частоту 30-40к Гц, нагружаем выходную обмотку трансформатора Tr3 резистором 20-30Ом и смотрим форму сигнала, она должна быть такой как на рис.13.

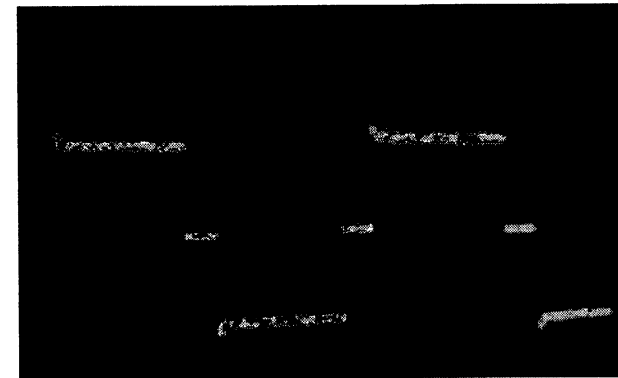


Рис.13



Мёртвое время или ступенька для IGBT транзисторов должно быть не менее 1,2мкс, если применяются MOSFET транзисторы, то ступенька может быть меньше, примерно 0,5мкс. Собственно ступеньку формирует частотоподающая емкость драйвера, и при деталях указанных на схеме, это около 2мкс.

Подключаем к трансформатору Тр.3 драйверы силовых ключей и естественно сами ключи. На затворах должны быть сигналы похожие на Рис.14, только в противофазе. При вращении резистора регулировки величины тока (на 8 ноге), длительность затворных импульсов должна меняться от 0 до max 50%(- dead time).

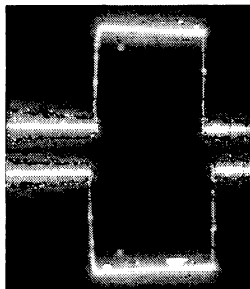


Рис.14

При подаче положительного напряжения на 9 ногу, в пределах 0-1,5В, происходит примерно тоже самое, но более резко. В нашей схеме ограничение максимального тока ключей происходит через 9 ногу, а плавная регулировка выходного тока через 8 ногу UC3825N. Методика настройки предельно проста, подаём напряжение на блок управления, а к силовому блоку подключаем ЛАТР.

Вместо силового трансформатора подключаем лампочку на 200Wx110V, и проверив наличие в затворах управляющих импульсов, начинаем постепенно поднимать напряжение приложенное к силовому блоку. Периодически останавливаясь и проверяя осциллографом, что у нас на лампочке. Если лампочка горит ровно и на экране осциллографа наблюдается картинка, похожая на Рис.13, пробуем регулировать ток. При этом лампочка должна плавно реагировать на поворот резистора, свечение должно меняться от 0 и до max! Если этого не происходит - разобраться почему. Возможно придётся подобрать резисторы вокруг регулятора, ведь именно от них зависит диапазон регулировки выходного тока! На 8 ноге напряжение должно изменяться от +3В до +4В, в это время происходит изменение длительности выходных импульсов от 0 до 50%. Следующим нашим действием, будет отключение лампочки, и подключение на её место силового трансформатора, вторичная обмотка должна быть нагружена лампочкой 100Wx36V. Всё повторяем с самого начала, постепенно ЛАТРОм поднимаем напряжение до 220V.

Всё должно работать аналогично. Если так и есть, смело подключаем силовые диоды, отключаем ЛАТР, он нам уже не поможет. Включаем напрямую в сеть 220V, без нагрузки, через секунду должно сработать запускающее реле, замкнуть запускающую RC цепочку и подать силовое напряжение на ключи.

Реле одновременно является и защитой от длительного режима КЗ. Если в момент включения аппарата его выход будет замкнут, реле не включится, и мощность потребляемая аппаратом не превысит 50Вт. И так будет до того момента, пока на выходе сохраняется режим КЗ.

Запускающая RC -цепочка ограничивает ток потребляемый от сети, на уровне 250mA в режиме полного КЗ. Примерно тоже происходит при залипании электрода, конденсатор включенный параллельно реле, определяет время задержки на отключение. Переходим к следующему этапу настройки, для этого нужно запастись реостатом на 5кV сопротивлением 1,0 Ом. Устанавливаем регулятор тока на max и подключаем балластник (реостат) на выход. Измеряем на нём напряжение, оно должно быть примерно 35-40В, медленно вращаем ручку регулятора тока в сторону уменьшения. Напряжение должно плавно уменьшаться. Следующее наше действие самое ответственное - настройка отсечки максимального тока ключей (защиты). Ставим подстроечный резистор "защита" в среднее положение и уменьшая сопротивление балластного реостата пытаемся найти точку срабатывания, в этот момент возможно появление попискивания в силовом трансформаторе. Делать наоборот, то есть подстроечником находить положение срабатывания нельзя категорически. Не соблюдение этого обычно приводит к выгоранию ключей!

Подстройку резистора защиты можно делать только при отключенной нагрузке! Ну, вот собственно и всё. Если на нагрузке 0,25 Ом удастся получить 26-28В, а на 0,15 Ом будет срабатывать защита, то аппарат будет чудесно варить, но только с удвоителем, или дросселем на выходе. Следующая схема - резонансный полумостовой сварочный инвертор с фазовой регулировкой выходного тока. Полная схема представлена на Рис.15. Такая схема позволяет получать в дуге ток, от 5 до 120А, этого вполне достаточно для нормальной работы электродами диаметром 1,6 - 3,0 мм, при напряжении в сети 210 - 240В.

Ниже представлены данные на трансформаторы и дроссели.

Тр.1 E65, №87, ЭПКОС

I - 9-10 витков, ПЭВ-2, диаметр 2,5мм;

II - 3+3 витка (6 с отводом от середины), ПЭВ-2, диаметр 2,24 в четыре провода.

Тр.2 Б-22, 2000НМ1

I - 60 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3 мм;

II - 7+7 витков, ПЭВ -2, диаметр 0,56

Тр. 2xK20x12x6, 2000НМ1 одна обмотка 50 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3;

Др.1 Ш20x28, 2000НМ1 12 витков, ПЭВ-2, диаметр 2,5 мм, зазор от 0,3 до 0,9мм, подбирается экспериментально.

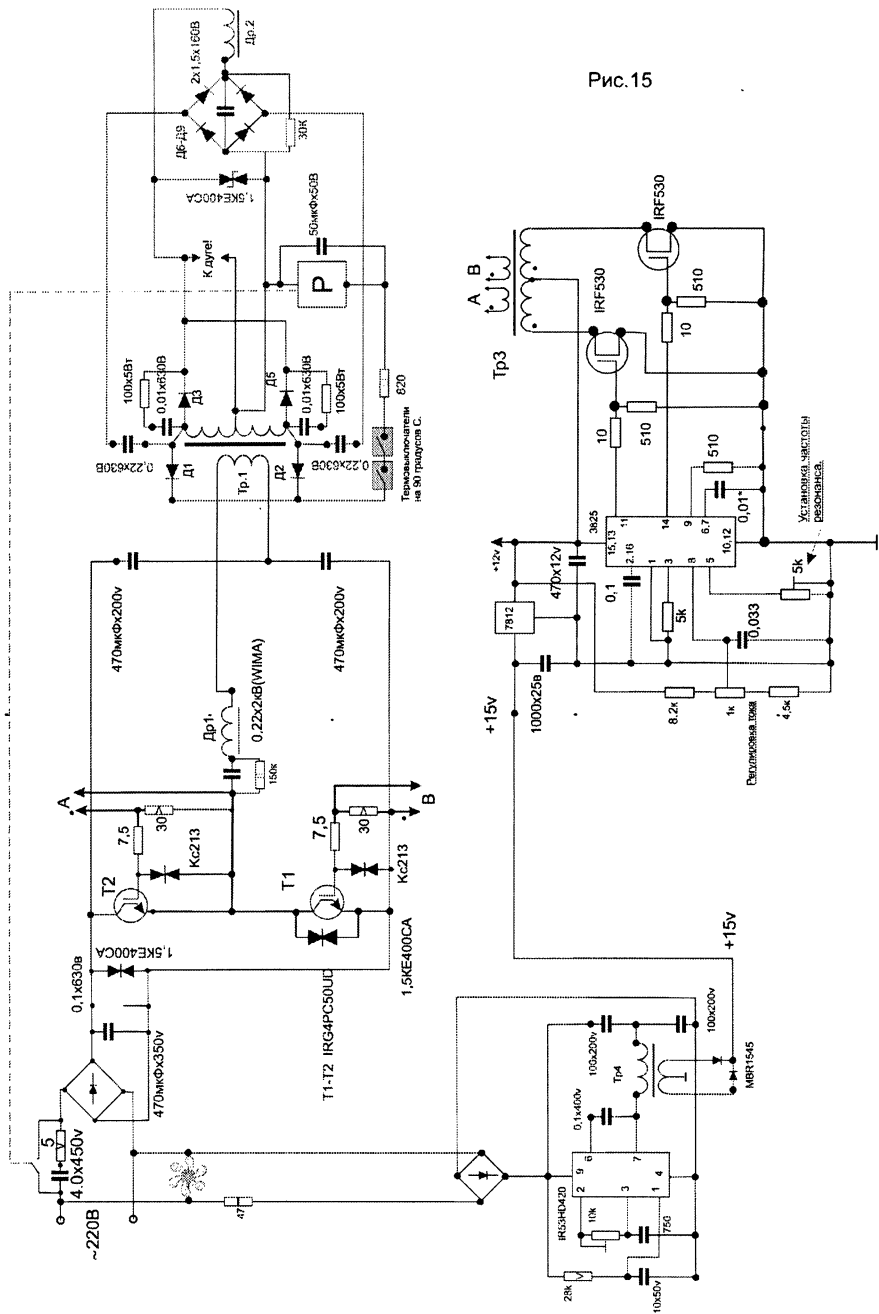
Др.2 K28x16x9, 2000НМ1, 15 витков монтажного провода, 1мм кв.

Тр.3 K28x16x9, 2000НМ1 Все 4 обмотки одинаковые, мотаются одновременно, 30-35 витков, МГТФ-0,12.

Фазировка указана точками. Как видите схема очень похожа на предыдущую, но конструкция силовой части значительно проще! Это объясняется тем, что вся схема работает в резонансе и для переключения транзисторов нужно значительно меньше энергии, чем в схеме с силовым переключением.

Переключить ключ в нуле напряжения или тока значительно легче, именно этим объясняется тот факт, что на схеме Вы не увидите драйверов для силовых ключей, нет необходимости и в RCD цепочках (снабберах) защиты, нет защиты от перегрузки по току, функцию ограничения тока выполняет резонансный дроссель и собственная индуктивность рассеяния силового трансформатора.

Процесс настройки тоже немного отличается от настройки инвертора с ШИМ, хотя начало совершенно одинаково, до момента подачи управляющих импульсов в затворы силовых транзисторов.



Поскольку драйверов нет, то и осциллограмма напряжения в затворах будет выглядеть несколько иначе, смотри Рис.16. Как видим, задний фронт имеет довольно плавный спад, это разряжается затвор ключа. Для предыдущей схемы такая форма разряда затворов, была бы смертельна на 100%! Резонансному преобразователю на это наплевать! Поэтому проверкой формы управляющих импульсов в затворах и ограничимся. Регулятором тока выставим максимальную длительность управляющих импульсов, если этого не сделать, дальнейшая настройка ничего не даст. Настроим задающий генератор на частоту 45кГц, вместо силового трансформатора, последовательно с резонансной RC цепочкой включим лампочку на 100Wx36V.

Вместо силовой сети подключаем ЛАТР, блок управления запитываем от отдельного источника, и начинаем медленно повышать напряжение на силовом блоке. Примерно при 40-50В если лампочка не горит, или горит не очень ярко, делаем остановку и изменяя частоту задающего генератора добиваемся максимальной яркости лампочки. Немагнитный зазор в резонансном дросселе должен быть при этом 0,4-0,5 мм, это примерно 4-6 слоёв бумажного малярного скотча. Если всё прошло гладко, меняем лампочку на 100Wx110V и продолжаем повышать напряжение до 220В, периодически подкручивая частоту, если резонанс будет уходить. Это была предварительная настройка.

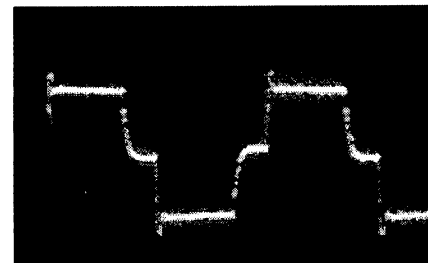


Рис.16

Отключаем лампочку и подключаем силовый трансформатор нагруженный лампочкой 100Wx 36V. Весь процесс повторяем сначала, постепенно ЛАТРОм поднимаем напряжение, а частотой подстраивая резонанс, до точки наиболее яркого горения лампы. Всё это необходимо проделать для выявления ляпов и ошибок монтажа, иначе, если подать сразу 220V, и что-то сгорит, никогда не поймёшь почему. Следующий этап, отключаем лампу и подключаем силовые диоды. ЛАТР тоже можно убрать, включаем напрямую в сеть. Через секунду должно сработать запускающее реле и на выходе появится напряжение 46-50В. Для начала надо подключить лампочку 100Wx36V и убедиться, что всё работает устойчиво, посторонних звуков нет. Свечение лампы ровное и регулятором тока плавно меняется от max до min.

Если всё именно так, меняем лампу на балластный реостат 1,0 Ом на 5 kW и продолжаем настройку. Кратковременно подключая нагрузку (1,0Ом) подстраиваем частоту до того момента, когда вольтметр покажет max напряжение на балластнике, и при вращении частотозадающего резистора в любую сторону, напряжение будет уменьшаться. Примерно это может быть 30-35кГц, при этом максимальное напряжение будет около 38В. Далее уменьшаем сопротивление нагрузки до 0,5 Ом, и повышая частоту находим максимум напряжения, затем всё повторяем для нагрузки, 0,25 Ом.

Все операции по настройке резонанса производить только при максимальной длительности управляющих импульсов! Конечным результатом настройки должно получиться 26-28В на нагрузке 0,25 Ом, и при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки напряжение должно понижаться. Таким образом, если резонанс будет настроен на нагрузке 0,2 - 0,25 Ом, то именно в этом месте и будет максимум мощности! Максимальный выходной ток полностью зависит от резонансного дросселя, вернее от немагнитного зазора в сердечнике. Чем толще зазор, тем больше ток и выше частота. Это следует помнить, и при монтаже закрепить резонансный дроссель так, чтобы его можно было снять, разобрать и подкорректировать в случае необходимости толщину зазора.

Рабочая толщина зазора может достигать 1 - 1,5мм, но начинать настройку лучше с 0,3- 0,5 мм. Такой зазор сразу ограничит максимальные токи через ключи, и в случае возникновения аварийной ситуации, не даст им сгореть.

Дальнейшее увеличение нагрузки, при неизменной частоте вызовет падение напряжения и снижение мощности. При КЗ ток может превышать ток дуги в 1,2 -1,5 раза, но напряжение на выходе упадёт до 2-3В, и соответственно мощность не будет выделяться.

Это неоспоримый плюс резонансного инвертора, естественное ограничение мощности. При такой настройке, аппарат не боится режимов КЗ, скорость ограничения тока на порядок выше, чем при самой быстрой параметрической защите. А применение удвоителя напряжения на выходе позволяет зажечь и поддерживать дугу при самых неблагоприятных условиях! На Рис.17-19 показаны осциллограммы напряжения в затворах ключей при изменении выходного тока в сторону уменьшения, при фазовой регулировке. И ещё один способ настройки резонанса, для продвинутых радиолюбителей.

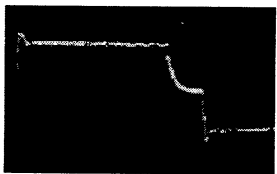


Рис.17

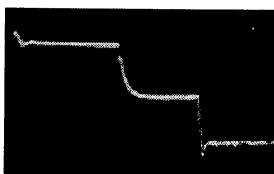


Рис.18

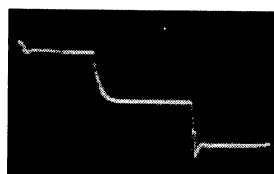


Рис.19

В разрыв первичной цепи включается токовый трансформатор. Например 50 витков на колечке К28, 2000НМ. Нагружаем аппарат на предельную нагрузку, например 25В и 150А, это примерно 0,17 Ом. Ширину импульса ставим на максимум, частоту заводимо выше резонансной, в нашем случае это примерно 45-50кГц. Подключаем через ЛАТР не более 40-60В. Естественно блок управления питается отдельно, осциллограф подключаем к токовому трансформатору. Картинка выглядит, как разорванная синусоида. Потихоньку опускаем частоту до того момента, когда синусоида склеится в непрерывную линию. Вот и всё! Практически тоже самое можно наблюдать подключившись осциллографом к резонансному конденсатору, или включив последовательно в первичную цепь резистор 0,1 Ом, и подключив осциллограф параллельно ему.

Третий тип полумоста с дросселем рассеяния, представляет собой гибрид между преобразователем с ШИМ и резонансным с частотным или фазовым регулированием.

Его схема ничем не отличается от схемы с ШИМ преобразователем, введена только RC цепочка последовательно с силовым трансформатором, как в резонансном. Но это не резонансная цепочка, а просто цепь ограничения максимального тока.

Конденсатор в этой цепочке является просто симметрирующим и его ёмкость равняется 22мкФх63В, тип К73-16В. Дроссель можно поставить точно такой, как в резонансном преобразователе, от величины его индуктивности зависит максимальная мощность преобразователя.

## 5. Мостовой двухтактный инвертор с ШИМ, с дросселем рассеяния, резонансный.

Эта глава полностью посвящена самым мощным преобразователям - мостовым. С точки зрения полного использования параметров транзисторов и оптимизации мощности, этот тип высокочастотного инвертора наиболее совершенный. Как уже писалось выше, при равных с полумостом токах через транзисторы, полный мост способен отдать в 2 раза большую мощность. Но, хватит теории! Переходим к настоящим сварочным инверторам. Первым номером у нас идёт полный мост с ШИМ ограничением максимального тока через транзисторы, и плавной регулировкой выходного тока, путём уменьшения длительности управляющих импульсов.

На Рис.20 показана полная электрическая схема сварочного инвертора на токи 5 - 200А. Напряжение XX равно 66В. При таком напряжении устойчиво горит большинство электродов.

Ниже приведены данные на трансформаторы и дроссель.

Тр.1 - 2хШ20х28, 2000НМ

I - 14 витков, ПЭТВ-2, диаметром 2,56мм. Индуктивность 2,5 -3мГ.

II - 3+3 витка, ПЭТВ-2, диаметром 2,24мм в четыре провода, (16мм кв)

Тр.2 - К28х16х9, 2000НМ

Все обмотки одинаковые, 30-35 витков, МГТФ-0,12.

Мотаются все одновременно.

Тр.3 - Б22, 2000НМ1

I - 60 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3мм

II - 7+7 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,5мм.

Ттр. К28х16х9, 2000НМ 50 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3мм. Др.1 Ш20х28, 2000НМ

Любым проводом16 - 20мм кв, 6-7 витков, зазор 3-5мм. Подбирается по устойчивому горению дуги. Ориентировочная индуктивность 10-50мкГ.

Диоды Д1-Д3 фирмы IR, 150ЕВU04. Запускающее реле Р, на 24В, 30А АС250В. Схема приведенная на Рис.20 достаточно сложная и требует большого опыта при изготовлении и настройке.

Если Вы чувствуете, что такого опыта у Вас нет, не стоит браться за самостоятельное её изготовление. Всё дело в том, что чем выше мощность преобразователя, тем более тщательным должен быть монтаж, компоновка, система охлаждения и тд. Но это всё лирика, перейдём к настройке.

Задающий генератор, как и в полумостовой схеме, собран на микросхеме UC3825, и настройка его ничем не отличается от настройки ЗГ для предыдущих конструкций. Это надёжная и простая схема, Поэтому просто устанавливаем частоту на выходе 35 - 40кГц, проверяем форму сигнала на выходных обмотках Тр.3 (нагруженных резисторами 56 Ом или лампочкой 5Wx12v).

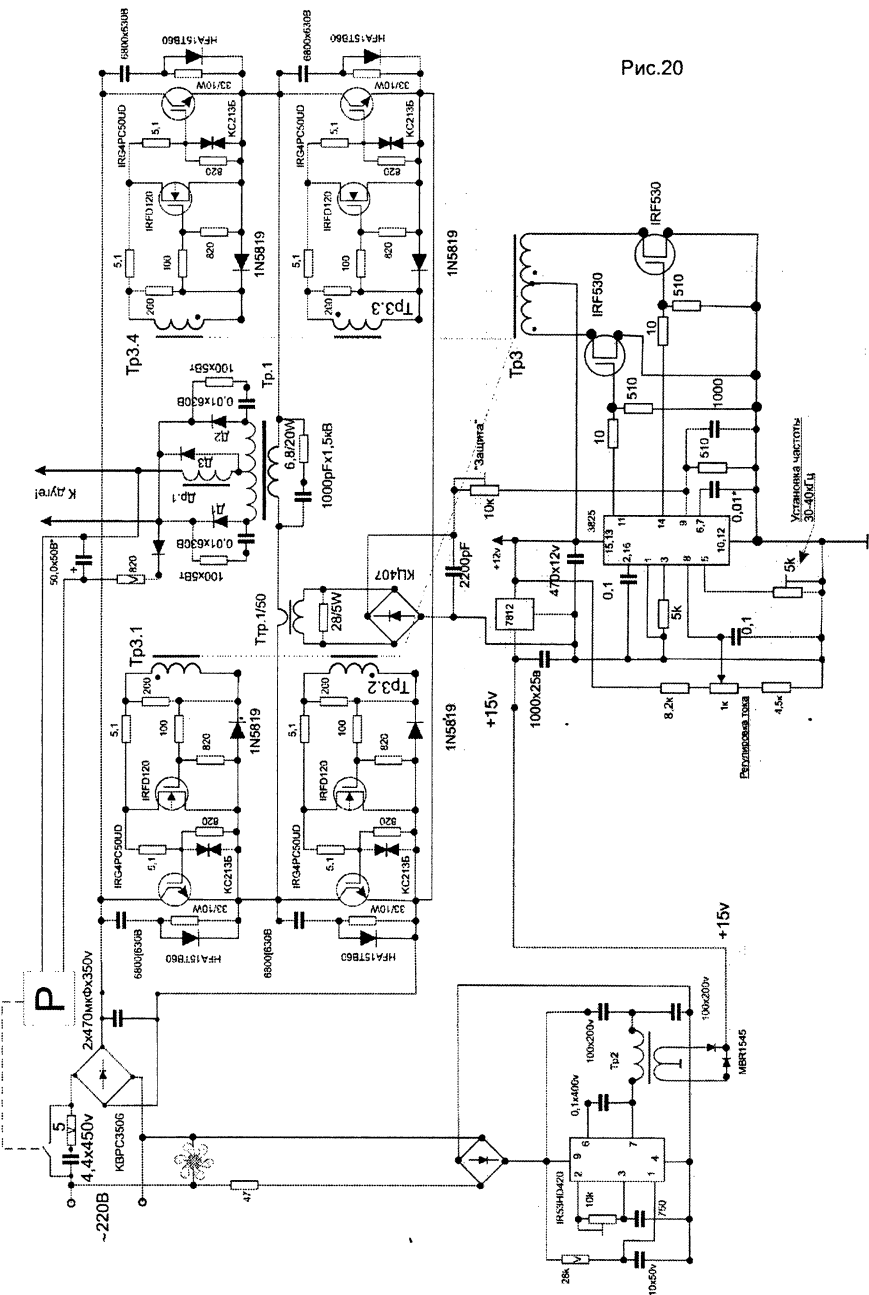


Рис.20

При вращении потенциометра “регулировка тока”, длительность импульсов должна изменяться от 0 до 50%. Для сварки не стоит делать регулировку длительности от 0, не включится силовое реле, минимальную ширину управляющего импульса необходимо экспериментально подобрать и зафиксировать на уровне 10-15%.

Следующий этап, соблюдая фазировку (транзисторы полного моста работают поддиагонали) подключить управляющий трансформатор к драйверам силовых ключей. Сначала к одной диагонали, вместо трансформатора включить лампочку на 12В, подать на мост питание 12-15В, добиться горения лампы. При 12 - 15В питания, лампа будет гореть в половину накала. Затем соблюдая фазы, подключить вторую диагональ. Если всё правильно, лампочка загорится в полный накал. Вращение потенциометра регулировки тока будет вызывать плавное изменение яркости горения лампы. В таком состоянии проверить форму сигналов в затворах силовых транзисторов. Форма должна быть похожа на Рис.14. Далее, проделать все то, что делали для полумоста с ШИМ. Ниже приведены полезные осциллограммы снятые в разных точках мостового инвертора с ШИМ.

На Рис.21 передний фронт управляющего импульса на затворах силовых ключей, на Рис.22 задний фронт, закрывания ключа. 0,3мкс/клетка, 2В/клетка.

Рис.23 форма напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора, XX. 15В/кл, 2мкс/кл. Рис.24 тоже под нагрузкой, ток 10А. Хорошо видны паузы между импульсами, частота 39кГц. Рис.25 ток 30А на балластник 0,25 Ом. 2мкс/кл, 15В/Кл. Рис.26 ток на 0,25 Ом, 2мкс/кл, 15В/кл.

Рис.21

Рис.22

Рис.23

Рис.24

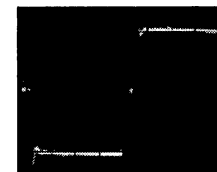
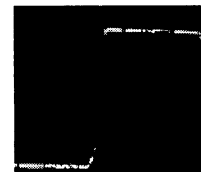
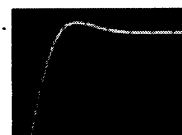


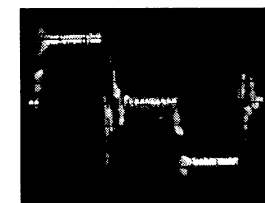
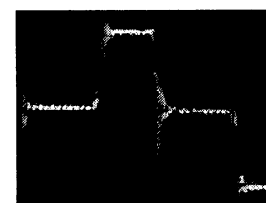
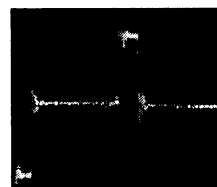
Рис.26а, ток 120А, вид напряжения на вторичной обмотке, 2мкс/кл, 15В/кл.

Как видим с ростом ширины управляющего импульса растёт выходной ток, что собственно и требовалось:

Рис.25

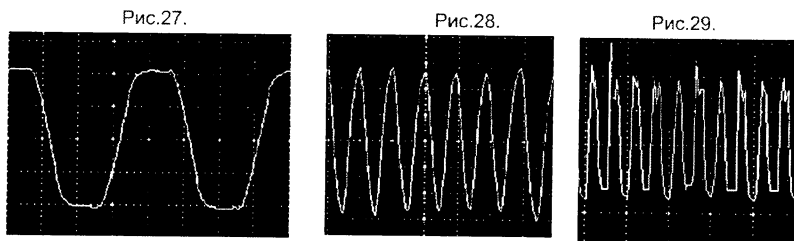
Рис.26

Рис.26а



Рассмотрим схему полного моста с дросселем рассеяния. Электрическая схема изображена на Рис.30.

Эта схема отличается от предыдущей только тем, что в силовую цепь введена RC цепочка, ограничивающая максимальный ток и формирующая падающую вольтамперную характеристику. Регулировка выходного тока - частотная. При частоте 10кГц - ток максимальный, его потолок ограничивается ШИМ системой защиты. Частота меняется до 50кГц, ток при этом плавно и совершенно линейно уменьшается до минимального. Это объясняется тем, что реактивное сопротивление дросселя Др.2 линейно увеличивается с ростом частоты.



Напряжение на первичной обмотке силового трансформатора, на разных частотах имеет форму, как на осциллограммах, показанных ниже. По такой схеме можно строить инверторы мощностью до 10 кВт. Настраивается такой преобразователь точно так, как и предыдущая конструкция. Отличие состоит только в том, что задающий генератор должен покрывать весь диапазон частот от 10кГц до 50кГц. Индуктивность дросселя подбирается в зависимости от необходимой мощности, от допустимых токов транзисторов, и от диапазона регулировки выходного тока. Это может быть и 70мкГ и 30мкГ. Чем меньше индуктивность дросселя, тем больше будет максимальный ток через силовую цепь, поэтому дроссель должен иметь конструкцию такую, как в резонансном полумосте, чтобы его можно было разобрать и добавив прокладку, изменить индуктивность. Напряжение на дросселе при разных токах нагрузки, как на Рис.31 и Рис.32. теперь перейдем к самому перспективному мостовому инвертору - резонансному. Полная схема приведена на Рис.33. Его схема намного проще, чем схемы всех предыдущих сварочных инверторов мостового типа, но от этого не менее привлекательна.

Именно работа в резонансном режиме позволила получить наивысший КПД преобразователя, снять перегрузки с транзисторов, убрать драйверы, исключить защиту по току и выбросить выходной дроссель, применив вместо него оригинальную схему удвоения выходного напряжения. Регулировка выходного тока осуществляется изменением длительности управляющих импульсов на резонансной частоте. Этот метод называется - фазовой регулировкой.

Ниже подробно расскажем, как работает резонансный мост. Транзисторы в резонансном мосте (как и в линейном) работают по диагонали, это выглядит так, одновременно открыты левый верхний Т4 и правый нижний Т2, в это время правый верхний Т3 и левый нижний Т1 закрыты. Или наоборот!

В работе резонансного моста можно выделить четыре фазы. Рассмотрим, что и как происходит если частота переключения транзисторов совпадает с резонансной частотой цепочки Др.1- Срез.- Тр.1. Допустим в первой фазе открываются транзисторы Т3, Т1, время нахождения их в открытом состоянии задаётся драйвером ЗГ, и при резонансной частоте 33кГц, составляет 14 мкс.

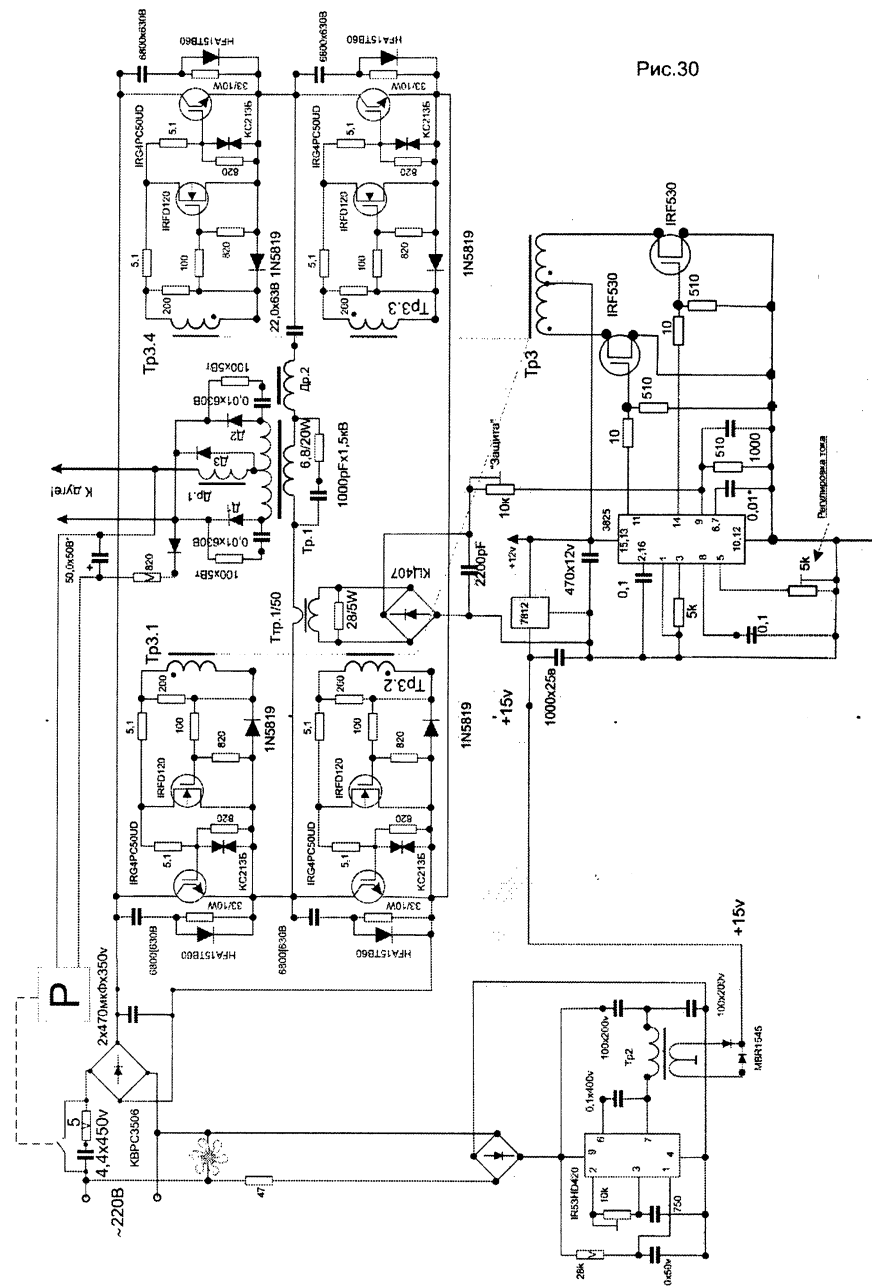


Рис.30

В это время ток протекает через Срез. - Др.1 - Тр.1. Ток в этой цепи сначала возрастает от нуля до максимального значения, а затем, по мере зарядки конденсатора Срез, уменьшается до нуля. Включенный последователь - но с конденсатором резонансный дроссель. Др.1 формирует синусоидальные фронты. Если последовательно с резонансной цепочкой включить резистор, и к нему подключить осциллограф можно увидеть форму тока, напоминающую полупериод синусоиды.

Во второй фазе, длящейся 2 мкс, затворы транзисторов Т1, Т3 соединены с землей, через резистор 56 Ом и обмотку импульсного трансформатора Тр.3, это так называемое "мёртвое время". За это время емкости затворов транзисторов Т1, Т3 полностью разряжаются, и транзисторы закрываются.

Как видно из выше сказанного, момент перехода из открытого состояния в закрытое, у транзисторов совпадает с нулем тока, ведь конденсатор Срез. уже зарядился и ток через него уже не течёт.

Наступает третья фаза - открываются транзисторы Т2,Т4. Время нахождения их в открытом состоянии 14 мкс, за это время конденсатор Срез, полностью перезарядается, образуя второй полупериод синусоиды. Напряжение до которого перезарядается Срез., зависит от сопротивления нагрузки во вторичной обмотке Тр.1, и чем сопротивление нагрузки меньше, тем больше напряжение на Срез.

При нагрузке 0,15 Ом, напряжение на резонансном конденсаторе может достигать значения 3кВ.

Четвёртая фаза начинается, как и вторая, в тот момент, когда коллекторный ток транзисторов Т2,Т4 уменьшается до нуля. Эта фаза также длится 2 мкс. Транзисторы закрываются. Далее всё повторяется.

Рис.31

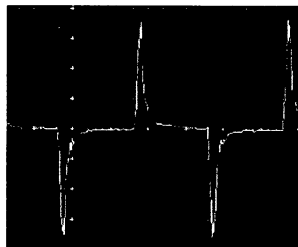
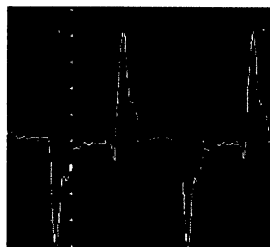


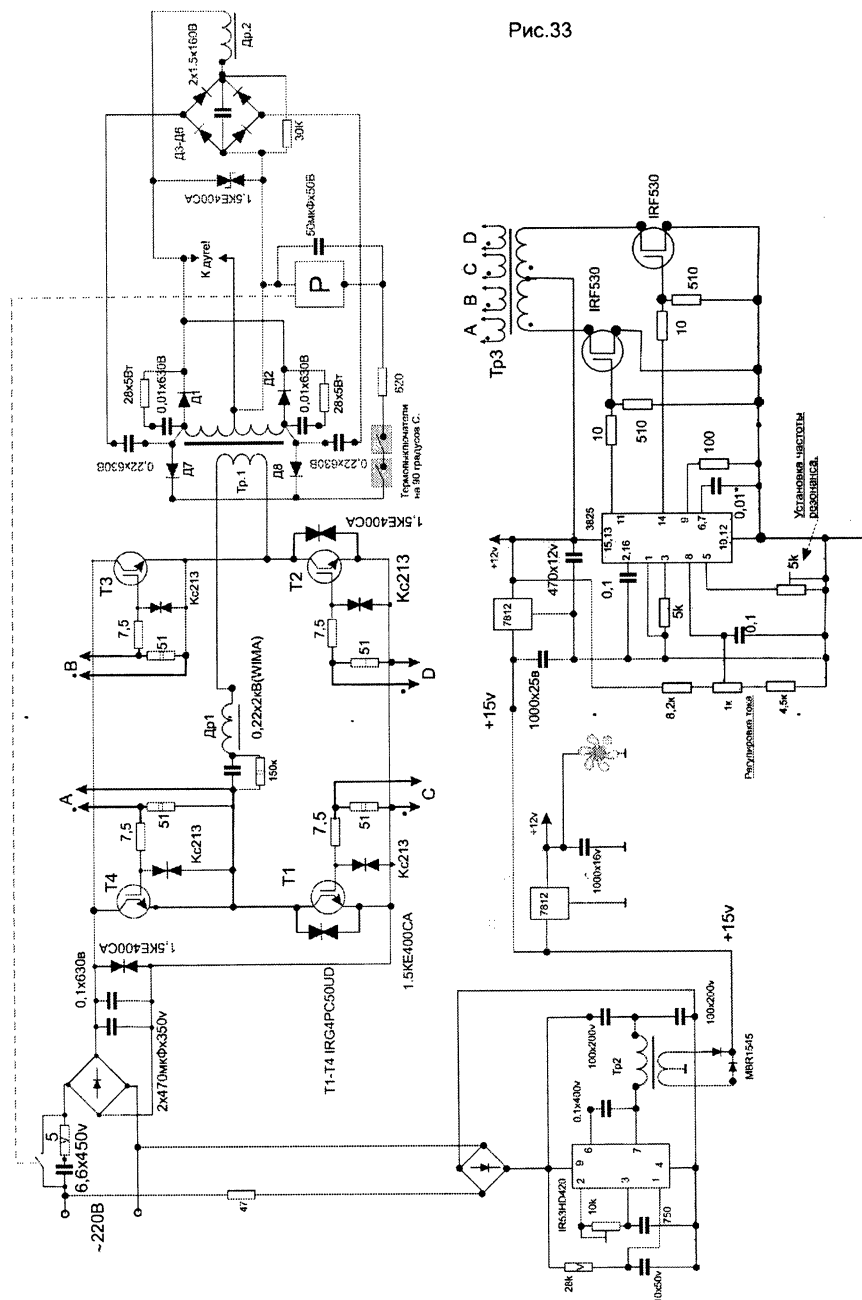
Рис.32



Вторая и четвёртая фазы работы, необходимы для того, чтобы транзисторы в плечах моста успели закрыться до того, как откроется следующая пара, если время второй и четвертой фаз, будет меньше времени необходимого для полного закрытия выбранных транзисторов, возникнет импульс сквозного тока, практически КЗ по высокому напряжению. При этом последствие легко предсказуемы, обычно выгорает полностью плечо верхний и нижний транзисторы, плюс силовой мостик.

Для транзисторов, применённых в этой схеме, "мертвое время" должно быть не менее 1,2 мкс, но учитывая разброс параметров, необходимо увеличить его до 2 мкс. Осциллограммы для резонансного моста точно такие, как и для резонансного полумоста, смотри Рис.16 - 19. Методика настройки точно такая же. Ниже приведены моточные данные для сварочного инвертора на токи 5-200А в дуге, с удвоителем напряжения ХХ и фазовой регулировкой.

Рис.33



Тр.1 E65, №87, ЭПКОС

I - 18 витков, ПЭТВ-2, диаметром 1,96мм, в один слой на стандартном каркасе;  
 II - 3+3 витка, ПЭТВ-2, диаметр 2,24мм, в четыре провода, два слоя, в два провода. Для облегчения температурного режима, межслойную изоляцию делать лентой из фторопласта или теплопроводной силиконовой резины, типа "НОМАКОН". Трансформатор желательнее ставить в обдув.

Тр.2 B22, 2000НМ

I - 60 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,3мм;  
 II - 7+7 витков, ПЭВ-2, диаметр 0,5мм.

Тр.3 K28x16x9, 2000НМ Все обмотки одинаковы, мотаются одновременно, 25-30 витков, МГТФ-0,12. Др.1 Ш20x28, 2000НМ 12 витков, ПЭТВ-2, диаметр 2,24, мотается с воздушным зазором между витками. Немагнитный зазор в сердечнике подбирается от 0,4 до 0,9мм по выходному току. Ориентировочная индуктивность дросселя от 100 до 50мкГ. Др.2 K28x16x9, 2000НМ 12-16 витков в один слой, монтажный провод в ПВХ сечением 1 мм кв. Силовые диоды Д1-Д2 150ЕВU04, диоды удвоителя Д3-Д6 любые быстрые на ток не менее 10А, и напряжение не менее 200В, например КД2997А; Д7-Д8 любые быстрые, например HER208. Резонансный конденсатор 0,22x2000В фирмы WIMA, набирается из четырёх 0,22x1000В включенных последовательно - параллельно. Можно применить К73-16В, 0,1x1600В 10 штук, два блока по 5 штук параллельно, блоки включают последовательно. Можно использовать конденсаторы типа К78-2, К78-18. Набирая необходимую ёмкость и рабочее напряжение не ниже 2000В! Если Вам 200А покажется маловато, то внеся не сложные изменения и практически ничего не меняя в самой схеме, можно легко получить 300А в дуге. Для этого достаточно применить транзисторы IRG4PS71UD вместо IRG4PC50UD, и намотать трансформатор на двух сложенных вместе E65 №87 фирмы ЭПКОС сердечниках. Количество витков первичной обмотки такого трансформатора будет равно 10, мотается проводом ПЭТВ2 диаметром 1,8мм сложенным вдвое. Вторичная обмотка должна содержать 1,5+1,5 витка сечением 25-32мм кв. Это примерно 7-8 проводов диаметром 2,24 марки ПЭТВ2. Намотать такой трансформатор не очень сложно.

Дроссель мотается на одном сердечнике типа E65 №87, и имеет 7-9 витков провода ПЭТВ2 диаметром 2,5мм. Зазор в дросселе подбирается экспериментально, ориентировочно 0,7-1,3мм. При таких моточных данных частота резонанса будет около 40кГц. Естественно нужно будет увеличить радиаторы под транзисторами и силовыми диодами примерно в два раза.

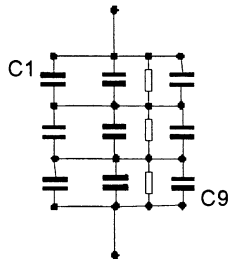


Рис.34

C1-C9 конденсаторы WIMA MKP1C 0,22x1000В.  
 Резисторы по 150кОмx2Вт.

Такой блок выдерживает без проблем до 9 кВт мощности, примерно 35А проходного тока в резонансной цепочке.

Резонансный конденсатор тоже придется набирать не из 4 штук 0,22x1000В WIMA, а из 9 конденсаторов 0,22x1000В WIMA MKP10. Схема включения конденсаторов представлена на рис. 34. При таких токах следует уделить особое внимание расположению задающего генератора и всех цепей управления. Микросхема UC3825 очень чувствительна к силовым помехам, поэтому необходимо ЗГ располагать как можно дальше от дросселя и силового трансформатора, провода идущие к резистору управления должны быть в экране, (-12В) не должен проходить вблизи силовых высоковольтных проводов, стабилизаторы 7812 нельзя ставить на один радиатор с силовыми транзисторами! Но есть ещё один путь повышения мощности, и для резонансных преобразователей он весьма перспективен. Это включение двух и более силовых блоков на одну нагрузку. Схема сварочного инвертора на токи более 350А приведена на Рис. 35.

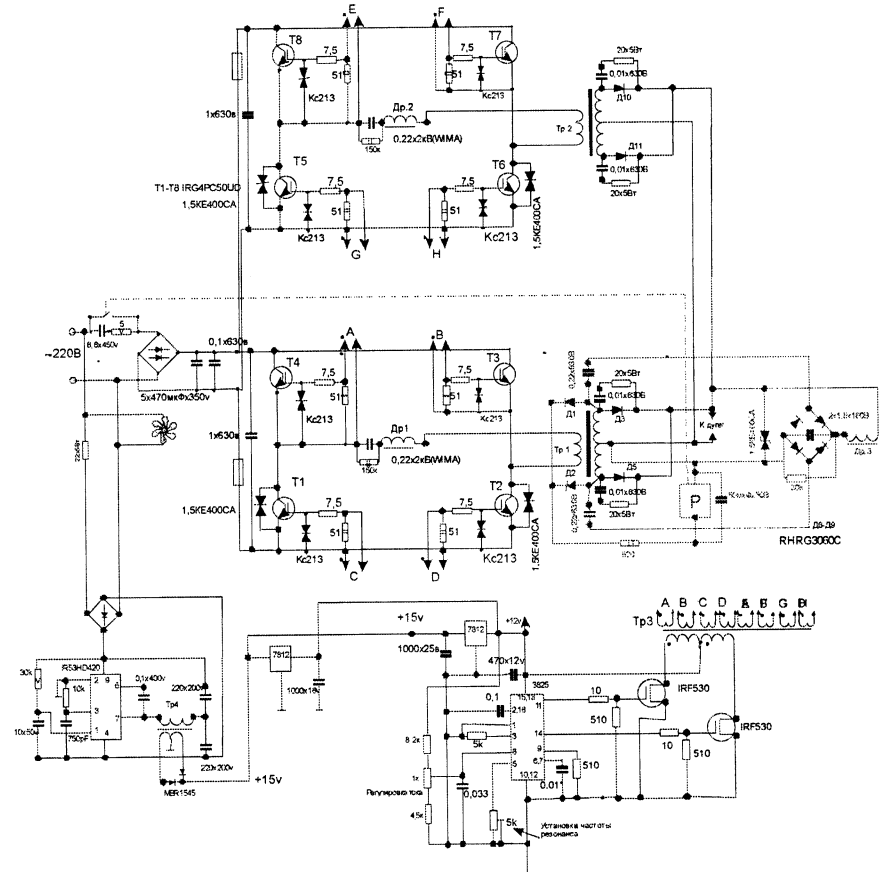


Рис.35

Выходные диоды включаются по два параллельно. Входных мостика тоже два. Задающий генератор можно оставить без изменений, блок питания 12В тоже.

Эта схема была опробована и показала замечательные результаты. Как видите, схема построена по принципу простого удвоения мощности. Для этого взяты два идентичных мостовых преобразователя управляемых одним задающим генератором.

Такое схемное решение оправдано только тем, что применены сердечники E65 №87 фирмы "ЭПКОС", по одному в каждом каскаде, и транзисторы IRG4PC50UD. При таком построении 350А источника, тепловой режим двух трансформаторов гораздо легче, чем тепловой режим одного трансформатора такой же мощности, и изготовить два однотипных трансформатора на E65 не представляет трудности. Тоже самое с резонансным дросселем и силовыми транзисторами. 8 транзисторов типа IRG4PC50UD будут стоить дешевле чем 4 транзистора IRG4PS71UD.

Конечно можно включить транзисторы и трансформаторы параллельно и обойтись конфигурацией одного моста, но два моста работают намного надёжнее на одну нагрузку, и способны отдать на 20% больше мощности, чем один с запаралеленными силовыми элементами!. Схема задающего генератора осталась точно такой, как и в предыдущих конструкциях, изменены только намоточные данные трансформатора Тр.3, и увеличен размер ферритового колечка с K28 на K32.

Выходной ток регулируется изменением длительности управляющих импульсов. Пришлось увеличить мощность 12В блока питания в два раза, для этого заменили чашку B22 на B28 и включили параллельно два стабилизатора типа 7812. Входные диодные 35А мостики пришлось тоже соединить параллельно. Запускающее реле лучше взять на 50А, но можно поставить и два по 30А, входные ёмкости 5 штук по 470мкФх350В, но можно обойтись и 4х330х400В.

Ниже приведены точные данные на трансформаторы и дроссели: Тр.1, Тр.2 - первичная обмотка 16-17 витков ПЭТВ2 - диаметр 2,0мм, вторичная обмотка 2,5+2,5 витка (5 витков с отводом от середины) ПЭТВ2, диаметр 2,24мм в четыре провода, общее сечение 16мм кв. Сердечник ЭПКОС E65 №87. Др.1, Др.2 провод ПЭТВ2, диаметр 2,24, 10 витков. Сердечник Ш20х28 2000НМ.

Зазор 0,6-0,8мм подбирается при настройке. Др.3 15 витков монтажного провода 1мм кв. на K28 2000НМ1. Тр.4 Количество витков можно не менять, увеличить только диаметр провода вторичной обмотки до 0,8 мм.

Настраивается такой аппарат точно так, как и одиночный мост. Только по очереди. Сначала один при отключенном втором, потом отключаем первый и настраиваем второй. При одинаковых трансформаторах и дросселях частота резонанса будет примерно одинакова у обоих. Если расхождение резонансных частот более 1кГц то нужно подкорректировать прокладками индуктивность дросселя. Допустимый разброс частот 1-2кГц.

## 6. Выбор силовых транзисторов

Силовые транзисторы - это сердце сварочного инвертора! От правильного выбора силовых транзисторов зависит надёжность работы всего аппарата.

Технический прогресс не стоит на месте, на рынке появляется множество новых полупроводниковых приборов, и разобраться в этом разнообразии довольно сложно.

Первое, с чего нужно начинать, это приблизительное определение мощности будущего преобразователя.

Если мы хотим получить в дуге 200 ампер при напряжении 24 вольта, то перемножив эти величины мы получим полезную мощность которую наш инвертор обязан отдать и при этом не сгореть. 24 вольта это среднее напряжение горения электрической дуги длиной 6 - 7мм, в действительности длина дуги всё время меняется, и соответственно меняется напряжение на ней, меняется также и ток. Но для нашего расчёта это не очень важно! Так вот перемножив эти величины получаем 4800 Вт, ориентировочно прикинув КПД преобразователя 85%, можно получить мощность которую должны перекачивать через себя транзисторы, это примерно 5647 Вт.

Зная общую мощность можно подсчитать ток, который должны будут коммутировать эти транзисторы. Если мы делаем аппарат для работы от сети 220 вольт, то просто разделив общую мощность на напряжение сети, можно получить ток, который аппарат будет потреблять от сети. Это приблизительно 25 ампер! С величиной тока вроде разобрались, но это не должен быть максимальный ток выбранных нами транзисторов! Сейчас в справочных данных многих фирм приводится два параметра максимального тока, первый при 20 градусах Цельсия, а второй при 100! Так вот при больших токах протекающих через транзистор, на нём выделяется тепло, но скорость его отвода радиатором не достаточно высока и кристалл может нагреться до критической температуры, а чем сильнее он будет нагреваться, тем меньше будет его максимально допустимый ток, и в конечном итоге это может привести к разрушению силового ключа. Обычно такое разрушение выглядит как маленький взрыв, в отличии от пробоя по напряжению, когда транзистор просто тихо сгорает.

Отсюда делаем вывод, для рабочего тока величиной 25 ампер необходимо выбирать такие транзисторы у которых рабочий ток будет не ниже 25 ампер при 100 градусах Цельсия! Это сразу сужает район наших поисков до нескольких десятков доступных силовых транзисторов.

При выборе ключей не стоит пользоваться максимально допустимыми параметрами, и параметрами для импульсных токов. Лучше пускай будет запас, чем авария в самый неподходящий момент. Поэтому смотрим только на максимальные значения постоянных величин, токов и напряжений! Естественно определившись с током нельзя забывать и о рабочем напряжении, во всех приведенных схемах, на транзисторах напряжение не превышает напряжение питания, или проще говоря не может быть больше 310 вольт, при питании от сети 220 вольт. Исходя из этого выбираем транзисторы с допустимым напряжением не ниже 400 вольт. Многие могут сказать, что мы поставим сразу на 1200, это мол будет надёжнее, но это не совсем так, транзисторы одного вида, но на разные напряжения могут очень сильно отличаться!

пример: IGBT транзисторы фирмы IR типа IRG4PC50UD - 600В - 55А, а такие же транзисторы на 1200 вольт IRG4PH50UD - 1200В - 45А, и это ещё не все отличия, при равных токах на этих транзисторах различное падение напряжения, на первом 1,65В, а на втором 2,75В! А при токах в 25 ампер это лишние ватты потерь, мало того, это мощность которая выделяется в виде тепла, её необходимо отвести, значит нужно увеличивать радиаторы почти в два раза! А это дополнительный не только вес, но и объём! И всё это необходимо помнить при выборе силовых транзисторов, но и это ещё только первый прикид! Следующий этап, это подбор транзисторов по рабочей частоте, в нашем случае параметры транзисторов должны сохраняться как минимум до частоты 100 кГц!



Для “жёсткого” переключения на частоте 30кГц, необходим запас по частоте не менее чем в три раза! Для резонансных преобразователей наоборот, можно пользоваться не слишком быстрыми транзисторами. Дело в том, что процесс переключения на резонансной частоте не требует таких затрат энергии, как при “силовом” переключении, и транзисторы замечательно работают на частотах в 4-5 раз выше, чем предельно допустимые! Фирма IR обычно даёт значения граничных частот и для “силового” и для резонансного режимов. Вот собственно всё, что нужно знать при выборе транзисторов. Сейчас самые доступные и по цене и по наличию в продаже это транзисторы фирмы IR. В основном это IGBT, но есть и хорошие полевые транзисторы с допустимым напряжением 500 вольт.

Они хорошо работают в подобных схемах, но не очень удобны в крепеже, нет отверстия. В корпусе. для нормальной работы IGBT транзисторов необходима пауза между закрытием и открытием, чтобы завершились все процессы внутри транзистора. Это не менее 1,2 микросекунды для IGBT, и для MOSFET транзисторов, это время не может быть менее 0,5 микросекунды! Вот все требования к транзисторам, и если все они будут выполнены, то Вы получите надёжный сварочный аппарат! Исходя из всего выше изложенного - лучший выбор это транзисторы фирмы IR типа IRG4PC50UD, IRG4PH50UD, полевые транзисторы IRFPS37N50A, IRFPS40N50, IRFPS43N50K. Эти транзисторы были опробованы и показали свою надёжность и долговечность при работе в мощных сварочных инверторах. Для маломощных преобразователей, мощность которых не превышает 2,5 кВт можно смело использовать IRFP460.

## 7. Конструктивные хитрости и нюансы изготовления ответственных узлов.

В этой главе отметим главные моменты о которых нужно помнить при конструировании мощного ШИМ или резонансного сварочного инвертора:

а) для преобразователя с ШИМ всегда добиваться идеальных управляющих сигналов приходящих в затворы силовых ключей, фронт спада управляющего импульса должен быть не более 200нсек, это главная хитрость! Реакция ШИМ должна быть только на сигнал поступающий с датчика тока, никакая другая реакция категорически не допустима, это вторая главная хитрость, и третья, самая главная хитрость - “мёртвое время” не менее 1,5мкс!:

б) для резонансного преобразователя реакция ШИМ недопустима вообще, для этого необходимо стабилизированное напряжение задающего генератора, никаких изменяющихся напряжений на входы усилителя “ошибки”(1,3), минимальное время “плавного запуска” задаётся ёмкостью на (8), блокировку микросхемы (9) производить только резким перепадом напряжения, лучше всего логическим из 0 в +5В с крутым фронтом нарастания, включение таким же логическим спадом от +5В в 0;

в) в затворах силовых транзисторов обязательно ставить двуханодные стабилитроны типа КС213;

г) управляющий трансформатор размещать в непосредственной близости от силовых транзисторов, провода идущие к затворам скручивать парами;

д) при разводке платы силового моста, помнить, что по дорожкам будут протекать значительные токи (до 25А), поэтому шину (-) и шину (+), а также шины подключения резонансной цепи, необходимо сделать как

можно шире, а медь залудить;

е) все силовые цепи должны иметь надёжные соединения, лучше всего их пропаять, плохой контакт, при токах больше 100А, может привести к расплавлению и возгоранию внутренних частей аппарата;

ё) провод подключения к сети должен иметь достаточное сечение 1,5 - 2,5 мм кв;

ж) на входе обязательно ставить предохранитель на 25А, можно поставить автомат;

з) все высоковольтные цепи должны быть надёжно изолированы от корпуса и выхода;

и) резонансный дроссель не стягивать металлической скобой, и не накрывать сплошным металлическим кожухом;

к) необходимо помнить, что на силовых элементах схемы выделяется значительное количество тепла, это необходимо учитывать при размещении деталей в корпусе, необходимо предусмотреть систему вентиляции;

л) параллельно выходным силовым диодам обязательно ставить защитные RC - цепочки, они защищают выходные диоды от пробоя по напряжению;

### Конструкция силового трансформатора.

### Конструкция силового трансформатора.

2хШ20х28 2000НМ или один Е65, №87, ЭПКОС

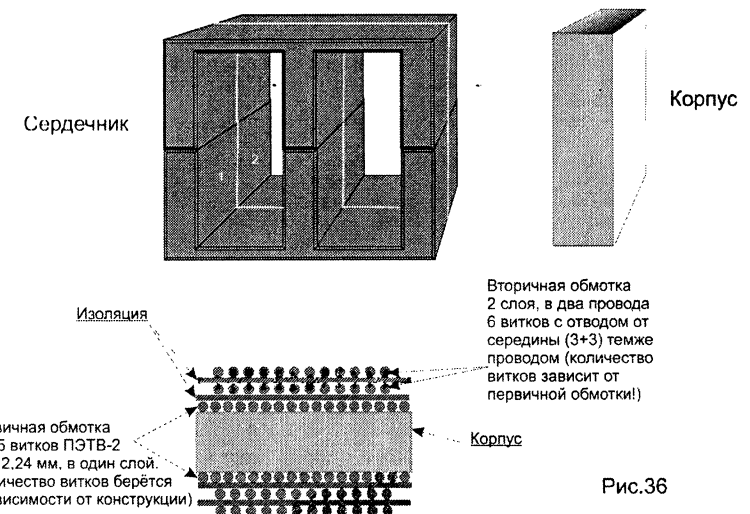


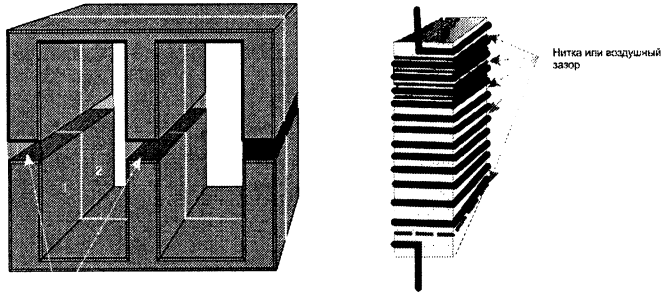
Рис.36

м) никогда не ставить в качестве резонансного конденсатора всякий мусор, это может привести к весьма плачевным результатам, только те типы которые обозначены на схеме, это К73-16В (0,1х1600В) или WIMA МКР10 (0,22х1000В), К78-2, К78-18 (0,15х1000В) включив их последовательно - параллельно,

н) блок управления на UC 3825 не должен находиться рядом с резонансным дросселем и силовым трансформатором. Строгое соблюдение всех выше перечисленных пунктов обеспечит 100% успех и Вашу безопасность.

Необходимо всегда помнить - силовая электроника не прощает ошибок! Конструкция силового трансформатора, выходного и резонансного дросселей, показана на Рис.36 и Рис.37. Для получения оптимальных параметров, первичная обмотка всегда мотается в один слой! Транзисторы моста крепятся на один радиатор через теплопроводные прокладки типа "НОМАКОН", на этот же радиатор можно поставить стабилизаторы 12В, если они в пластмассе и выходные токи не превышают 150А! На другой радиатор крепятся силовые диоды и через прокладку, диоды удвоителя.

### Конструкция дросселя Др.1 и др.2



Прокладки из картона, 3 шт. Для Др.1 0,1 - 0,8 мм (подбирается при настройке) для Др.2 - 3 мм.  
 Сердечник 2xШ16x20 2000НМ  
 Каркас катушки склеивается из тонкого стеклотекстолита, одевается на деревянную оправку, и мотается необходимое количество витков. Др.1 - 12 витков, провод ПЭТВ-2, диаметр 2,24 мм, мотается с воздушным междувитковым зазором, толщина зазора 0,3 - 0,5 мм. Можно использовать толстую, хлопчатобумажную нитку, аккуратно укладывая её между витками провода, смотри рисунок.  
 Др.2 - 6,5 витков мотается в четыре провода, марка ПЭТВ -2, диаметр 2,24 мм, общее сечение 16 кв., мотается вплотную, в два слоя. Витки необходимо скрепить, можно эпоксидной смолой.  
 2Ш16x20 можно заменить одним сердечником Ш20x28. Количество витков при такой замене можно не менять!

Рис.37

Тело этого радиатора можно использовать как мощный выход плюсовой клеммы. Для лучшего обдува радиаторы ставятся рёбрами друг к другу, вентилятор продувает всю эту решётку. Радиаторы в целях безопасности рекомендуется изолировать от корпуса и друг от друга.

## 8. Полезные устройства и схемы:

### “горячий старт”, “антипригар”, “мягкий поджиг”.

Ниже приведены схемы температурной защиты рис.38, горячего старта и стабилизатора горения дуги рис.39, хотя в качестве термозащиты можно приклеить на диоды и в обмотку силового трансформатора термовыключатели на 80 – 100С, соединить их все последовательно с обмоткой запускающего реле.

При срабатывании любого выключателя, силовая цепь размыкается, ток проходит только через ограничительную RC цепочку. В таком режиме дугу зажечь нельзя, потребляемая мощность даже в режиме полного КЗ, не превышает 70W.

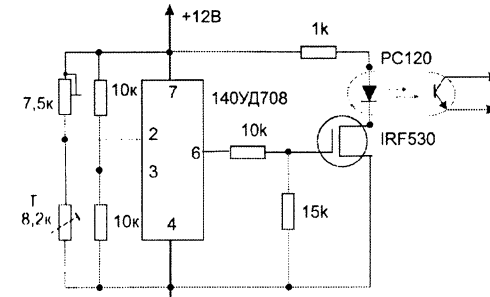


Рис.38

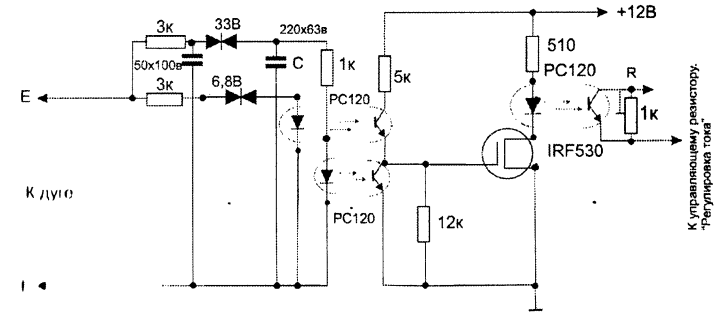
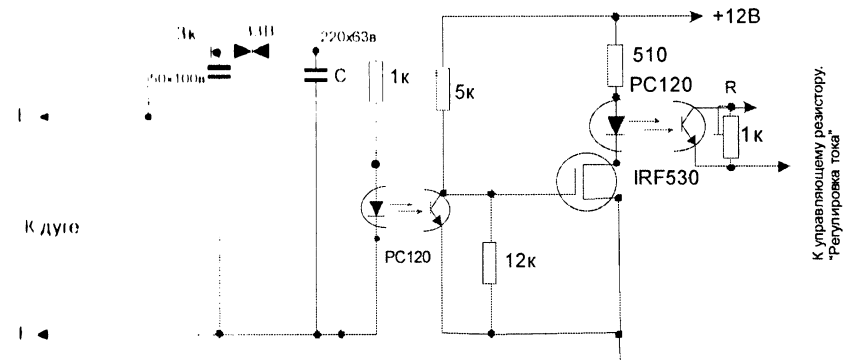
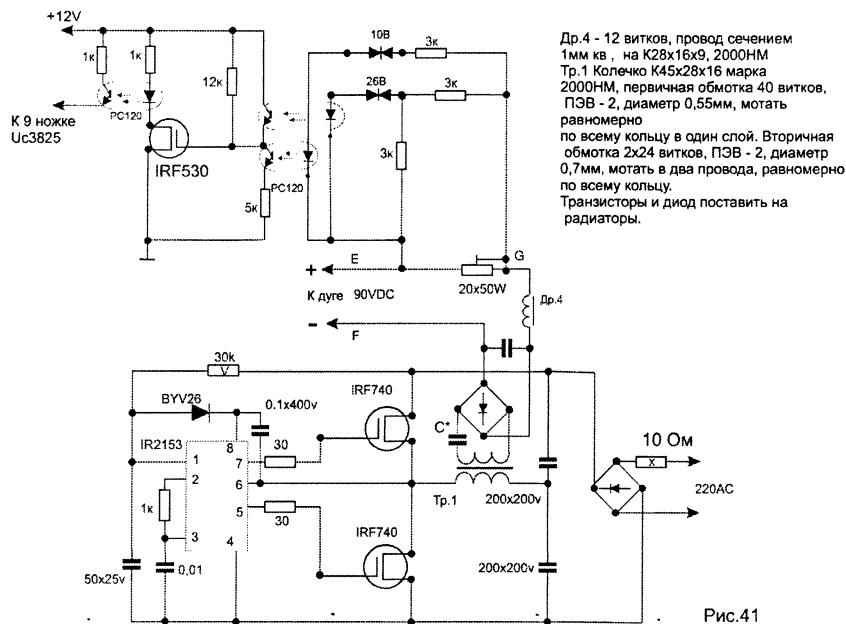


Рис.39

Рис.40



Это классическая схема “горячего старта” и “антипригара”, работает так - “меряет” напряжение на выходе и включается только в момент, когда горит дуга, то есть в промежутке 10 -28В, в этот момент в дугу подается ток, который.



Вы установили регулятором, в остальное время, в момент поджига или когда срывается большая капля расплавленного металла и пытается приварить электрод, ток автоматически увеличивается, либо до максимального, либо до заранее выбранного в процессе проектирования.

Обычно сверху дают 50% превышение, устанавливаемое резистором R, включённым параллельно с оптроном.

Время, на которое включается повышенный ток, задаётся ёмкостью конденсатора С.

Такая схема весьма эффективна если в сварочном инверторе нет вольтодобавки и напряжение ХХ не превышает 50В. Система “антипригар” стабилизирует дугу на малых токах, и не даёт залипать электроду.

На Рис.40 приведена схема одного “горячего старта”. Следующая схема будет весьма полезна для работы в режиме TIG, или в режиме аргоно - дуговой сварки. Это “мягкий поджиг”.

Полная схема показана на Рис.41. Как Вы уже догадались, это тоже инвертор, только маломощный. Очень удобен при работе на малых токах. Не зажечь дугу практически невозможно, просто ставишь электрод на металл, и постепенно начинаешь отводить, возникает малоамперная дуга, она не может приварить электрод, не хватает мощности, но горит и тянется отлично, зажигается как спичка, очень красиво!

Ну а когда загорелась эта дуга, параллельно подключается силовая, если вдруг электрод залип, то мгновенно отключается силовой ток, остаётся только ток поджига.

## 9. Параметры ферритов

Марка феррита	Fкр МГц	Вмах, Тл, при Hмах, А/м				$\mu_i^2$	Вr,Тл
		40	80	240	800		

### Ферриты общего применения

1000НН	0,4	0,095	0,167	0,226	0,270	169	0,15
2000НН	0,1	0,154	0,200	0,236	0,250	796	0,12
1000НМ	0,6	0,206	0,290	0,340	0,370	1790	0,11
2000НМ	0,5	0,179	0,287	0,366	0,394	1562	0,13
3000НМ	0,1	0,250	0,320	0,360	0,370	1989	0,12

### Термостабильные ферриты

1000НМ3	1,8	0,1	0,200	0,290	0,334	995	0,10
1500НМ1	0,6	0,146	0,240	0,320	0,350	1393	0,10
1500НМ3	1,5	0,148	0,259	0,350	0,380	1691	0,08
2000НМ1	0,5	0,165	0,244	0,312	0,340	1233	0,12

### Высокопроницаемые ферриты

4000НМ	0,1	0,260	0,320	0,366	0,37	1890	0,13
6000НМ	0,05	0,270	0,308	0,345	0,35	1970	0,11
10000НМ	0,05	0,310	0,330	0,350	0,35	2188	0,11

### Ферриты для телевизионной техники

2500НМС1	0,4	-	-	-	0,45	-	0,1
3000НМС	0,36	-	-	-	0,45	-	0,1

И пока не загорится дуга, силовой ток не включается! Советую поставить, дуга будет при любых условиях, силовой блок не перегружается и всегда работает в оптимальном режиме, токи КЗ практически исключаются!

Напряжение XX 80-90В, ток дуги не более 5А. Система управления силовым блоком построена на оптронах и похожа на схему "горячего старта".

Работает так - меряет напряжение на выходном резисторе системы поджига, и даёт сигнал на запуск силового блока только в диапазоне напряжений 55 - 25V на ограничительном резисторе, то есть только в тот момент когда горит дуга!

Схема абсолютно автономная, но при несложной доработке, её можно использовать одновременно как блок питания (12V) для схемы управления, мощность этого преобразователя не более 250Вт.

На транзисторы и диоды необходимо поставить радиаторы. Выходной дроссель в силовом блоке, при подключении "МП", можно вообще исключить.

Конденсатор С\* ограничивает ток КЗ, подбирается при настройке, его ёмкость зависит от частоты преобразователя и может быть от 0,15 до 0,5 мкФ на 160В, типа К78-2, или аналогичный. Ток КЗ не более 10А, рабочий 4 - 5А, подбираем по горению дуги. Приведенные выше таблицы параметров отечественных ферритов помогут в выборе достойного сердечника желателно применять Е65, №87, "Эпкос". Этот сердечник по параметрам близок к отечественному Ш20х28, 2500НМС1, но по потерям немного лучше, и сделан гораздо аккуратнее.

Неплохие результаты получаются с сердечниками 2000НМ, если для трансформатора брать 2Ш20х28. Такой трансформатор легко может отдать до 250А в дугу! Один Е65 до 190А! Это проверенные данные для частот 30 - 40кГц.

## Список полезной литературы.

1. "Радио" №9, 1990г.
2. "Микросхемы для импульсных источников питания и их применение", 2001г. Издательство "ДОДЕКА".
3. "Силовая электроника", Б.Ю. Семёнов, Москва 2001г.
4. "Силовые полупроводниковые ключи", П.А. Воронин, "ДОДЕКА" 2001г.
5. Каталог п.л. приборов фирмы NTE.
5. Справочные материалы фирмы IR.
6. ТОЭ, Л.Р.Нейман и П.Л. Калантаров, Часть 2.
7. Сварка и резка металлов. Д.Л. Глизманенко.
8. "Микросхемы для линейных источников питания и их применение", 2001г. Издательство "ДОДЕКА".
9. "Теория и расчёт трансформаторов ИВЭ". Хныков А.В. Москва 2004г.
10. "Компоненты для силовой электроники", DACPOL, 2005г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Немного теории и основные требования к сварочному инвертору .....	3
2. Типы высокочастотных преобразователей, наиболее часто применяемых для построения сварочных инверторов.....	5
3. Ассиметричный мост, или одноконтурный прямоходовой, или просто "косой мост".....	9
4. Полумостовой двухконтурный инвертор с ШИМ, с дросселем рассеяния, резонансный.....	13
5. Мостовой двухконтурный инвертор с ШИМ, с дросселем рассеяния, резонансный.....	21
6. Выбор силовых транзисторов.....	30
7. Конструктивные хитрости и нюансы изготовления ответственных узлов.....	32
8. Полезные устройства и схемы: "горячий старт", "антипригар", "мягкий поджиг" .....	34