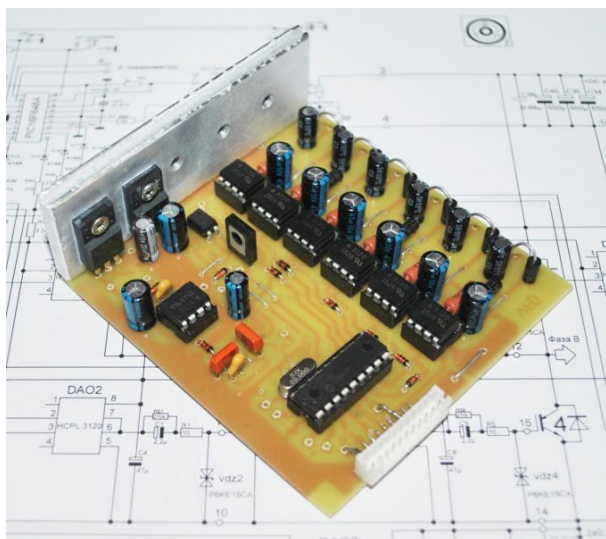




Частотный преобразователь “ВОСЬМИКРУТ”



U/f – скалярное управление АД

Устройство и наладка ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

(версия 1.8а)



Содержание

1. Введение	3
1.1 Общая характеристика преобразователя, основные узлы	4
1.2 Принцип управления и защиты в преобразователе	7
2. Принципиальные схемы узлов преобразователя частоты	11
2.1 Схема управления	11
2.2 Силовая схема	15
2.3 Общая схема	18
2.4 Схема индикатора (показометра)	21
2.5 Схема задатчика частоты (крутилки)	23
2.6 Схемы внешнего пульта	25
3. БЛОК ПИТАНИЯ	28
3.1 Особенности питания и требования к БП	28
3.2 Рекомендованная схема БП и её проверка	31
4. УПРАВЛЕНИЕ И ПРОВЕРКА УЗЛОВ	35
4.1 Варианты программ и схем управления частотным преобразователем	35
4.2 Программирование контроллеров	38
4.3 Проверка платы управления	41
4.4 Проверка индикатора (показометра)	46
4.5 Проверка задатчика частоты (крутилки)	47
5. ИНВЕРТОР	49
5.1 Режим HARD SWITCHING, Motorcontrol	52
5.2 Обратный диод в корпусе с транзистором	53
5.3 Максимальное напряжение коллектор-эмиттер	54





1. Введение

Тема самостоятельного конструирования простого частотного преобразователя для работы трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети волновала и на сегодняшний день продолжает волновать многих, подразумевая возможность её прикладного применения для привода механизмов в домашнем хозяйстве, мастерской и т.д. Конструкция устройства должна быть максимально простой, легкой в использовании, надёжной и универсальной для облегчения её сборки в любительских условиях. Частотный преобразователь, описанию которого посвящён этот документ, разрабатывался с нуля исходя из этих соображений и для получения оптимального режима работы трёхфазного двигателя на циркулярной пиле. После опубликования [статьи](#) и начавшейся эксплуатации первых повторённых конструкций преобразователя, благодаря вопросам, отзывам и предложениям людей на [форуме](#) были произведены доработки устройства и появились новые возможности.

На сегодняшний день можно заявить о высокой надёжности имеющихся схем и алгоритмов управления. Происходит и дальнейшая модернизация, появляются новые варианты программ, конструкций, осваиваются высокочастотные и однофазные двигатели. Универсальность схемы инвертора позволяет управлять и двигателями постоянного тока без переделок, изменив только программу. Данная опция уже доступна. Тема является уникальным полем для творчества каждого.

Для успешной сборки и запуска данного устройства нужны некоторые детали, технические знания и навыки, но самое важное - интерес и желание, тогда всё недостающее будет постепенно приобретаться в процессе. Всегда будьте готовы к получению новых интересных знаний. Целью данного документа является информационная помощь по устройству, принципу действия и наладке самодельного частотного преобразователя “Восьмикрут”.

Описание вариантов схем и программ поможет выбрать нужное решение для конкретного случая. Будут рассмотрены принципиальные схемы и проверка рекомендованных печатных плат. Естественно, эти платы не являются догмой и в зависимости от общей конструкции и опыта изготовителя могут быть изменены и доработаны с желательным сохранением основной разводки. Полностью иные спроектированные варианты плат, изменения текущих схем и программного кода без наличия достаточного опыта могут содержать критические ошибки и должны быть рассмотрены отдельно.



1.1 Общая характеристика преобразователя, основные узлы

Данный преобразователь частоты выполнен по схеме двойного преобразования. Сетевое напряжение выпрямляется неуправляемым выпрямителем, фильтруется, а затем преобразуется транзисторным инвертором с помощью ШИМ в регулируемое трёхфазное напряжение. Выходная мощность преобразователя определяется параметрами тока выпрямителя и инвертора, а также параметрами питающей сети. Главными достоинствами являются лёгкий запуск, регулирование скорости и высокий коэффициент использования мощности двигателя при питании от одной фазы. Программная часть выполнена универсальной (см. описание к конкретной программе). Возможно подключение к преобразователю любых двигателей **мощностью до 4кВт**, а также двигателей большей мощности, например **5,5кВт**, но **при условии соответствия по току силовой части**. Для получения номинального момента на валу при однофазном питании 220В следует подключать обмотки двигателя к частотному инвертору по **схеме “треугольник”**.

Преобразователь “Восьмикрут” эксплуатировался с двигателем 11кВт при трёхфазном варианте питания.

При однофазном питании и применении с мощностями >3кВт с полной отдачей мощности двигателя (например, привода мощных насосов и компрессоров) рекомендуется подключение к сети с применением специального блока ККМ подкачки “Бульдюк”. Информация [здесь](#) и [здесь](#).

Для возможности реализации режима быстрого торможения привода, например для работы на токарных станках, необходимо применять тормозной модуль. Информация [здесь](#) и [здесь](#).



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Основные характеристики:

- скалярный способ управления двигателем
 - простая разомкнутая система регулирования
 - линейная зависимость U/f с поднятием U на низких частотах (имеются оптимальные ramпы $P \leq 550\text{Вт}$, $\leq 1500\text{Вт}$, $\leq 4000\text{Вт}$, универсальная)
 - полное использование питающего напряжения на номинальной частоте двигателя (при входном напряжении 220В 50Гц трёхфазный выход 220В 50Гц)
 - минимальная выходная частота 1Гц (8Гц)*
 - максимальная выходная частота 75Гц (400Гц)*
 - шаг изменения частоты 0,5Гц (2,66Гц)*
 - легкий реверс двигателя
 - регулирование выходной частоты кнопками
 - разгон на установленную разгонную частоту одним нажатием кнопки
 - установка разгонной частоты с сохранением параметра
 - установка темпа разгона-торможения с сохранением параметра
 - отдельная установка темпов разгона и торможения с сохранением параметров и просмотром ранее установленных (в программах с задатчиком)
 - регулирование выходной частоты аналоговым задатчиком
 - торможение с 50Гц за 0,5с (при использовании тормозного модуля)
 - возможность работы с автозапуском (подходит для управления приводом компрессора в функции давления)
 - возможность управления с внешнего пульта
 - возможность управления однофазными двигателями (отдельные программы)
 - возможность управления двигателем постоянного тока (отдельная программа)
 - универсальность платы управления по раскатке различных вариантов силовых транзисторов и модулей (двухполярное напряжение раскатки затворов, пиковый ток управления 2,5А, dead time= 2мкс)
 - защита от пониженного напряжения (просадки) сети и превышения DC напряжения при торможении
 - защита от перегрузки и короткого замыкания
- * - значения указаны при использовании контроллера PIC16F648A
* - значения в скобках указаны для программы на 400Гц



Ниже представлена структурная схема:

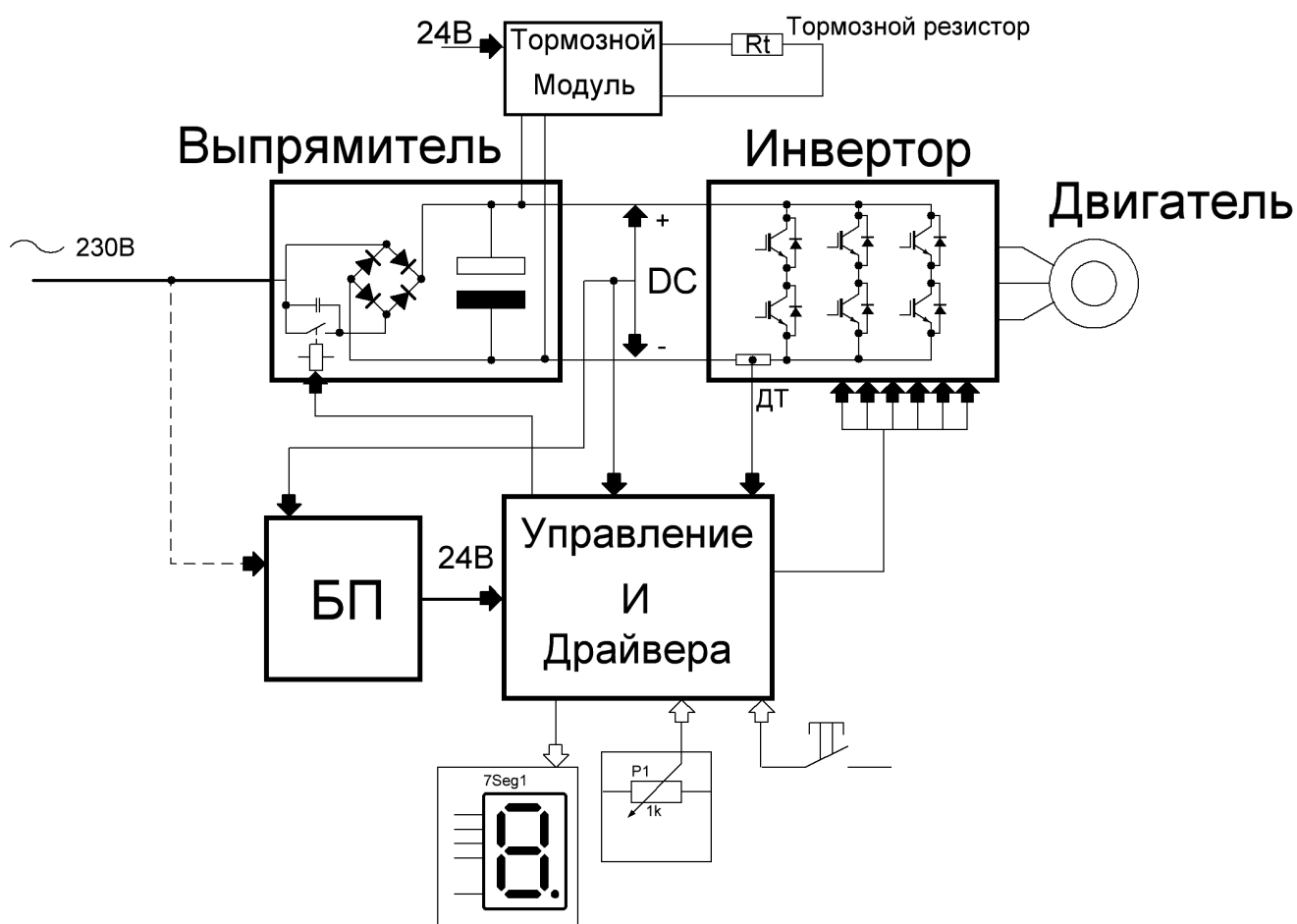


Рис 1. Структурная схема преобразователя “Восьмикрут”

Можно выделить основные узлы преобразователя:

- **блок питания**
- **плата управления**
- **силовой выпрямитель с фильтром**
- **трёхфазный инвертор**
- **индикатор частоты и ошибок (показометр)**
- **частотный задатчик (крутилка)**
- **кнопки управления или выносной пульт**
- **тормозной модуль (для быстрого тормоза)**

Использование данной структуры, а также связки управляющего контроллера и дискретных высоковольтных оптодрайверов позволило сделать плату управления “VOSMIKRUT” универсальной. Это существенно расширило возможности её применения для раскочки различных по комплектации силовых трёхфазных инверторов, в том числе на мощных IGBT модулях и транзисторах. Также возможно её применение при трёхфазном питании при напряжении DC звена 535В.



1.2 Принцип управления и защиты в преобразователе

В качестве моторного контроллера управления трёхфазным инвертором применяется 8 разрядный микроконтроллер серии PIC16F648A. Возможно также применение микроконтроллера PIC16F628(A), но с ограниченным функционалом и большим шагом изменения частоты (1,25Гц).

Применению этого типа контроллеров способствовали такие факторы как универсальность, достаточная простота и популярность у радиолюбителей, разумная цена, лёгкость программирования и т.д.

На языке ассемблер была разработана программа формирования шести ШИМ сигналов на основе пространственно-векторной модуляции (SVPWM), а также опрос сигналов управления и контроля с передачей фактов состояния на индикатор или светодиоды. Принцип работы программы ШИМ кратко описан в сопутствующем документе “Модуляция Восьмикрут” (инф. [здесь](#) и [здесь](#)). Применение векторной модуляции позволяет получить динамический сдвиг фаз векторов и полностью использовать напряжение питания. На выходе преобразователя от 49Гц (381Гц) формируется максимально возможное напряжение с минимальными потерями коммутации в транзисторах. Это даёт возможность получать номинальную механическую мощность на номинальной скорости двигателя.

Скалярное частотное регулирование двигателя осуществляется посредством изменения частоты и напряжения подводимого к двигателю. Как известно, в общем случае для сохранения момента на низких оборотах необходимо уменьшать напряжение U меньше чем частоту f . Для обеспечения универсальности при отсутствии параметрирования и возможности подключения мощных двигателей было принято решение использовать зависимость U/f с небольшим подъёмом. Обеспечивается режим с номинальным намагничиванием двигателя на 4кВт на около-нулевом скольжении (холостом ходе) рассчитанный на средний по загрузке пуск. При сильной загрузке на низких частотах магнитное поле уменьшается в зависимости от активного сопротивления статора, частоты и просадки DC звена. Ток при этом будет возрастать. Работа на низких частотах с полным моментом требуется редко и такое решение оправдано в большинстве случаев практического применения. На данный момент имеются прикладные программы для двигателей $\leq 550\text{Вт}$, $\leq 1500\text{Вт}$, $\leq 4000\text{Вт}$ позволяющих получать номинальный момент на низких оборотах.

Для надёжной работы в устройстве обеспечены защиты от аварийных режимов. От режима межфазного короткого замыкания была успешно применена быстродействующая токовая защита, реализованная аппаратно с прямым воздействием на драйверы. При превышении тока происходит выключение транзисторов за время менее 10мкс с последующей возможностью работы только после ручного сброса. Малое время срабатывания защиты обеспечивает и отключение тока сквозного короткого замыкания в инверторе, что является важным



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



фактором повышения живучести силовых ключей и драйверов при авариях в силовой части. Замыкание на землю остаётся более опасным для преобразователя, ввиду упрощения схемы (половинный контроль), но оно является и более мягким. Возможно доп. применение диф. автоматов или УЗО на ток 100-300мА. Также была выполнена программно-аппаратная защита по снижению величины питающего напряжения DC звена. При достижении нижнего порога контроллер теряет контрольный логический уровень и выключает транзисторы с индикацией ошибки. Аппаратно при этом отпадает шунтирующее реле в цепи заряда фильтра выпрямителя, разрывая силовую цепь преобразователя и сети. Как показала практика, этого оказалось достаточным для безаварийного использования преобразователя в любительских условиях.

В последующем была добавлена в схему и аппаратная защита от превышения напряжения DC звена, которое может возникнуть вследствие тормозного (рекуперативного) режима двигателя. Вероятность этого особенно высока при быстром замедлении на ослабленном поле двигателя (торможение с 75Гц или работа на соединении звезда 380В при питании 220В), когда малы потери в системе и не используется тормозной модуль. Защита также отработает, если тормозной резистор не справляется или неисправен.

Недавно появилась опция – программа для управления двигателями постоянного тока. Трёхфазный инвертор от DC-звена посредством ШИМ-модуляции может с легкостью питать якорь и обмотку возбуждения. При этом появляется возможность плавного регулирования скорости (ускорение-торможение) и смена направления вращения, изменением величины и полярности напряжения на якоре. Ток якоря при этом непрерывный и практически не имеет пульсаций, характеристика машины в разомкнутой системе более линейная и жесткая, в отличии от характеристик разомкнутой системы при питания от однофазных выпрямителей или тиристорных преобразователей. ШИМ возбуждения пока остаётся с постоянным коэффициентом заполнения, но при желании можно добавить в алгоритм и ослабление поля. Все функции защиты выполняются аналогично, как и для асинхронного двигателя. Программа и доп. инф. [здесь](#) и [здесь](#)



FAQ Вопрос-ОТВЕТ

Информация взята с форума <http://www.radiokot.ru/forum/viewtopic.php?t=106385>

1. Как я понял, силовые конденсаторы, реле и их обвязка собраны на отдельной плате?

Интересует поведение преобразователя при:

- а) включили с КЗ на выводах
- б) КЗ возникло во время работы
- в) включили с не подключенным двигателем
- г) отключился двигатель целиком от преобразователя во время работы или одна из фаз
- д) подключение двигателя к уже включенному преобразователю

Как бы вот такие внештатные ситуации. Останется преобразователь жив?

Да, силовые кондёры, реле, обвязка - стоят отдельно. Для данной схемы опасно скорее только к.з. на землю т. к. контролируется только одна ветвь DC. Защита срабатывает, но медленнее. Был один случай на практике, всё отключилось штатно.

При включении на к.з. срабатывает защита. Всё живёт.

При включении без двигателя возможно срабатывание защиты, из-за отсутствия цепи, подтягивающей верхние драйвера через резистор R73 на двух других фазах. А так на выводах фаз появится напряжение и ничего более не произойдёт (для такого режима нужно ставить подтяжку R73 в каждую фазу).

При возникновении межфазного к.з во время работы снова работает защита, всё живёт дальше.

При включении сначала привода, а потом подключении двигателя уже на 50Гц, скорее всего также срабатывает защита. Тут уже зависит от мощности. Если уставка на 1.5кВт то 180Вт раскрутится, а 1.5кВт выключится.

При пуске без одной фазы движка пилы на 1,5кВт настраивал шунт на выключение при подходе частоты к 40Гц. Двигатель 180Вт соответственно будет стоять и греться.

2. Может просмотрел, но как должен включаться двигатель-звездой или треугольником? Как лучше, меньше нагрузка на сеть и преобразователь, большая мощность двигателя?

Однозначно треугольником, так полная мощность на валу и всем хорошо. При звезде останется только третья часть мощности и теряется весь смысл устройства.

3. Отличная разработка!

Единственное замечание: на таких мощностях просто необходим корректор коэффициента мощности. Также, насколько я могу судить, применение ККМ позволит получить на выходе не 3х220, а полноценные 3х380, что в свою очередь, позволит подключать трёхфазный без переключения их в треугольник.

Данное устройство разрабатывалось как простое, без лишних наворотов, для домашних нужд. Да, я согласен, на 4кВт ток из сети будем потреблять импульсами большой величины, но тут на самом деле как бы и предел использования его в однофазной сети.

Главное, что порой необходимо – это осуществить запуск имеющегося мощного двигателя от однофазной сети, с чем легко справляемся. И далеко не всегда потребуется его полная нагрузка.

При ёмкости DC 2000мкФ возможно получить коэффициент мощности 0,65, а при меньшей ёмкости ещё выше. Основная проблема при однофазном питании - просадка DC звена, от которой падает момент.

В дальнейшем планируется добавка корректора к данному частотнику отдельным модулем.

4. У меня есть двигатель 5.5квт, может можно его как то умощнить?



<DC-AC> ВОСЬМИКРУТ – устройство и наладка



Запустить двигатель сможете, а нагрузить в зависимости от имеющейся сети. Ориентировочно можно загрузить на 3кВт. Снять более 4кВт не получится, по крайней мере без корректора коэффициента мощности. Просядет DC звено и (или) двигатель будет опрокидываться со сверхтоком.

5. Хочу сделать частотный преобразователь на основе STM32

Про ШИМ управление и т.д. все достаточно просто и понятно. Не могу понять один момент, при скалярном методе управления используется постоянство отношения напряжение\частота.

Синус считаем по формуле $i=(I_{max}*\sin(Wt))$ Сдвиг фаз опустим.

Вопрос с I_{max} . Так как мы работаем с цифрой, то $I_{max} = 1$.

Все отлично и замечательно, синусоиду я получил.

Если следовать тому, что $U/f=const$. Для какой частоты $I_{max}=1$? Если для 50 Герц, то для 40 $I_{max}=0.8$ ($U1/f1=U2/f2$) и т.д.

Для частоты в 10 Гц $I_{max}=0.2$ не будет ли сильной потери момента на валу?

Собственно вопрос, как Вы реализовали этот момент?

Да, для 50 Гц при номинале двигателя 50Гц.

Потеря момента будет, и зависит она от мощности двигателя. Для его постоянства необходимо поднятие напряжения (буст) на низких частотах, а на сколько - зависит в основном от активного сопротивления статора. Маломощным нужен больший буст, мощным меньший соответственно. Я использовал опытным путём подобранное соотношение и оно жестко зашито в таблицах, у меня контроллер ничего не вычисляет.

6. При нажатии кнопки "Сброс" частота снижается плавно до 0

Нет, это при нажатии стоп вниз она плавно снижается. При нажатии сброса сразу выключаются транзисторы и снимается напряжение с двигателя, как будто контактор выключили. Дальше самовыбег.



2. Принципиальные схемы узлов преобразователя частоты

Полная принципиальная схема преобразователя частоты “Восьмикрут” объединяет как минимум три узла – **плату управления, силовой выпрямитель с фильтром** и **трёхфазный инвертор**. Для облегчения восприятия разделим её на 2 основные части – **управления** и **силовую**. Также рассмотрим общую схему, схему индикатора, схему задатчика частоты и схемы внешнего пульта. Особенности питания и рекомендованная схема блока питания будет рассмотрена отдельно в п 3.

2.1 Схема управления

Рассмотрим схему **платы управления** преобразователя:

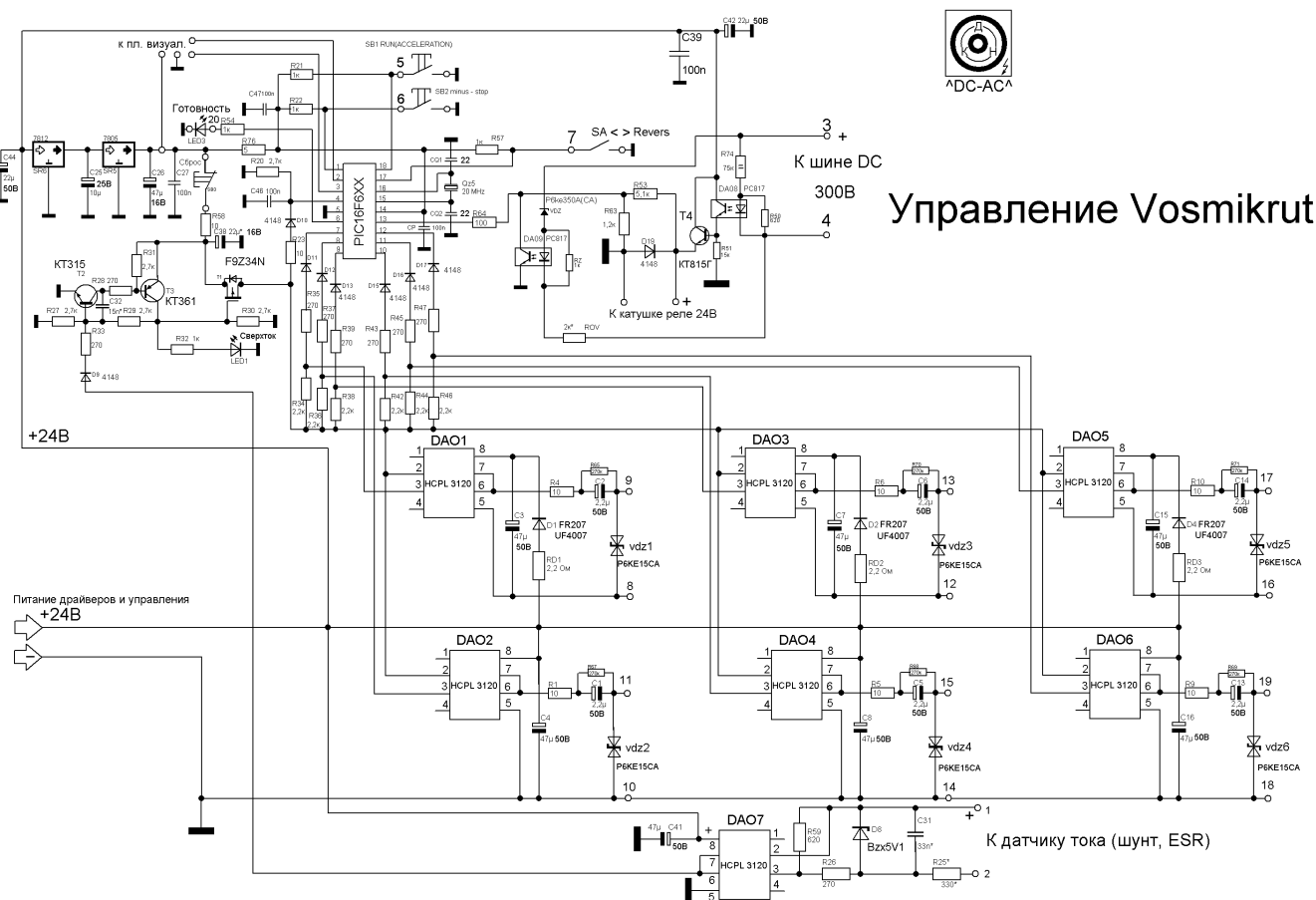


Рис 2. Принципиальная схема управления преобразователя “Восьмикрут”

Легко увидеть, что основу схемы составляет связка интегральных оптодрайверов DAO1-6 (HCPL3120-HCNW3120) и моторного контроллера управления (PIC16). Для схемы достаточно всего одного гальванически изолированного от сети источника питания 24В.



Три нижних оптодрайвера эмиттерной группы ключей DAO2, DAO4, DAO6 получают питание непосредственно, а три верхних оптодрайвера коллекторной группы ключей DAO1, DAO3, DAO5 запитываются по бутстрепной схеме. Плюс источника питания подан всегда через высоковольтные быстрые диоды D1, D2, D4, а к минусу питания они подключаются периодически, через транзисторы эмиттерной группы силовой части. Естественно такое решение имеет определённые особенности, которые были учтены при разработке и исследованы на практике.

Для повышения надёжности в использовании были созданы соответствующие условия, одними из которых являются высокое напряжение питания драйвера и цепь смещения уровня. Применение проходных конденсаторов и супрессоров (стабилитронов) в выходной цепи драйверов позволило получить двухполярное напряжение раскачки на затворах всех силовых транзисторов (см. рис. 12). Элементы обвязки по питанию и выходу драйверов подобраны таким образом, что обеспечивается нужная функциональность во всех используемых режимах модуляции. Например, при векторном режиме необходимо обрабатывать время постоянно включенного и постоянно выключенного состояний транзисторов по 6,5мс.

Рабочие уровни напряжения на элементах драйверов и затворах транзисторов устанавливаются при постоянной подаче импульсов. Для этого была реализована соответствующая подпрограмма начального запуска драйверов в работу. (В схеме силовой части также установлен подтягивающий резистор R73, обеспечивающий начальную подачу минуса питания на драйверы HCPL коллекторной группы, начальное напряжение на них устанавливается около 4-4,5В).

При дальнейшей эксплуатации были добавлены резисторы RD1, RD2, RD3, последовательно с диодами D1, D2, D4, для ограничения мгновенного тока заряда и соответственно скорости нарастания напряжения на бутстрепных электролитических конденсаторах драйверов коллекторной группы ключей **(исключение короткого импульса сквозного тока при включении, появлявшегося при низких температурах эксплуатации изделия)**.

Подключение управляющих светодиодов оптодрайверов к моторному контроллеру осуществлено через задающие ток резисторы по 270Ом и развязывающие диоды 4148. Резисторы по 2,2кОм, которые стоят параллельно светодиодам, осуществляют небольшую токовую подгрузку, для снижения амплитуды возможного наведённого напряжения. Анодами светодиоды оптодрайверов соединены в общую шину и получают по ней плюс питания через транзистор T1 от схемы защиты. Активным уровнем на порту (ножках) контроллера для включения драйвера и силового транзистора соответственно является логический ноль. Время задержки (dead time) между переключениями транзисторов стойки выполнено на программном уровне и равно 2мкс. Вывод 4 сброса контроллера также подключается к общей шине драйверов через R23 и D10. Быстродействующее отключение выполняется снятием плюса питания с общей анодной шины светодиодов драйверов при закрытии транзистора T1. Диоды 4148 в



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



этот момент предотвращают вероятность прохода с выводов контроллера высокого логического уровня до состояния его сброса. Таким образом, при срабатывании схемы защиты драйверы выключаются моментально, независимо от состояния контроллера, а на самом контроллере пропадает высокий логический уровень на 4 ножке, переводя его в состояние сброса.

Схема быстродействующей токовой защиты включает в себя тот же быстрый оптодрайвер HCPL DAO7, триггер на биполярных транзисторах Т2 и Т3, и уже известный полевой ключ Т1. Цепь R25 и С31 образуют первичный НЧ фильтр сигнала с датчика тока (датчики рассмотрены в схеме силовой части) для подавления выбросов от коммутационных процессов инвертора. Стабилитрон D8 защищает цепь светодиода драйвера от короткого импульса высокого напряжения, который возможен при аварийной ситуации. С32 уменьшает чувствительность триггера к помехам. R58 и С38 выполняют роль фильтра питания цепи защиты и уменьшают скорость нарастания напряжения на триггере. При превышении сигналом с датчика порога включения драйвера, его мощный импульс вызывает моментальное срабатывание и защёлкивание триггера. Затвор ключа Т1 оказывается замкнут с истоком и он закрывается, отключая шину питания светодиодов оптодрайверов. Срабатывание триггера защиты сигнализируется светодиодом LED1 **“Сверхток”**. Сброс триггера возможен только при снятии питания кнопкой **“Сброс”**, и соответственно, пока цепь этой кнопки разорвана, светодиоды оптодрайверов гарантированно выключены, и контроллер находится в состоянии сброса. Защита сработает сразу после отпускания кнопки, если по каким-либо причинам уже имеет место аварийная ситуация.

Питание 5В моторного контроллера и схемы защиты осуществляется от каскада стабилизаторов “кренок” 7812 и 7805. Возможно также использование импульсного стабилизатора напряжения на 24/5В. При использовании платы индикатора (показометра) и задатчика (крутилки) они также запитываются от этих 5В. Элементы R76, CP, C46, C47 являются обязательными фильтрами, защищающими микроконтроллер от помех. Готовность к работе сигнализируется постоянным свечением светодиода L3 **“Готовность”** (используется не во всех версиях программ).

Оптрон DAO8 PC817 и транзистор Т4 в качестве эмиттерного повторителя образуют простейшую схему контроля величины постоянного напряжения на конденсаторах фильтра выпрямителя (DC - звена). Она управляет включением реле в цепи шунтирования плавного заряда фильтра и через делитель напряжения на резисторах R53 и R63 формирует напряжение логического уровня для мониторинга контроллером состояния шины DC. Высокая точность работы изначально не требуется. Оптрон PC817 имеет оптимальную крутизну характеристики, большинство стандартных реле с катушками постоянного тока имеют почти половинный коэффициент возврата (отношение напряжения отпускания к напряжению срабатывания), а также напряжение высокого логического уровня начинается уже со значений напряжения 3В и даже ниже. Всё это позволило совместить в одной



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



простой схеме функции мониторинга и управления реле. При заряде шины DC сначала появляется логический уровень, а затем втягивается реле. При снижении напряжения на фильтре DC ниже порога потеря логического уровня контролером и отпадение реле происходит практически одновременно. При этом программно выключаются все драйвера с индикацией ошибки по напряжению DC (мерцает светодиод L3 **“Готовность”**) и всё остаётся в таком состоянии бесконечно долго, независимо от последующего изменения напряжения. Для дальнейшей работы необходимо произвести сброс контроллера кнопкой. **(В версиях программ с автозапуском производится автоматический сброс ошибки по напряжению и осуществляется повторный запуск привода)**. Назначение резистора R64 – увеличение сопротивления линии связи для уменьшения наводок. Устанавливается ближе к контроллеру при размещении элементов схемы контроля DC и самого моторного контроллера в противоположных частях платы и их связи между собой длинной дорожкой. При установке делителя R53 и R63 рядом с моторным контроллером резистор R64 не требуется.

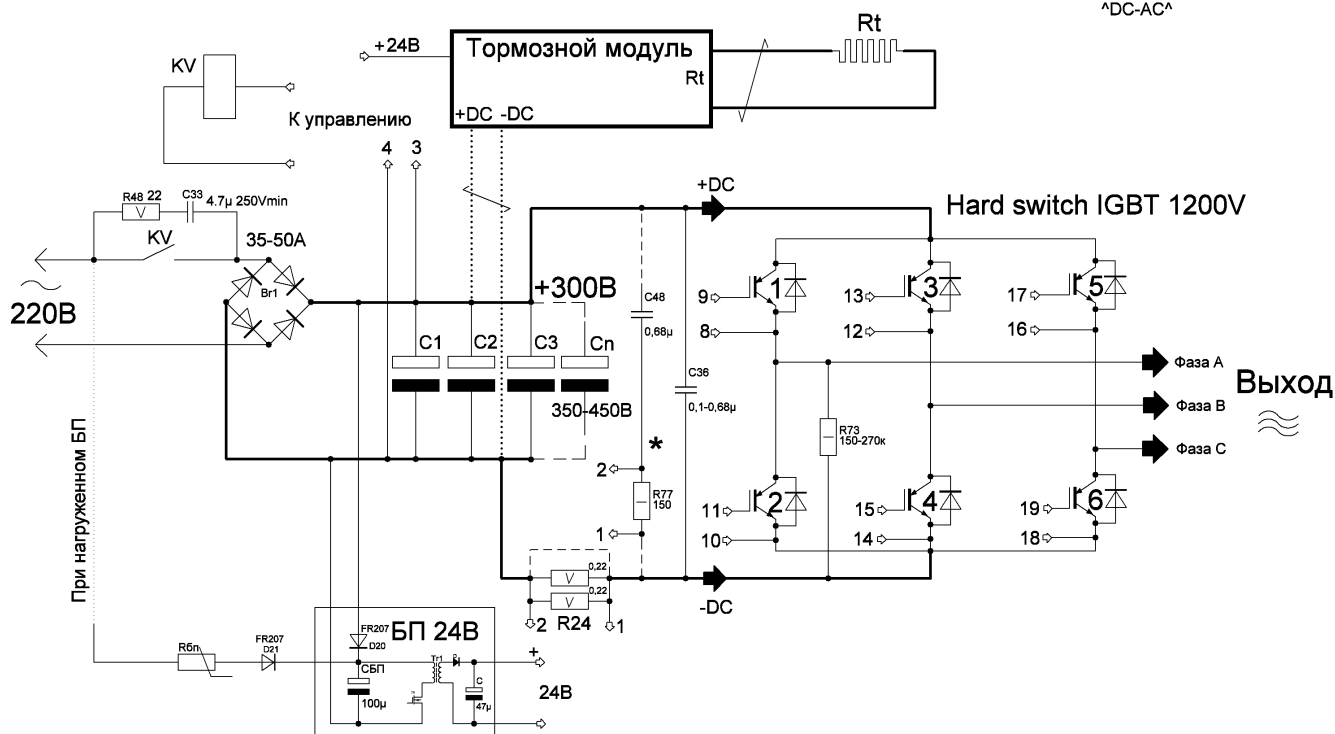
При дальнейшей эксплуатации **была добавлена защита и от превышения напряжения на шине DC при возможном генераторном режиме двигателя**. Состоит из оптрона DA09, резисторов RZ, ROV и порогового элемента VDZ – стабилитрона (супрессора) 1,5Ke350A(CA) или P6ke350A(CA). При превышении напряжения на DC выше пробоя стабилитрона, начинает течь ток через светодиод оптопары DA09, ограниченный резистором ROV. При этом транзистор оптрона сажает логический уровень идущий на контроллер, что вызывает программную отработку как и при пониженном напряжении - выключаются все драйвера с индикацией ошибки по напряжению DC (мерцает светодиод L3 **“Готовность”**) и всё остаётся в таком состоянии бесконечно долго, независимо от последующего изменения напряжения. Выключение всех транзисторов прекращает генераторный режим двигателя и соответственно дальнейшее повышение напряжения на DC.



2.2 Силовая схема

Рассмотрим силовую часть преобразователя, объединяющую в себе **силовой выпрямитель с фильтром и трёхфазный инвертор**:

Сила VOSMIKRUT



* Цепь C48-R77 используется для максимальной токовой защиты без шунта

Рис 3. Принципиальная схема силовой части преобразователя “Восьмикрут”

На входе схемы силовой выпрямитель Br1 и цепочка R48 C33, которая служит для ограничения начального тока заряда емкостей фильтра C1-C3-Cn. Основной ток и время заряда задаёт гасящий конденсатор C33. Его применение обусловлено отсутствием опасного нагрева, при вероятно-возможном кратковременном включении привода в работу при сильно-пониженном напряжении сети, когда логический уровень узла контроля DC, разрешающий работу, может присутствовать при разомкнутом шунтирующем контакте реле KV.

Набор параллельных электролитических конденсаторов образует фильтр и жёсткое звено постоянного тока (DC). К нему подключаются три стойки IGBT транзисторов с обратными диодами (или IGBT модуль), которые образуют **силовой трёхфазный инвертор напряжения**, обеспечивающий **двунаправленный обмен энергией** между нагрузкой и шиной DC (инвертор-выпрямитель).

Для защиты инвертора и двигателя от аварийного превышения тока в схеме применяется активный датчик тока – резисторы R24 (шунт). Индуктивность шунта должна быть по возможности минимальной. Для её частичной компенсации



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



(например, при скрученном из проволоки шунте), возможно подключение конденсатора емкостью 0,1мкф параллельно шунту R24. **Резисторы шунта должны выдерживать кратковременные тепловые перегрузки.** Электролитические конденсаторы C1-C3-Cn также обладают внутренним эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС или англ. ESR) и имеется возможность косвенно использовать его в качестве датчика тока для максимальной защиты, исключив шунт R24. Цепь C48-R77 служит для получения сигнала **падения напряжения на ESR+на полном сопротивлении Z питающих проводников, до места её подключения.** Подробнее данный процесс будет рассмотрен в разделе наладки максимальной токовой защиты в п. 5.

Конденсатор C36 **плёночный**, служит простейшим снаббером, снижает выбросы напряжения от индуктивности соединительных проводов, силовых дорожек, а также снижает ВЧ помехи от DC шин (амплитуда колебаний заметно уменьшается и смещается в более низкий частотный диапазон). **Можно устанавливать как один, так и три таких конденсатора на каждую стойку ключей.** Под стойкой в данном случае стоит понимать два ключа, соединенных между собой К-Э и подключенными на DC звено (например, 1 и 2).

Резистор R73 необходим для начальной подачи минуса питания на драйверы HСPL коллекторной группы силовых транзисторов. Его достаточно установить в одной из трёх стоек, а подтягивание остальных произойдёт через цепь нагрузки (обмотки двигателя). При необходимости **включения инвертора без нагрузки** необходимо устанавливать **подтягивающие резисторы R73 в каждую фазу**, иначе возможна вероятность кратковременного сквозного тока и срабатывание защиты.

На схеме также представлена рекомендуемая схема подключения блока питания частотного преобразователя от электролитов DC звена. Особенности питания и рекомендованная схема самого БП будут рассмотрены далее в п. 3. Обычно в цепи Rbp и D21 нет необходимости. Блок питания просто подключается к силовым электролитам через уже имеющийся в нём входной диодный мост, либо минуя собственный диодный мост (он может быть удалён вообще), но через обязательный диод развязки D20.

Для возможности реализации **быстрого торможения привода** во всех режимах и с инерционными нагрузками **необходим тормозной модуль.** Он подключается к конденсаторам DC-звена и тормозному резистору (см. схему выше). А также используется ещё один провод для запитывания схемы от штатного блока питания платы управления. Информацию по тормозному модулю можно найти [здесь](#) и [здесь](#). Использование тормозных транзисторов встроенных в силовые IGBT модули возможно, но нужно рассматривать их подключение отдельно.

При замедлении привода снижается частота и напряжение, двигатель переходит в режим **рекуперативного торможения** (становится генератором). При этом накопленная кинетическая энергия вращения механизма преобразуется в электрическую и напряжение на конденсаторах DC-звена начинает возрастать. Схема тормозного модуля это отслеживает и, начиная от 350В, ограничивает



<DC-AC> *VOSMIKRUT* – устройство и наладка



дальнейшее нарастание напряжения, подключая к звену посредством ШИМ **тормозной (разрядный) резистор**. Подводимая генераторная энергия при этом расходуется на нагрев этого резистора. Тормозной момент, в зависимости от темпа торможения и момента инерции нагрузки, может оказаться высоким **> 1,5Мном**. При этом **ток двигателя (инвертора)** также будет **кратковременно превышать**. Силовая часть должна быть выбрана соответственно. **Защита** по току **не отработает на перегрузку от рекуперативного тока**, т.к. - это ток обратного направления и на датчике (шунте R24) он создаёт импульсы напряжения обратной полярности.



2.3 Общая схема

Теперь рассмотрим для примера общую схему, объединяющей в себе управление и силовую часть:

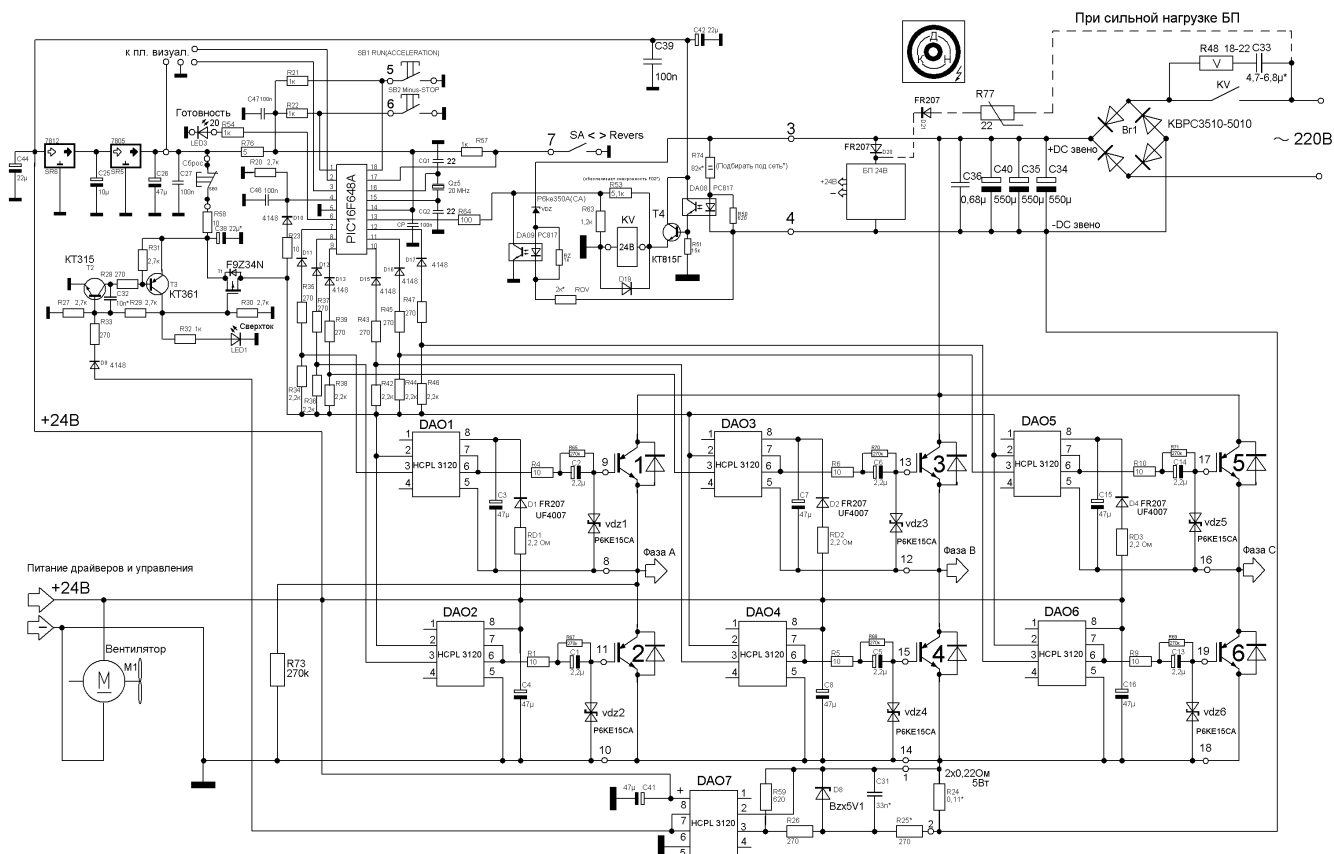


Рис 4. Принципиальная схема преобразователя “Восьмикрут” общая

На данном варианте схемы выводы контроллера 2 и 3 используются для подключения моторного контроллера к индикатору (показометру). В архиве программ для каждого варианта программного обеспечения контроллера представлены соответствующие схемы именно такого вида. Имеющиеся варианты программ и схем управления преобразователем будут подробно рассмотрены в п.4.

В самом простом варианте к выводам контроллера подключаются светодиоды, отображающие выходную частоту 50 и 75Гц (400Гц). При применении моторного контроллера PIC16F628(A), в зависимости от программы может использоваться кварцевый резонатор Qz5 на частоту 8Мгц и конденсаторы обвязки CQ1-CQ2 на 33пФ. В программах с частотным задатчиком светодиод готовности не устанавливается и вывод 6 контроллера используется для кнопки установки параметра темпа разгона-торможения.



<DC-AC> *VOSMIKRUT* – устройство и наладка



Ниже представлен ещё один вид общей схемы, более наглядно отображающий функциональность и соединение некоторых узлов частотного преобразователя, для схемы с индикатором и регулировкой задатчиком частоты:

ВОСЬМИКРУТ



<DC-AC> ВОСЬМИКРУТ – устройство и наладка



DC-AC feat HEMETC 2019

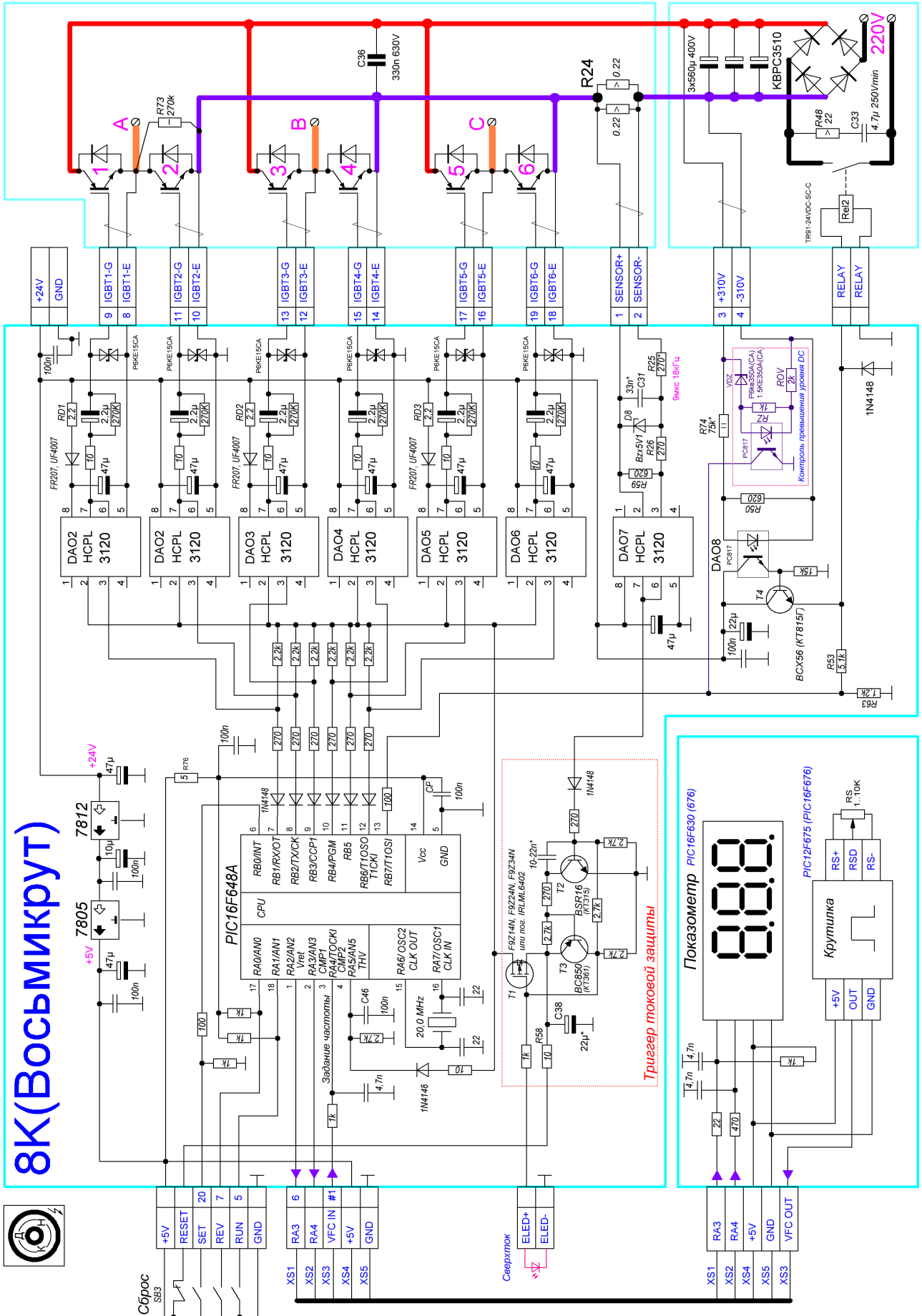


Рис 4а. Принципиальная схема преобразователя “Восьмикрут” общая



2.4 Схема индикатора (показометра)

Для отображения частоты, состояния готовности и ошибок преобразователя может быть использован индикатор на трёхзнаковом семисегментном индикаторе. Поддерживается использование индикаторов как с общим анодом (ОА), так и с общим катодом (ОК). Подробно разбор программ и вариантов индикаторов произведён в п.4.

Рассмотрим для примера схему под индикатор с ОА:

Визуализация частотника

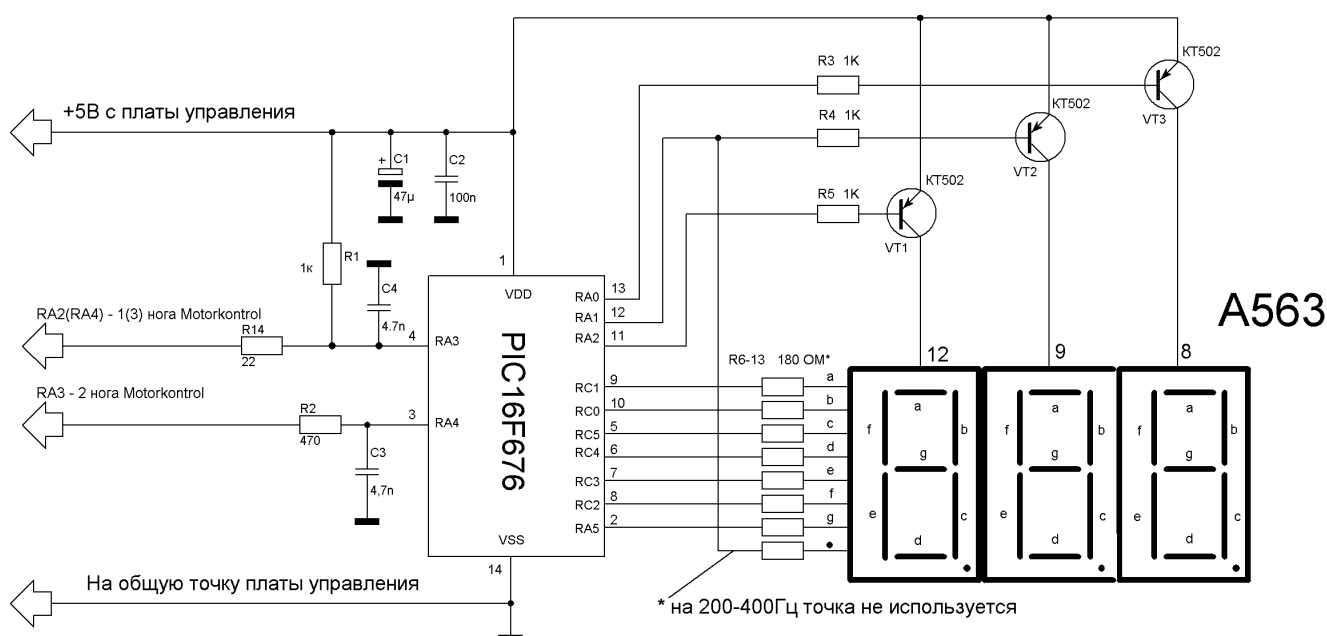


Схема от 21. 09. 2017г.

Рис 5. Принципиальная схема индикатора “Восьмикрут” с ОА.

Схема реализована на микроконтроллере, который обрабатывает биты фактов состояния от моторного контроллера и выполняет динамическую индикацию сегментов (какой-либо интерфейс передачи данных не применяется). Частота индикации сегментов около 3кГц, мерцания незаметны. Индикатор служит только для визуализации состояний и никакого влияния на работу моторного контроллера не оказывает.

В качестве микроконтроллеров в индикаторе могут быть применены PIC16F630 или PIC16F676. Программы универсальны. У PIC16F676 имеется модуль АЦП,



который просто не используется в данном узле. Тактируется контроллер от внутреннего RC генератора. Его частота 4Мгц задаётся заводским калибровочным параметром осциллятора, уже записанным в памяти контроллера (последняя ячейка). Подробно о программировании в п. 4.

По состоянию сигналов на 3 и 4 ножках оценивается текущее состояние привода. В режиме работы отображается значение выходной частоты. Также может отображаться следующее:

F0.1(F01) - сброс моторного контроллера; свертток, если горит LED1 “Свертток”.

F0.2(F02) – пониженное или повышенное напряжения DC звена (мигает светодиод L3 “Готовность”); нештатный сигнал частотного задания (возможен для программ с задатчиком частоты)

0.0(00) - готов к включению (горит светодиод L3 “Готовность”)

Цепи R2-C3, R14-C4 являются фильтрами помех, не вносящих сильное скругление фронтов импульсов.

Резистор R1 необходим для постоянного подтягивания 4 ножки к высокому логическому уровню сигнала. Транзисторы VT1 – VT3 исполняют роль ключей для коммутации общего анода (или катода в схемах с ОК) каждого знака. Резисторы R6-R13 задают ток светодиодов сегментов и соответственно яркость их свечения. Уменьшение их ниже 150Ом не рекомендуется - возможна перегрузка микроконтроллера по току.

Для программ под индикацию в целях упрощения конструкции имеется возможность использовать светодиодный вариант отображения состояний. С помощью двух светодиодов и представленной ниже схемы, возможно определять состояние контроллера и наличие ошибки **F0.2**.

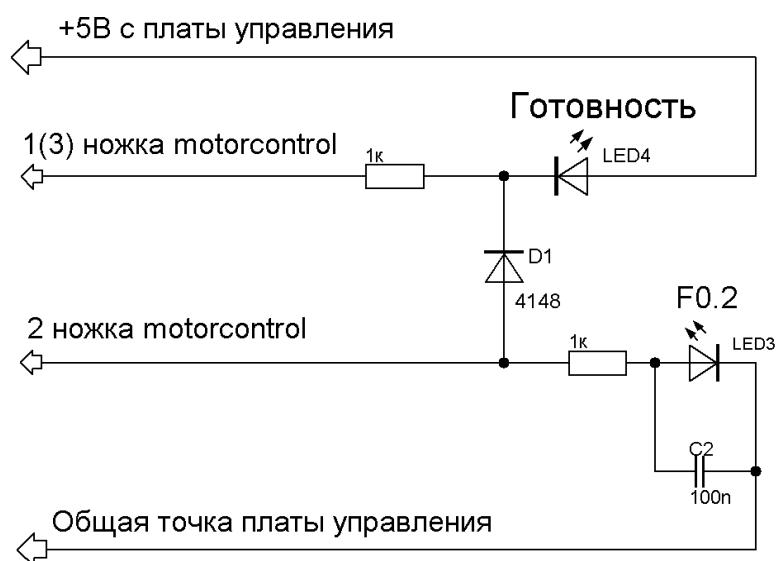


Рис 5а. Принципиальная схема отображения состояний “Восьмикрут”



2.5 Схема задатчика частоты (крутилки)

Для удобства регулировки частоты при использовании преобразователя на различных станках может быть применён аналоговый задатчик частоты.

В связи с отсутствием у моторного контроллера модуля АЦП для задания используется обычный двоичный вход и частотный сигнал. Моторный контроллер в этом режиме осуществляет выборку поданной на него (на 3 ножку) частоты сигнала задания и в соответствии с ней пропорционально формирует выходную частоту на двигатель. Для повышения стабильности в программе применён “гистерезис” при выборке частоты.

Выходную частоту преобразователя при использовании частотного задания можно приблизительно рассчитать так:

$$f_{\text{вых}} = f_{\text{зад}}/30,53 \text{ - для } 50\text{-}75\text{Гц, кратность } 0,5\text{Гц}$$

$$f_{\text{вых}} = f_{\text{зад}}/5,68 \text{ - для } 400\text{Гц, кратность } 2,66\text{Гц}$$

где: $f_{\text{вых}}$ – выходная частота преобразователя, Гц

$f_{\text{зад}}$ – частота задания, Гц

При нулевом значении частоты сигнала задания (отсутствие импульсов) – частота на выходе преобразователя - 1Гц (8Гц).

При слишком **высоком значении частоты задания возникает переполнение** счётчика, и моторный контроллер **отключается с имитацией ошибки F02**, в данном случае не связанной с реальной просадкой DC напряжения.

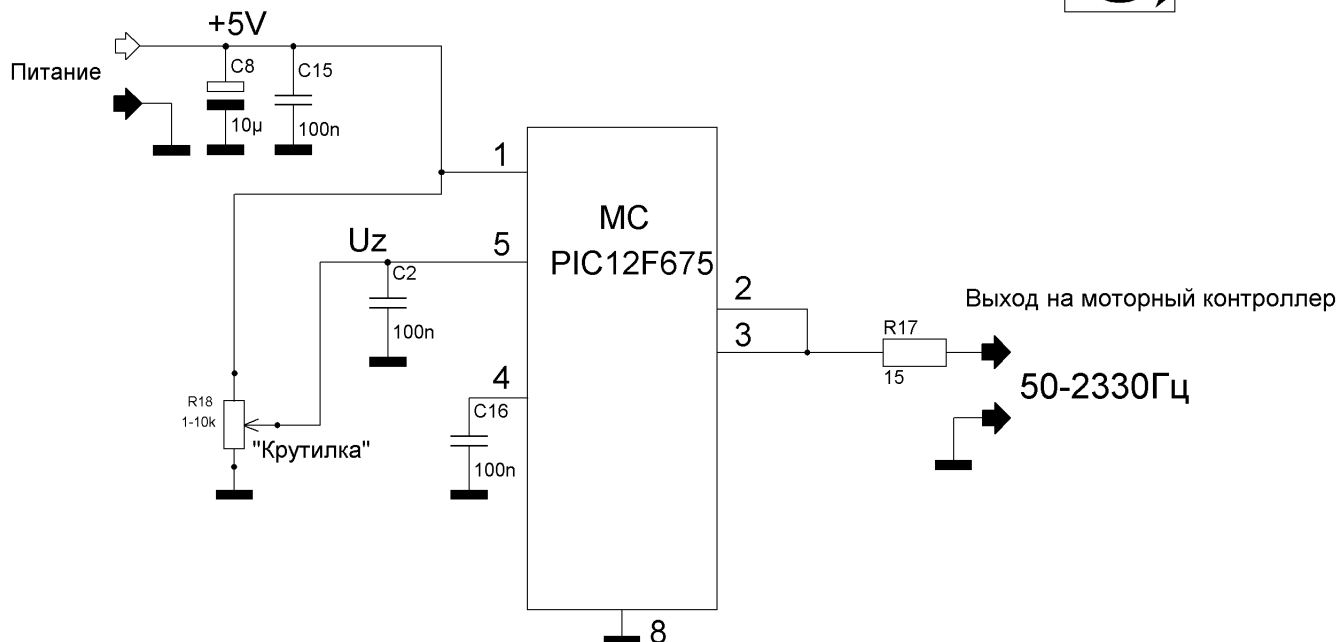
Сам генератор изменяемого частотного сигнала задания от аналогового напряжения может быть реализован на основе аналоговой или цифровой схемы. Для повышения стабильности вращения и плавности регулировки двигателя желательна стабильность и линейность характеристик генератора. В связи с этим рекомендуются задатчики на микроконтроллерах PIC12F675 или PIC16F676. Имеются соответствующие программы. Тактируются контроллеры также от внутреннего RC генератора с использованием заводского калибровочного значения осциллятора.

Использование частотного сигнала задания оказалось **очень удобным при осуществлении гальванической развязки** между задатчиком и платой управления – достаточно **одной оптопары**. Об этом далее в п. 2.6



Рассмотрим схему задатчика на PIC12F675:

Задатчик частоты



От 27. 03. 2015г.

Рис 6. Принципиальная схема аналогового задатчика “Восьмикрут”

Схема предельно проста. Резистор R18 является той самой “Крутилкой” и задаёт на вход АЦП контроллера напряжение от 0 до 5В. Конденсаторы C15, C8 - развязывающие фильтры, C2 – фильтр напряжения задания с переменного резистора, C16 – фильтр по 4 ножке контроллера от ВЧ наводок, R17 – способствует снижению емкостной нагрузки линии на порт контроллера.

Программно генератор выполнен как линейный преобразователь “напряжение-частота”. Каждые 5мс происходит серия оцифровок сигнала напряжения и программное усреднение для повышения стабильности. На основе полученного значения осуществляется генерация импульсов симметричного меандра (скважность равна 2) соответствующей частоты. При нулевом задании генерации импульсов нет.

При линейном изменении напряжения от 40мВ – 4,85В частота линейно изменяется от 51Гц до 2339Гц (+/-10%). Шаг квантования напряжения 19,5мВ, средний шаг выходной частоты 9,3Гц, общее число шагов – 246.

Возможность частотного задания позволяет без усложнения текущей одноканальной схемы БП, с помощью оптопары, осуществить гальванически развязанную передачу частотного задания на связанный с высоким потенциалом



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



моторный контроллер (см. Рис. 8). Это необходимо для безопасной работы задатчиком, размещённым на пульте и на станках, а также при принятии сигнала с внешних управляющих устройств. Это может быть как непосредственно частотный сигнал, так и поданный на задатчик стандартный аналоговый сигнал напряжения 0-10В. При этом нужно только использовать делитель напряжения на 2 (для получения 0-5В).

2.6 Схемы внешнего пульта

Для возможности дистанционного управления приводом рекомендуется применять схему опторазвязки портов и вторичный маломощный гальванически изолированный источник питания. Плата развязок со вторичным БП располагаются внутри корпуса преобразователя, а сам пульт или кнопки выносятся при помощи кабеля в нужное место для осуществления дистанционного управления. Это может быть как стационарный пульт, так и ручной переносной.

Схема под кнопки выглядит следующим образом:

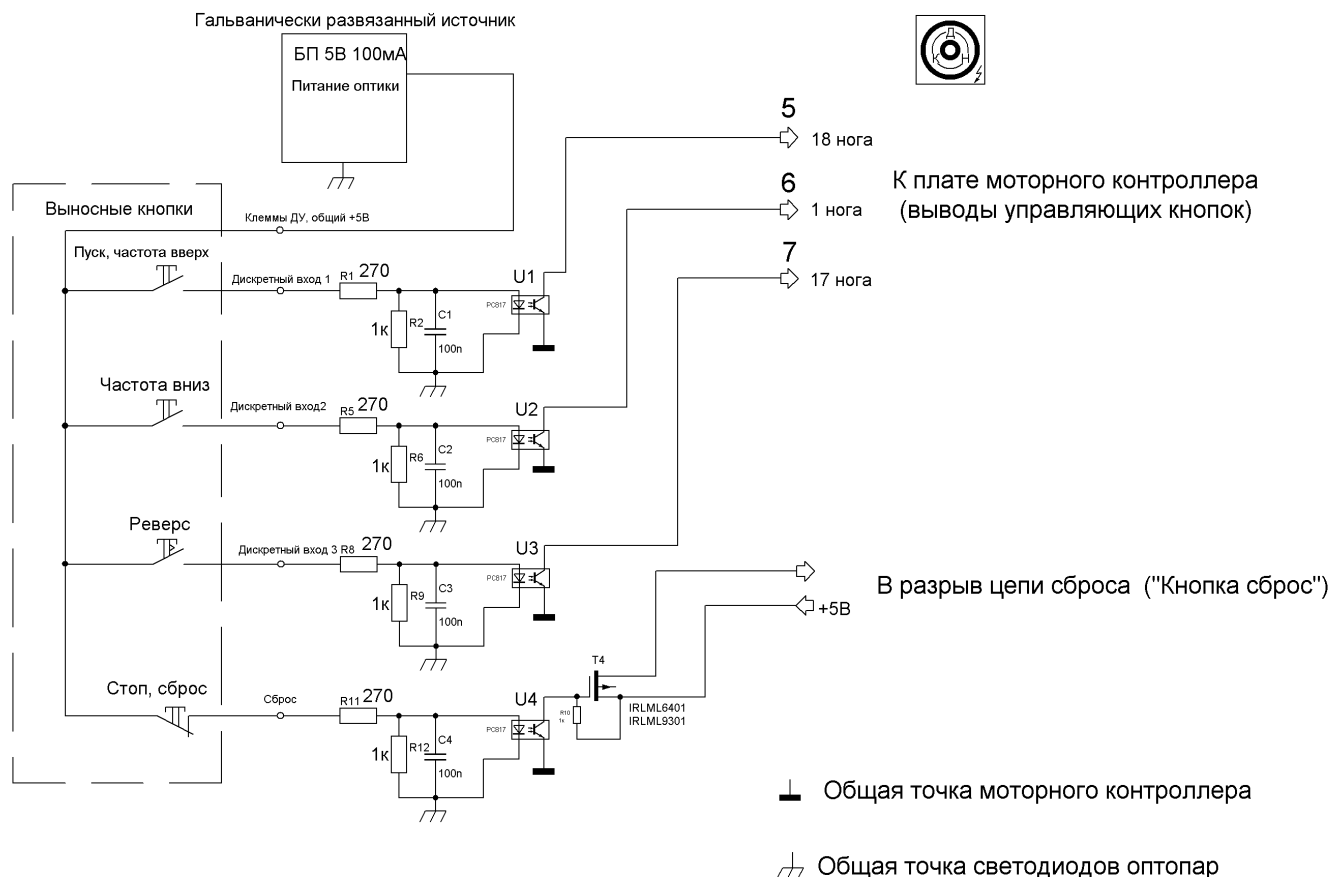


Рис 7. Принципиальная схема развязки для внешнего пульта "Восьмикрут"

Как видно, схема просто дублирует кнопки оптронами. Для такого вида управления необходим кабель с пятью жилами. Схема имеет фильтры наводок С1-С4. В качестве блока питания может использоваться любой, обеспечивающий



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



напряжение 5В и ток 100мА, и надёжную гальваническую развязку от сети. Можно применять напряжения и выше, например 12В (меньше требование к качеству управляющих контактов) и увеличивать соответствующие резисторы в цепи светодиодов оптронов, чтоб обеспечить ток 10-15мА. При пропаже питания пульта или обрыве кабеля преобразователь отключит двигатель, и будет находиться в состоянии сброса (F0.1), т.к. закроется транзистор Т4.

Данное свойство схемы также может обеспечить защитное действие, отключая преобразователь при пропаже напряжения в сети. При этом БП, питающий пульт, должен выключаться раньше, чем основной БП преобразователя (при запитке от сети).

В одной из новых версий программы с кнопками исключён переключатель реверса. Всё управление осуществляется тремя кнопками и достаточно уже 4 жилы кабеля и 3 оптрона.

Схема выносного пульта с задатчиком частоты выглядит так:

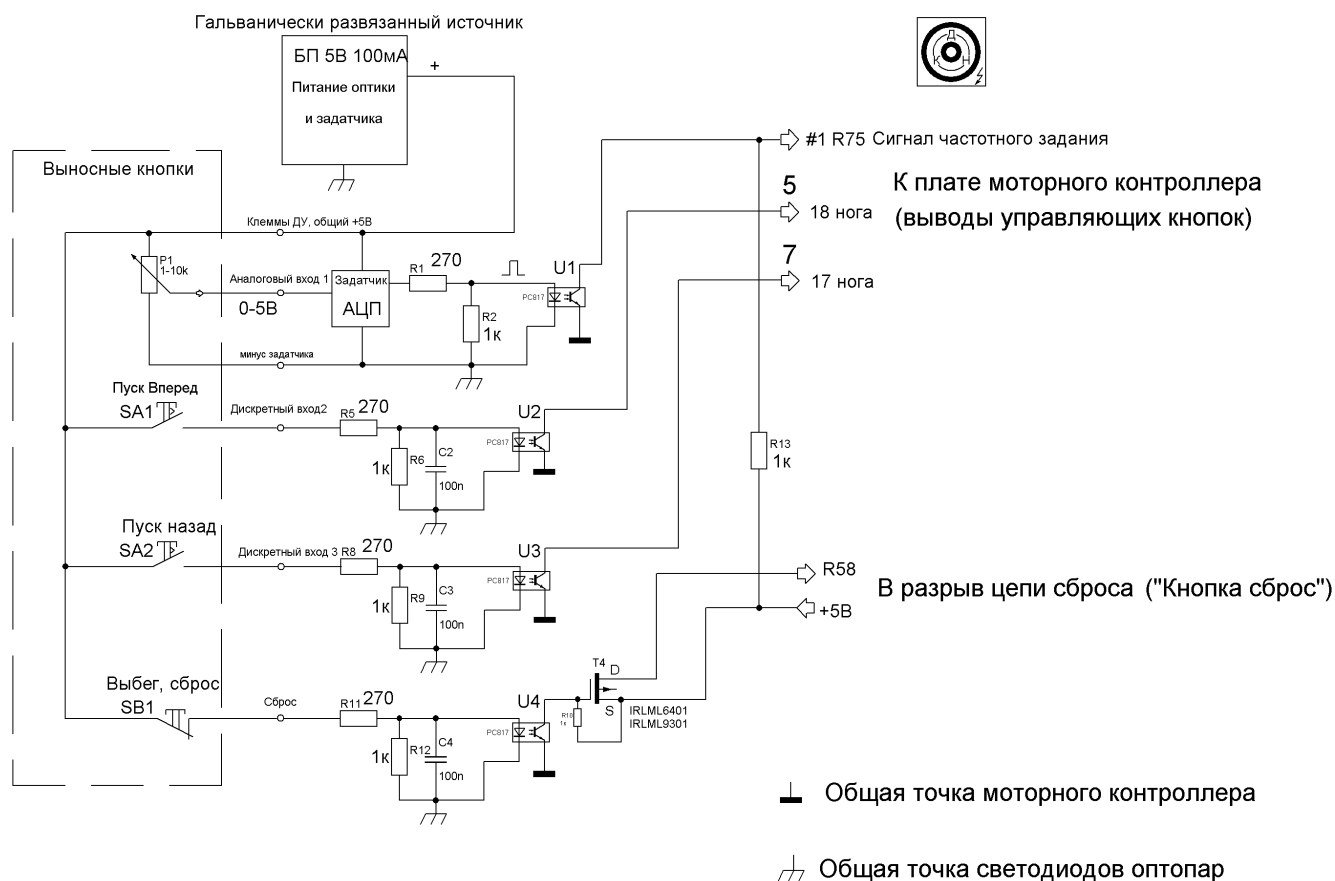


Рис 8. Принципиальная схема развязки с задатчиком для внешнего пульта "Восьмикрут"

Задатчик частоты размещается на плате гальваноразвязок и **запитывается от развязанного напряжения**. Частотный сигнал задания передаётся на моторный контроллер через оптрон U1, подтянутый резистором R13. В качестве источника



<DC-AC> *VOSMIKRUT* – устройство и наладка



гальванически развязанного напряжения использовался **маломощный низкочастотный трансформатор** на 220В, мостовой выпрямитель, фильтр и стабилизатор на 5В (7805).

ВОСЬМИКРУТ



3. БЛОК ПИТАНИЯ

Блок питания (БП) - основной узел необходимый для запитки платы управления частотного преобразователя, катушки реле фильтра выпрямителя, а также вентилятора обдува. От надёжности работы источника питания напрямую зависит надёжность и живучесть всего частотного преобразователя. Предпочтение отдаётся импульсным источникам питания, но возможно использование и низкочастотного трансформаторного варианта питания с применением стабилизатора, удовлетворяющего необходимым требованиям, которые будут определены далее.

3.1 Особенности питания и требования к БП

Схемное решение “Восьмикрут” обеспечивает полнофункциональную работу преобразователя при наличии всего одного гальванически-изолированного от сети канала питания. На контроллере и контактах кнопок при этом существует **высокий потенциал относительно земли**. Влияния на работу контроллера при штатной схеме это не оказывает, но необходимо учитывать этот факт при монтаже и применять **двойную изоляцию органов управления (пластмассовые кнопки и ручки)**. При необходимости развязки контроллера, нужно применять два изолированных канала питания. Однако без заземления через фильтрующие Y конденсаторы в БП потенциал контроллера остается высоким, особенно по высокой частоте. Заземление общего минуса контроллера и (или) его электрическое соединение с металлическим корпусом при этом нужно рассматривать отдельно. Это может создать дополнительные пути для помех. Предполагается основная эксплуатация устройства в двухпроводных сетях, где отсутствует проводник заземления.

В общем случае для упрощения изготовления импульсного трансформатора БП рекомендуется применять один гальванически изолированный от сети канал питания. При металлическом корпусе нужно надёжно изолировать от него все компоненты схемы, а сам корпус в целях безопасности может быть заземлён.

В случае использования двух каналов, для питания драйверов следует использовать стабилизированный канал. От него питать и вентилятор обдува.

При необходимости дистанционного управления, целесообразнее использовать гальваническую развязку по сигналам управления. Один канал БП использовать для питания всей платы управления без развязки, а второй (развязанный) с напряжением 7-9В использовать для питания цепей вторичного управления (пульта и светодиодов оптопар, см. схему внешнего пульта). **Вторичные цепи пульта лучше запитывать от отдельного маломощного низкочастотного трансформатора.** Это упростит конструкцию импульсного трансформатора БП и обеспечит надёжное и безопасное дистанционное управление, особенно на металлообрабатывающих станках.



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Оптимальная величина напряжения питания драйверов, для получения качественной двухполярной раскачки затворов силовых ключей – 24В. Это напряжение также подходит **для питания катушки реле**, шунтирующего цепь плавного заряда фильтра выпрямителя. Напряжение большей величины может вызвать перегрузку драйверов и повышенный нагрев стабилизаторов напряжения для контроллера, поэтому нецелесообразно. Пониженное напряжение снижает максимальный ток перезаряда затворов и отрицательную составляющую напряжения на затворе, что ухудшает коммутацию, особенно мощных транзисторных IGBT модулей. Также следует иметь в виду, что от изменения величины напряжения питания будет зависеть момент срабатывания реле и пропажа логического уровня контроля пониженного напряжения.

Для применённой схемы драйверов представляет опасность спад напряжения питания (независимо от внутренней защиты UVLO HCPL3120) со скоростью, при которой происходит существенное проседание амплитуды положительной полярности напряжения раскачки затвора (примерно >3В/с). При пропаже сетевого напряжения в работе, ток через двигатель и силовые транзисторы будет идти ещё некоторое время, пока DC напряжение не разрядится ниже порога и программная защита не снимет сигналы управления. В этот переходной момент ($1 \div 2$ с) БП должен обеспечивать питание драйверов и управления стабильным или медленно изменяющимся напряжением (скорость спада <<3В/с). Иначе, **при прохождении через ключи силового тока, резкое проседание напряжения питания драйвера может вызвать повреждение транзистора из-за неполного открытия.** Для обеспечения надёжности **такой режим должен быть исключён.** Это может быть достигнуто увеличением ёмкости конденсатора фильтра импульсного БП по высокой стороне (≥ 150 мкФ) и возможности работы до $1/3$ оставшегося напряжения (100В). Однако, теоретически возможен режим пропажи питания при работе двигателя в генераторном режиме (торможение снижением частоты с инерционной нагрузкой) и тогда ток ключей и напряжение DC звена будут оставаться высокими, ошибки по снижению напряжения не будет, а срыв питания в этом режиме может привести к аварии. Для избежания этой вероятности было принято решение **запитывать импульсный блок питания от DC звена преобразователя через развязывающий диод D20.** В связи с этим была увеличена ёмкость гасящего конденсатора плавного заряда C33, для успешного запуска БП под нагрузкой и возможности дальнейшего заряда фильтра, и добавлена возможность отдельной цепи запитки БП от сети через диод D21 и резистор Rбп (см. схему силовой части Рис 3).

В дальнейшем при экспериментах с нештатным торможением (торможение инерционной нагрузки снижением частоты с 75Гц или при подключении звездой, когда отсутствует подмагничивание) наблюдалось опасное для транзистора в БП возрастание напряжения DC звена и, было решено применять в нём **полевые транзисторы на 800В.** Установка цепи защиты от превышения напряжения DC на DA09 (см. схему управления Рис.2) смягчает это требование к транзистору, в



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



зависимости от порога срабатывания VDZ. При использовании штатной схемы с VDZ 350В – **защита отработывает при напряжении DC = 370÷380В**, что будет находиться уже близко к предельному верхнему значению напряжения для обратногоходового БП с напряжением ключа 600В (в зависимости от *отражённого напряжения* в БП).

Общий **ток нагрузки БП** по одному общему каналу питания **складывается из тока потребления вентилятора, и платы управления**. Плата управления, а именно драйвера и индикатор **потребляют при питании 24В не более 250мА + ток катушки реле**. Ток потребления схемой дистанционного управления от отдельного источника **максимум 75мА**.

Исходя из вышесказанного определяем требования к БП:

- **надёжная гальваническая развязка канала выходного напряжения от входного напряжения**
- **диапазон входных напряжений -150÷450В (питание БП от DC- звена)**
- **стабилизированное выходное напряжение 24В +/- 5%**
- **выходной ток не менее 500мА+ток реле + ток вентилятора обдува**
- **входной диапазон при питании БП от сети ~110-250В**
- **возможность выдачи стабильного выходного напряжения в течение 1,5-2с после пропажи питающего сетевого напряжения**

Применение заводских импульсных БП выходом 24В рассчитанных на напряжение сети 230В должно рассматриваться отдельно. Питание их от DC-звена допускается только с применением в схеме управления частотным преобразователем цепи защиты от превышения напряжения DC (370÷380В). Для повышения надёжности БП возможно заменять в нём штатный полевой транзистор на аналог с большим напряжением сток-исток (800В).

Работа БП с запиткой от сети 220В возможна при наличии дополнительной защиты от пропажи сетевого напряжения (например, как при использовании пульта с опторазвязкой, см. п. 2.6). Допускается запитка БП от сети 220В, при отсутствии тормозных режимов работы преобразователя частоты.

В данном частотном преобразователе для его надёжной работы рекомендуется использовать блоки питания, соответствующие вышеперечисленным требованиям.



сердечнике зазор мал или вообще отсутствует (**Ungapped**) то также подкладываются прокладки из бумаги под каждый керн (2 слоя, если совсем без зазора).

Первичную обмотку и обмотку питания микросхемы следует мотать проводом ПЭТВ-2 диаметром не менее 0,2мм, а обмотку на 24В диаметром 0,5-0,71мм. Первой наматывается вся первичная обмотка, желательно с межслойной изоляцией. Затем вторичная обмотка на 24В. Её витки желательно распределять равномерно по всей площади намотки. Обмотка питания микросхемы наматывается последней. Следует уделять особое внимание качеству изоляции обмоток друг от друга. Для межобмоточной изоляции лучше всего использовать лакоткань. Также обратить внимание на обозначение выводов начала и концов обмоток, для исключения ошибок.

Красным цветом на схеме отмечены нагревающиеся элементы. Наибольший нагрев возможен у резистора демпфера R8. При монтаже данные элементы необходимо приподнимать над платой (резисторы), а на диод D2 и транзистор T1 устанавливаются небольшие теплоотводы. Например, к ножке диода припаивается небольшой флажок из медной фольги, а на транзистор устанавливается маленькая алюминиевая пластинка-радиатор.

Синим цветом на схеме отмечен помехоподавляющий Y конденсатор C10. На таких типах конденсаторов есть соответствующие надписи. Изоляция конденсатора имеет повышенную прочность на напряжение 2кВ и выше. Использование иных типов крайне не рекомендуется и может быть опасным в плане надёжности гальванической развязки.

В качестве силового ключа используются скоростные полевые транзисторы на напряжение **800В**. Допускается применение транзисторов на напряжение не менее 600В (БП будет уязвим при нештатном превышении DC напряжения выше 370В).

Проверку работоспособности собранной схемы БП можно произвести следующим образом:

- 1. Проверить комплектацию платы на отсутствие ошибок и замыканий при пайке, наличие всех деталей, смыть остатки флюса.*
- 2. Соблюдая осторожность (желательно использование разделительного трансформатора), произвести первый запуск схемы БП от переменного напряжения 220В через лампу накаливания на 40-60Вт без нагрузки. При этом лампа должна слегка вспыхнуть и погаснуть. Используя электроизмерительный прибор необходимо измерить постоянное выходное напряжение БП на холостом ходе. Оно должно соответствовать диапазону 23-25В и держаться некоторое время после отключения питания БП. При несоответствии диапазону напряжений подобрать сопротивление резистора R7, или также возможна замена одного из стабилитронов D4, D8.*
- 3. Далее понадобятся резисторы на 100Ом и 200Ом для нагрузки БП.*



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Контролируя напряжение прибором, подключить нагрузку 100Ом к выходу БП. Напряжение при этом должно оставаться в диапазоне, а нить лампы накаливания может слегка начать светиться.

Затем подключить кратковременно нагрузку 200Ом (5-ти ваттный резистор, ток 1,2А). При этом должна начать ярко вспыхивать лампа накаливания с характерным свистом БП.

4. Проверить режим короткого замыкания БП. Осторожно замкнуть выход БП накоротко. При этом лампа накаливания не должна вспыхивать или светиться, а БП должен начать издавать щелчки. Это является обычным режимом для БП при запуске, и он может оставаться в нём долгое время. Если всё именно так, то можно убирать лампу и включать БП напрямую.
5. Проверить выходное напряжение при достаточном токе нагрузки. Для данного БП это 1А, берём с запасом 1,2А. Включить БП напрямую к переменному напряжению (без лампы накаливания) и, контролируя прибором выходное напряжение, подключить в качестве нагрузки резистор 200Ом (он будет прилично греться). Напряжение при этом должно остаться в диапазоне и никаких звуков от БП быть не должно, что свидетельствует о нормальной работе собранной схемы.
6. Возможен также дальнейший прогон БП на две последовательно включенные лампы накаливания 12В 8Вт в качестве нагрузки. При выключении питания БП должна быть чётко видна задержка перед пропажей напряжения на выходе. В дальнейшем, после сборки и отладки остальных узлов частотного преобразователя рекомендуется подключать питание БП от электролитов фильтра силового выпрямителя (см. схему силовой части Рис 3).
7. При наличии возможности получения пониженного напряжения (например, ЛАТР) можно проверить БП на напряжении 120-140В переменного тока, при этом аналогично должно держаться выходное напряжение 24В при токе нагрузки 1,2А.



FAQ Вопрос-ОТВЕТ

Информация взята с форума <http://www.radiokot.ru/forum/viewtopic.php?t=106385>

1. Блок питания от принтера 24 вольта 0,67 амперы. Его достаточно будет?

Маловат, хотя бы на 1А, будет надёжнее.

2. Зачем в блоке питания на 24 вольте, установлен конденсатор С10 4.7n?

Y-конденсатор от помех, проникающих из первички во вторичку через межобмоточную ёмкость импульсного трансформатора, замыкает петлю помех собой, а не через плату управы частотника.

3. Какой ток должен выдавать блок питания для питания драйверов при нагрузке 3-4 кВт? Какое минимально допустимое напряжение питания оптодрайверов?

Ток потребления управления с показометром в работе не более 250мА. Для осязательной двухполярки на схему подавать надо от 18В, а у самих дров HCPL UVLO на 12В Выкл и 14Вкл.

4. Чем заменить UF302?

Можно ставить UF5402, можно и UF5408 или те-же HER308

5. Для пробного пуска собираюсь использовать отдельный БП на 24 вольта. Есть ли принципиальная разница, что включить сначала: 220в в розетку и сразу же БП на 24в или же наоборот? Или не принципиально?

Лучше чтоб сначала БП 24В, а потом сила. Можно одновременно. Главное - не выключайте БП 24В при работающем приводе.

6. Нашел кольца M2000NM 28-16-9 вопрос будут ли они работать?

Да, будут.

7. Мне просто сказали, что МК и управление силовой части лучше запитать от двух гальванически развязанных источников. Собираю по схеме с крутилкогенератором.

Или можно все запитать вместе от одного источника 24В?

Да, можно всё запитать от одного канала 24В. На плате просто предусмотрена возможность запитки от двух разных источников, но это приобретает смысл, когда есть много надстроек над контроллером с собственными землями, платами и заземлёнными питаниями.



4. УПРАВЛЕНИЕ И ПРОВЕРКА УЗЛОВ

Данный раздел посвящен описанию имеющихся на момент выхода документа вариантов схем управления и программного обеспечения частотного преобразователя “Восьмикрут”. Информация в этих разделах может обновляться по факту появления обновлений.

4.1 Варианты программ и схем управления частотным преобразователем

На данный момент всю совокупность программ можно разделить на 2 группы:

- под моторный контроллер PIC16F628(A)
- под моторный контроллер PIC16F648A

По схемной реализации индикации обе группы можно разделить на:

- схемы управления без показометра (индикация светодиодами)
- схемы управления с показометром (трёхзнаковый семисегментный индикатор на контроллерах PIC16F630 или PIC16F676)

И, по схемной реализации управления частотой можно разделить на:

- управление частотой кнопками
- управление частотой задатчиком (крутилкой, PIC12F675)

Доп. опция

- управление двигателем постоянного тока

Для контроллера PIC16F648A имеются также варианты программ для однофазных двигателей и для трёхфазных мощностью $\leq 550\text{Вт}$, $\leq 1500\text{Вт}$ и $\leq 4000\text{Вт}$ позволяющих **получать номинальный момент на низких оборотах при соответствующей мощности мотора**. Программа на конкретную мощность **может быть использована и для меньших мощностей моторов**.

Обновлённые архивы всех видов программ под все контроллеры можно найти [здесь](#), а также [здесь](#). **Описание** работы конкретной программы имеется в соответствующей с ней папке (файл с названием “**Читать**”). Также в универсальных архивах есть схемы и платы управления под каждый вариант, программы и схемы под показометр и задатчик. Для упрощения нахождения нужной программы теперь по вышеуказанным ссылкам имеется общий архив для PIC16F648A с удобной иерархией каталогов, согласно приведённой ниже структурной схеме.

Максимально простой вариант частотного преобразователя имеет всего один контроллер и кнопки управления. Если понадобится использование, например, варианта с задатчиком, но без индикации частоты – это возможно, т.к. наличие или отсутствие индикатора не оказывает влияния на работу моторного контроллера.



Структура программ 628 контроллера (шаг 1,25Гц)

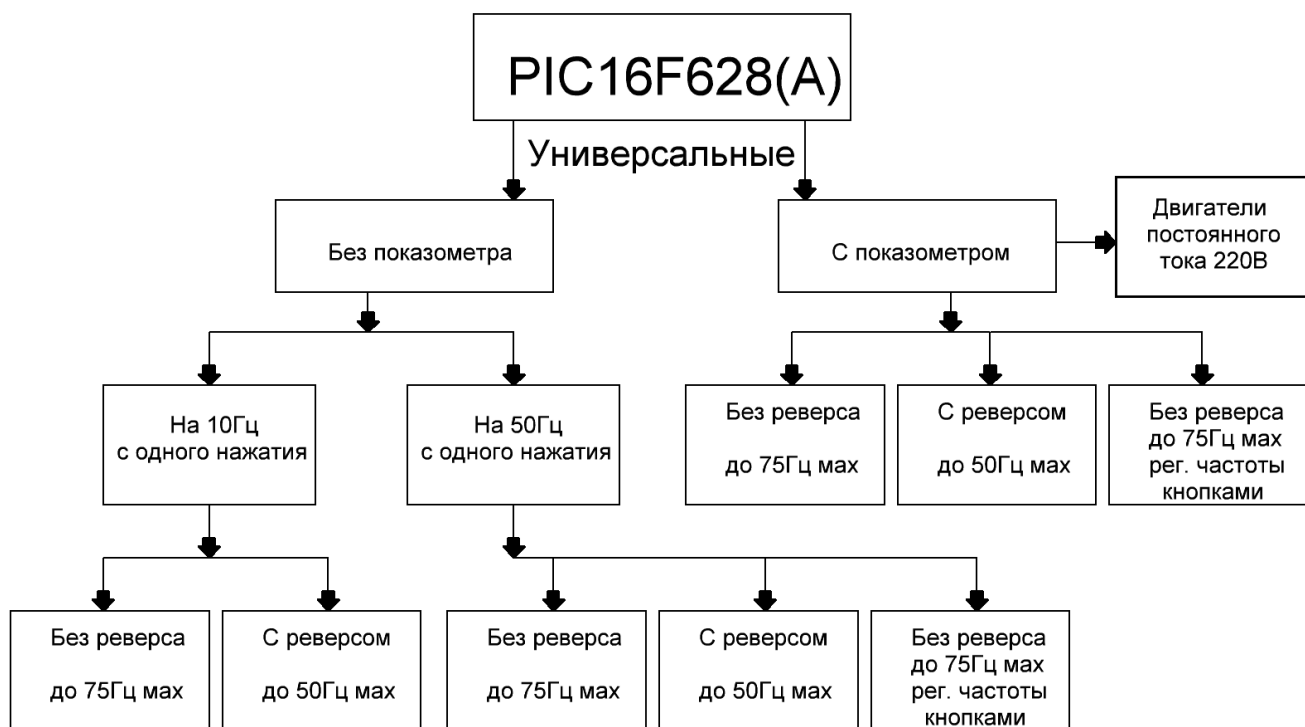


Рис 10А. Структурная схема различных вариантов программ “Восьмикрут” 628



Структура программ 648A контроллера

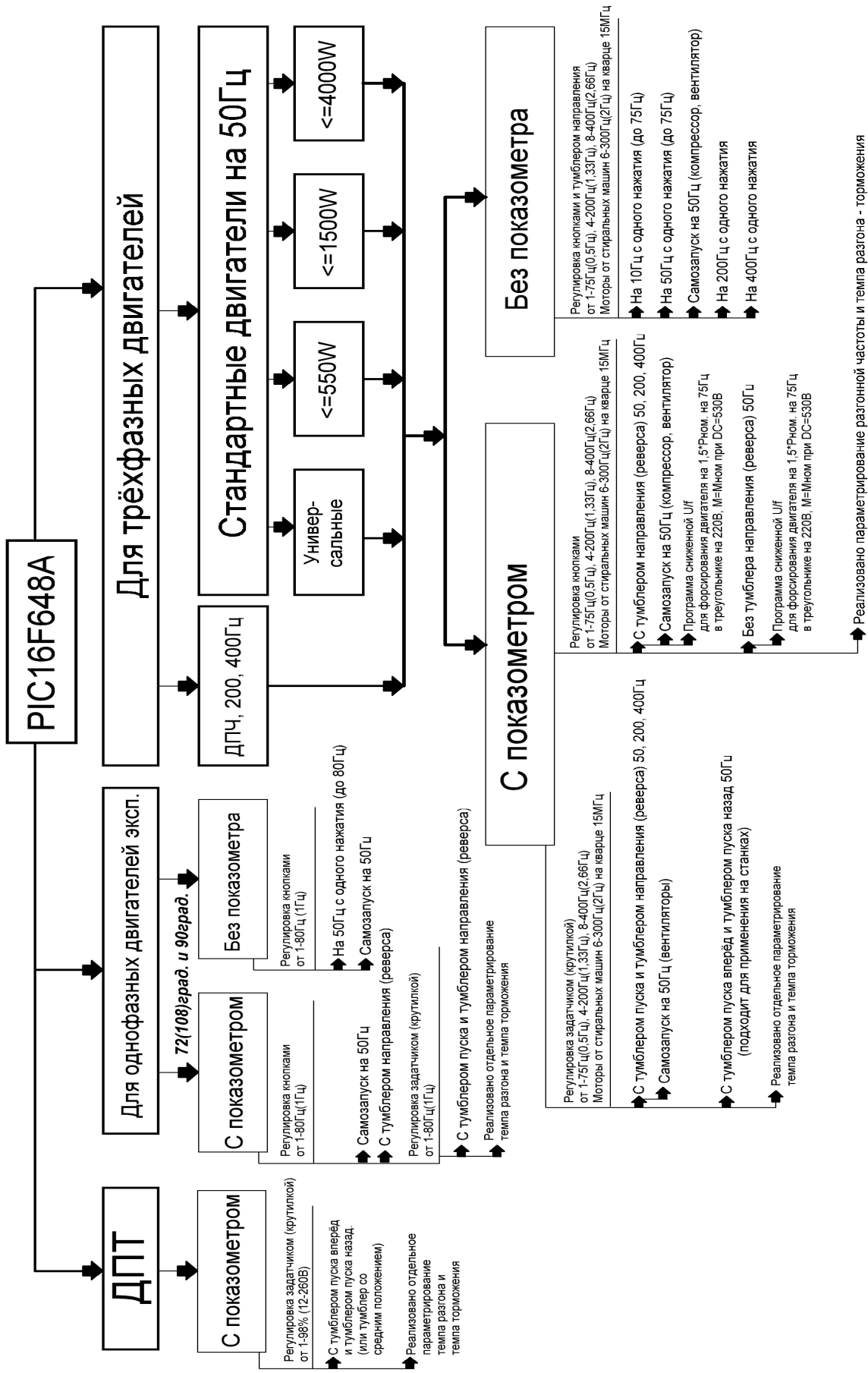


Рис 10Б. Структурная схема различных вариантов программ “Восьмикрут” 648А



4.2 Программирование контроллеров

В самом простом варианте частотного преобразователя потребуется запрограммировать всего один контроллер PIC16F628A или PIC16F648A имеющий большие возможности. При использовании индикатора частоты и ошибок программируется ещё контроллер PIC16F630(676). Для цифрового генератора задатчика частоты, программируется контроллер PIC12F675 (или PIC16F676).

Что необходимо для программирования:

- Компьютер (с COM портом для рекомендуемого программатора)
- Программатор
- Обслуживающая программатор программа для компьютера (прошивальщик)
- Шестнадцатеричный файл программного кода с расширением HEX

Семейство контроллеров PIC16 программируются достаточно просто, по последовательному интерфейсу, фактически по двум проводам – данных и тактовому. Также необходимо подать питание 5В на микроконтроллер и подать высокое напряжение +12В на вход, включающий режим программирования. Для многих контроллеров имеется режим и низковольтного программирования (LVP), но при этом теряется ножка порта. В данном случае необходима работа всех портов и поэтому контроллеры для частотного преобразователя программируются в обычном режиме с напряжением 12В. Для создания этих условий имеется множество программаторов. Режим внутрисхемного программирования не предусматривался.

Используемые устройства PIC16 имеют 3 типа памяти: FLASH (память программ), EEPROM (память данных), SRAM (оперативная память). В процессе программирования, в зависимости от программы, осуществляется запись программного кода в FLASH память программ, запись данных в EEPROM, а также запись конфигурационных бит (они же “фьюзы” от fuse).

HEX файл программы содержит внутри все необходимые данные, в том числе и по конфигурации. Конфигурация определяет режим тактирования контроллера (НЧ-ВЧ кварц, внутренний RC – генератор и т.д.), задержка включения при подаче питания, режимы сброса и т.п.

В качестве особых, следует отметить конфигурационные биты защиты программного кода и данных. При их установке и записи конфигурации, память программ и данных контроллера оказываются недоступными для чтения (при попытках чтения содержимого памяти считываются нули). В связи с этим возникало множество проблем при проверках записанного кода. В зависимости от настроек программы прошивальщика, можно осуществлять проверку записи кода и данных при программировании (запись – чтение, но до записи бит конфигурации), а также



уже после полного программирования. И соответственно во втором случае, если биты защиты установлены, проверка кода не увенчается успехом. На сегодняшний момент на почти всех программах частотного преобразователя “Восьмикрут” установлена конфигурация с выключенными битами защиты. Проблем с чтением памяти устройства быть не должно.

Пример рекомендуемой простой схемы программатора JDM:

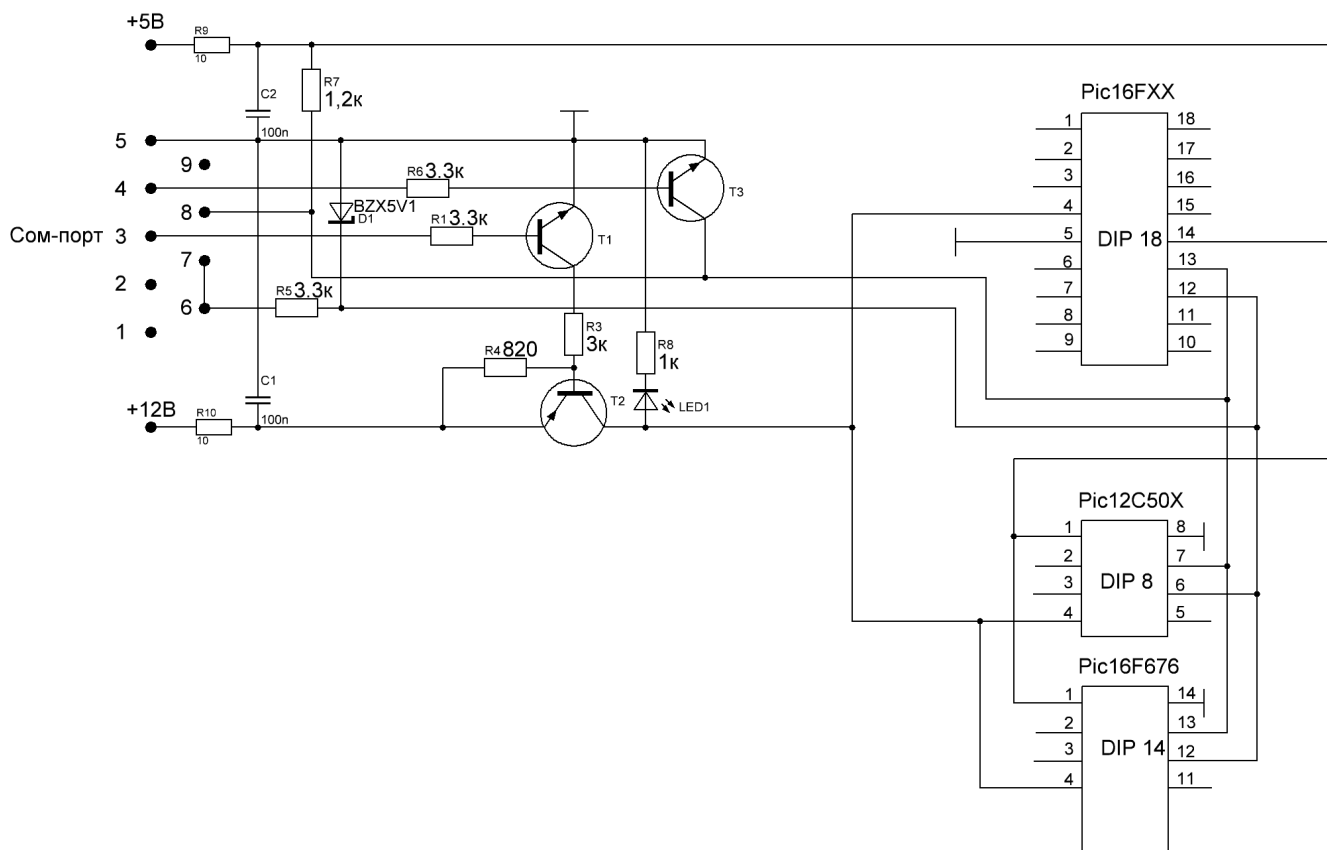


Рис 11. Принципиальная схема программатора JDM с внешним питанием.

Схема может быть запитана от отдельного источника напряжений, а может и от самого БП компьютера, с использованием стандартного разъема питания 5-12В. Архив со схемой в формате SPL и GIF имеется [здесь](#) и [здесь](#)

В программах прошивальщиках при использовании данной схемы необходимо в настройках ввода-вывода включать *инверсию данных вывода (invert data out)*. Программатор многократно и успешно использовался для программирования контроллеров совместно со многими программами прошивальщиками (IC-Prog, PICprgm и др.)

Эти программы и информацию по ним можно найти в сети интернет.

Программирование PIC16F628A-648A не имеет никаких особенностей. В программу прошивальщик загружается HEX файл и стандартно программируется.

Особенностью программирования PIC16F630 (676) и PIC12F675 является то, что новые контроллеры хранят в памяти заводское значение калибровочной константы



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



для внутреннего RC-генератора (оно же осциллятора). В схемах индикатора (показометра) и задатчика (крутилки) им предстоит тактироваться от внутреннего RC-генератора, частота которого может программно подстраиваться и стандартно должна быть равна 4МГц. Заводское численное значение величины подстройки своё для каждого устройства и записано в последнюю ячейку памяти программ. Её *необходимо считать и сохранить*. Многие программы прошивальщики делают это автоматически, о чём выдаётся сообщение. Но надёжнее *сначала произвести обычное чтение содержимого памяти нового контроллера и сохранить куда-либо значение, которое будет в последней ячейке памяти в виде 34XX*, где 34 – это ассемблерный код команды `retlw`, а XX – может быть любое шестнадцатеричное число - это собственно сама константа. Например, можно сохранить его, нацарапав число прямо на брюшке микросхемы. В дальнейшем, если случайно затрётся, то можно легко восстановить, прописав вручную эти самые 34XX в последнюю ячейку памяти после открытия HEX файла программы.

Если вдруг значение константы оказалось утерянным, или записано **неверное значение** и контроллер работает некорректно, (либо вообще не стартует), то нужно **записать среднее значение. Оно равно 3480**. Обычно работоспособность восстанавливается. Затем есть возможность, например, для контроллера задатчика, методом подбора установить значение, при котором генерируется нужная частота. Нужно иметь в виду, что число 80 шестнадцатеричное, что соответствует числу 128 в десятичной системе. Значение константы в десятичной системе всегда должно быть кратно числу 4.

Программы для индикатора частоты на **PIC16F630 (676)** (показометр) необходимо выбирать под конкретную используемую программу моторного контроллера **PIC16F628A-648A**, на 50, 200, 400Гц. А также под схему (**прошивки с буквой m и без неё отличаются разводкой ножек**) и используемый индикатор (общий анод или общий катод).



4.3 Проверка платы управления

Платы управления частотным преобразователем однотипны и имеют лишь небольшие отличия в плане разводки управляющих дорожек согласно применяемому схемному решению.

Данный пункт описывает начальную проверку изготовленной платы управления частотного преобразователя без наличия силовой части.

Для проверки готовой платы необходимо:

- Источник питания 24В, >0,5А (изготовленный штатный или любой другой)
- Укомплектованную плату и прошитый моторный контроллер
- Мультиметр
- Осциллограф (крайне желателен)
- Соединительные провода, кнопки (тумблеры) управления, светодиоды
- Батарейка на напряжение 4,5В
- Конденсатор 0,1мкф для проверки драйверов на емкостной нагрузке

Проверку рекомендуется проводить по пунктам, перечисленным ниже:

1. Внешний осмотр печатной платы, **проверка на отсутствие ошибок пайки**, наличия всех деталей. На данном этапе выявляются возможные “ляпы” при изготовлении. Припаивание питающих проводов, подключение кнопок управления и светодиодов к плате согласно применяемой схеме.

2. Формирование питания верхних драйверов HСPL посредством установки трёх временных перемычек. **При проверке драйверов без силовых транзисторов, необходимо подключить выводы 8, 12, 16 к минусу питания** (просто поставить перемычки 8-10, 12-14, 16-18).

3. **Проверка при первой подаче напряжения 24В на плату управления без контроллера.** Измеряем напряжение питания + 5В на 14 ножке и **напряжение высокого уровня на 4 ножке панельки контроллера – должно быть примерно 4,3В. При зажатой кнопке “Сброс” напряжение на 4 ножке должно отсутствовать.**

4. **Проверка запуска контроллера на плате по индикатору готовности или по измерению лог. уровней.** При подаче питания на плату управления через 2 секунды должен начать мигать светодиод готовности, а в программах с показометром, где светодиод готовности не используется, на второй ножке контроллера появляется постоянно высокий лог. уровень +5В (это соответствует ошибке F0.2). При нажатии и отпуске кнопки “Сброс” высокий уровень пропадает и через 2с появляется снова.

5. **Имитация наличия напряжения DC-звена. Выключить питание, замкнуть временной перемычкой коллектор с базой у транзистора Т4. Включить**



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



питание и проверить наличие напряжения +23В на выводах к реле KV и вход контроллера в готовность по постоянному свечению светодиода готовности (а в программах с показометром высокий уровень на 2 ножке уже не появляется).

б. **Запуск генерации ШИМ** из состояния готовности кнопкой пуск (или тумблером), возможна регулировка частоты и её контроль по индикаторным светодиодам. Произвести **проверку выходных управляющих сигналов драйверов осциллографом**. Форма управляющих импульсов на каждой из шести затворных пар должна быть следующей:

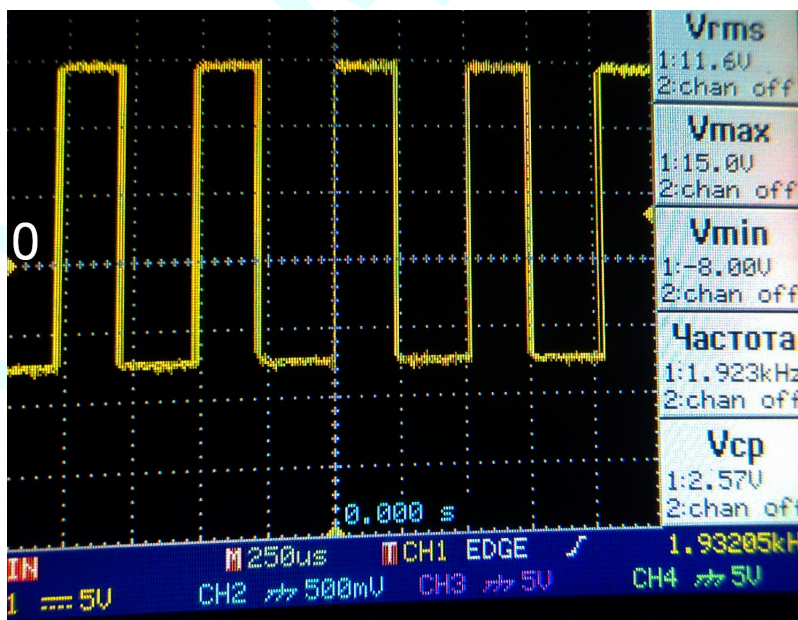
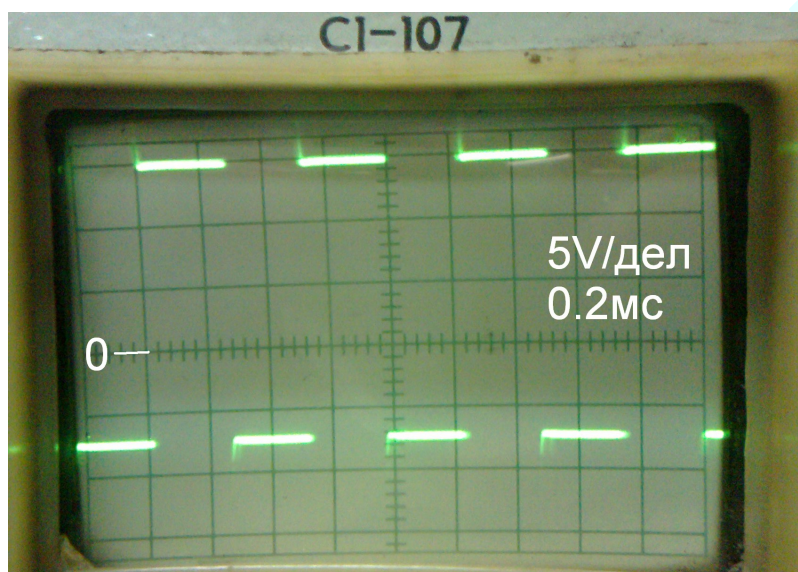


Рис 12. Осциллограммы управляющих импульсов на выходе платы управления при генерации контроллером выходной частоты 1Гц



Форма управляющих ШИМ сигналов при генерации частоты 50Гц представлена ниже:

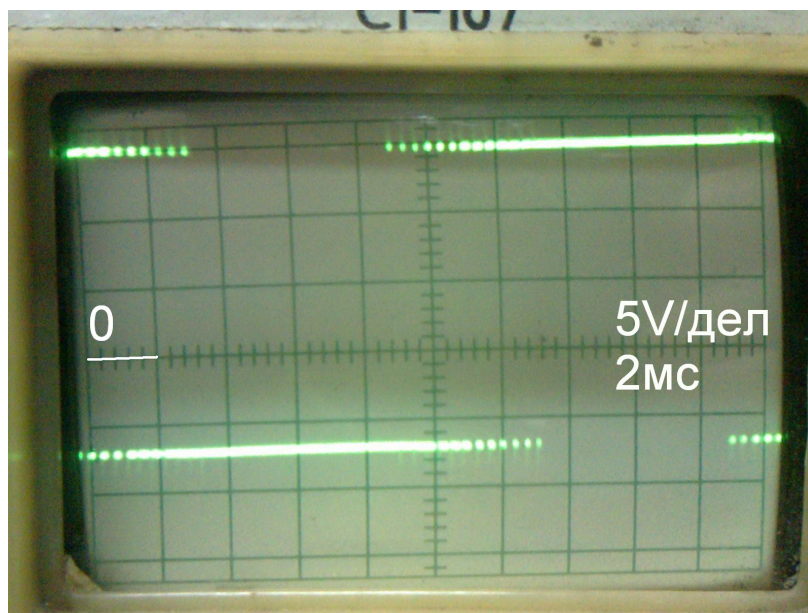


Рис 13. Осциллограмма управляющих импульсов на выходе платы управления при генерации контроллером выходной частоты 50Гц

С помощью осциллографа также возможно выполнить **визуальную проверку наличия мёртвого времени (dead time)**. Для этого нужно измерить сигнал между затворными выводами одной стойки, например между 9 и 11. Сигнал должен выглядеть следующим образом:

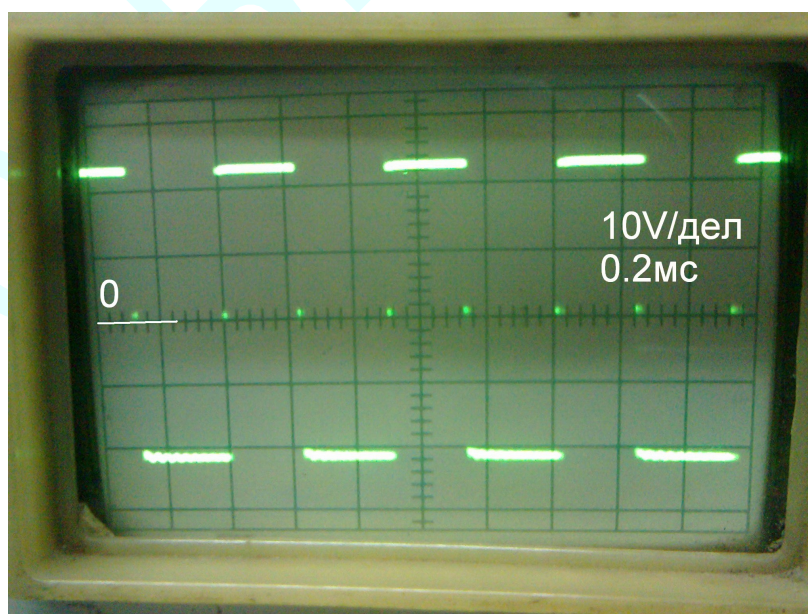


Рис 14. Осциллограмма сигнала между затворными выводами одной стойки ключей для проверки наличия мёртвого времени при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

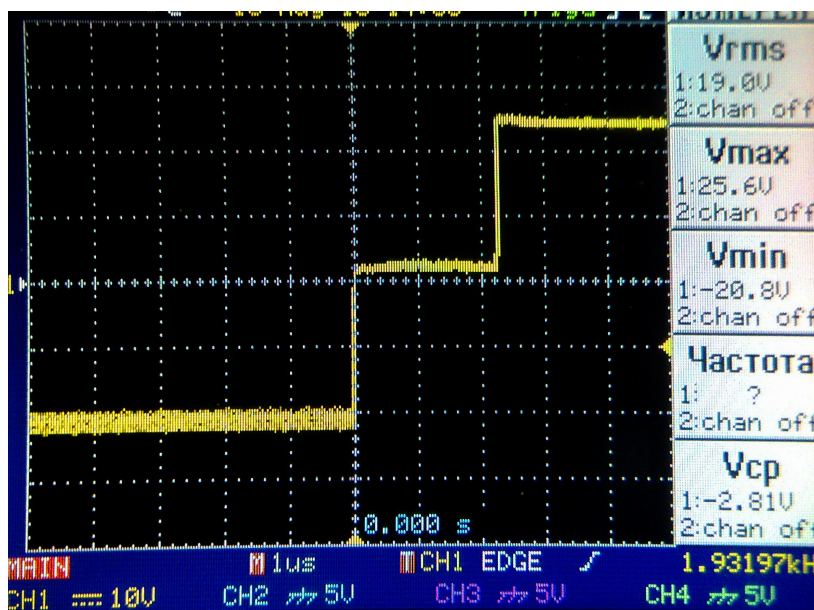


Рис 15. Цифровая осциллограмма сигнала между затворными выводами одной стойки ключей для проверки наличия мёртвого времени (2мкс) при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

Также желательно выполнить **проверку драйверов на ёмкостную нагрузку**. Для этого нужно нагружать выходные пары на ёмкость 0,1мкФ и контролировать форму сигнала осциллографом. Она должна быть одинаковой и выглядеть так:

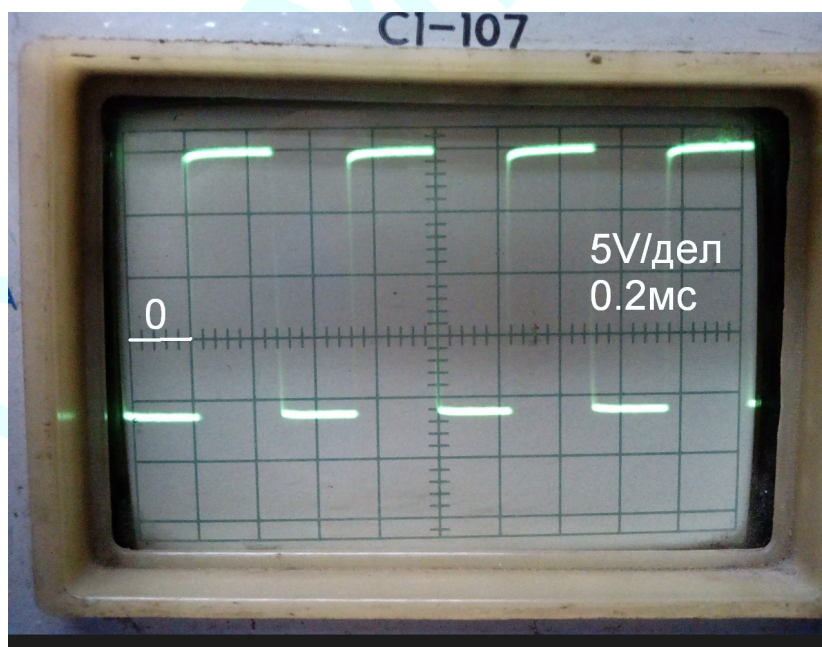


Рис 16. Осциллограмма импульсов на выходе платы управления на ёмкостную нагрузку 0,1мкф при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

При отсутствии осциллографа имеется возможность косвенно проверить наличие импульсов, измерив мультиметром в режиме «переменки» напряжение на выходных затворных парах. При питании драйверов напряжением 24В и генерации



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



контроллером частоты 50Гц должны быть получены примерно одинаковые значения напряжения в диапазоне 11,5-13В.

7. Проверка работы схемы токовой защиты имитацией токового сигнала батарейкой. Кратковременно (при длительной подаче возможен чрезмерный нагрев резистора R33) подать напряжение батарейкой между выводами 1 и 2 соблюдая полярность: + на вывод 1. При этом должно произойти снятие импульсов управления и сброс контроллера. О срабатывании триггера защиты просигнализирует светодиод “Сверхток”, пропадёт напряжение высокого уровня на 4 ножке контроллера и появится снова только после нажатия и отпускания кнопки “Сброс”.

8. Проверка срабатывания защиты по превышению напряжения DC.

Данная защитная цепочка включает в себя всего 4 элемента и обычно не требует проверки. Однако можно это сделать, подав напряжение 24В от питания платы на выводы 3 и 4 соблюдая полярность, а затем кратковременно перемкнуть супрессор VDZ. При этом должно произойти **выключение генерации импульсов и должен начать мигать светодиод готовности (а в программах с показометром на второй ножке контроллера появляется постоянно высокий лог. уровень +5В).**

При нормальной отработке этих пунктов, если всё работает чётко, можно приступать к проверке с силовой частью, удалив установленные временные перемычки для питания драйверов, коллектор-эмиттер T4 для имитации наличия DC-звена, а также освободить точки 3 и 4 для дальнейшего подключения высокого напряжения.



4.4 Проверка индикатора (показометра)

Данный пункт описывает проверку работоспособности изготовленной платы индикатора (см. п 2.4) для визуализации работы частотного преобразователя. Имеется возможность выполнить начальную проверку без платы управления, а затем проконтролировать работу непосредственно в связке с платой управления.

Понадобится для проверки:

- Источник питания - отдельный на 5В или использование питания от платы управления, или батарейка на 4,5В, индикатор запускается, только с чуть меньшей яркостью свечения сегментов
- Соединительные провода

Проверку рекомендуется проводить по пунктам, перечисленным ниже:

1. Внешний осмотр печатной платы, **проверка на отсутствие ошибок пайки**, наличия всех деталей. На данном этапе выявляются возможные “ляпы” при изготовлении. Припаивание питающих и сигнальных проводов.
2. Подача питания на плату. При этом сигнальные провода никуда не подключены. **На индикаторах должны высветиться показания F0.1.**
3. При отображении F0.1 **подключить сигнальный вывод RA2(RA4) к минусу питания** (подаём низкий лог. уровень). При этом **показания должны измениться на 0.0.**
4. Далее **фиксируем на минусе** предыдущий сигнальный вывод и подаём на **второй сигнальный вывод RA3** плюс от питания (высокий лог. уровень), индикация при этом кратковременно выключается и **высвечиваются показания F0.2.** При дальнейшем отключении **вывода RA3** от плюса показания **F0.2** остаются, а при подключении вывода к минусу питания (при этом разрядится конденсатор С3) возвращаются **показания 0.0.**

При проверке не касаться руками сигнальных выводов.

Если все пункты выполняются чётко, то индикатор функционирует правильно и можно его проверять в связке с платой управления, соединив согласно применяемой схеме.

В связке с платой управления контроллер индикатора будет получать сигналы от моторного контроллера и должен осуществлять отображение текущей выходной частоты, а также с его помощью можно просматривать и устанавливать параметры разгона-торможения в зависимости от конкретной программы. Достаточно запустить плату управления в работу (см. п 4.3) с подключенным индикатором и проконтролировать его работу.



4.5 Проверка задатчика частоты (крутилки)

Данный пункт описывает проверку работоспособности изготовленной платы задатчика частоты (см. п 2.5) для подачи сигнала задания частоты на плату управления.

Для проверки работоспособности задатчика достаточно наличие факта генерации и изменения частоты импульсов, узел достаточно прост.

Понадобится для проверки:

- *Источник питания (отдельный на 5В или использование питания от платы управления, или батарейка на 4,5В, генератор также запускается.*
- *Соединительные провода*
- *Осциллограф или частотомер (при наличии)*
- *Мультиметр*
- *Наушники или динамик с резистором 100ом (для акустической проверки генерации)*

Возможные способы проверки, перечислены ниже:

1. *Внешний осмотр печатной платы, **проверка на отсутствие ошибок пайки**, припаивание проводов.*
2. *Подача питания на плату. При **нулевом положении крутилки**, когда **напряжение** на входе в контроллер **равно 0** - **генерация импульсов** на выходе **отсутствует**. При вращении крутилки и увеличении напряжения задания на выходе появляются **симметричные прямоугольные импульсы**. При наличии осциллографа наблюдаем форму и частоту импульсов. Амплитуда импульсов должна быть равна питающему напряжению. Их частота зависит от положения резистора крутилки – расчётный диапазон **от 50 до 2330Гц**. Возможны незначительные отклонения.*
3. *При наличии частотомера наблюдаем частоту генерируемого сигнала - диапазон **от 50 до 2330Гц**. Возможны незначительные отклонения. При утерянной константе осциллятора контроллера можно подогнать частоту перепиской с ручной коррекцией калибровочной константы, изменяя в большую или меньшую сторону, минимальный шаг изменения числа константы равен четырём (см. п.4.2)*
4. *При отсутствии приборов **факт генерации импульсов** можно определить мультиметром, измерив наличие переменного напряжения на выходе генератора при ненулевом положении резистора крутилки.*
5. *В качестве ещё одного варианта для проверки генерации можно использовать акустический метод – подключить на выход задатчика наушник или дина-*



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



мик через резистор 100-2000м и прослушать наличие и изменение частотного сигнала.

ВОСЬМИКРУТ



5. ИНВЕРТОР

Общие сведения и рекомендации.

Задача силовых импульсных систем – преобразование и управляемая передача энергии из питающей сети в нагрузку (а также в ряде случаев и обратно) с малыми потерями. Силовой трёхфазный инвертор является главным выходным узлом частотного преобразователя. Его надёжность зависит от правильного выбора силовых транзисторов (ключей), монтажа, скоростного режима, охлаждения. В данном разделе будут описаны большинство составляющих ответа на вопрос “Какие транзисторы поставить в “Восьмикрут”?”

В силовой части также имеется выпрямитель и конденсаторы DC-звена, с которыми работает инвертор. При построении преобразователя целесообразно сначала определять параметры инверторной части, а выпрямитель и ёмкость фильтра DC-звена выбирать уже после, на основе имеющихся данных. Ниже представлен наглядный рисунок для простого монтажа основных узлов преобразователя:

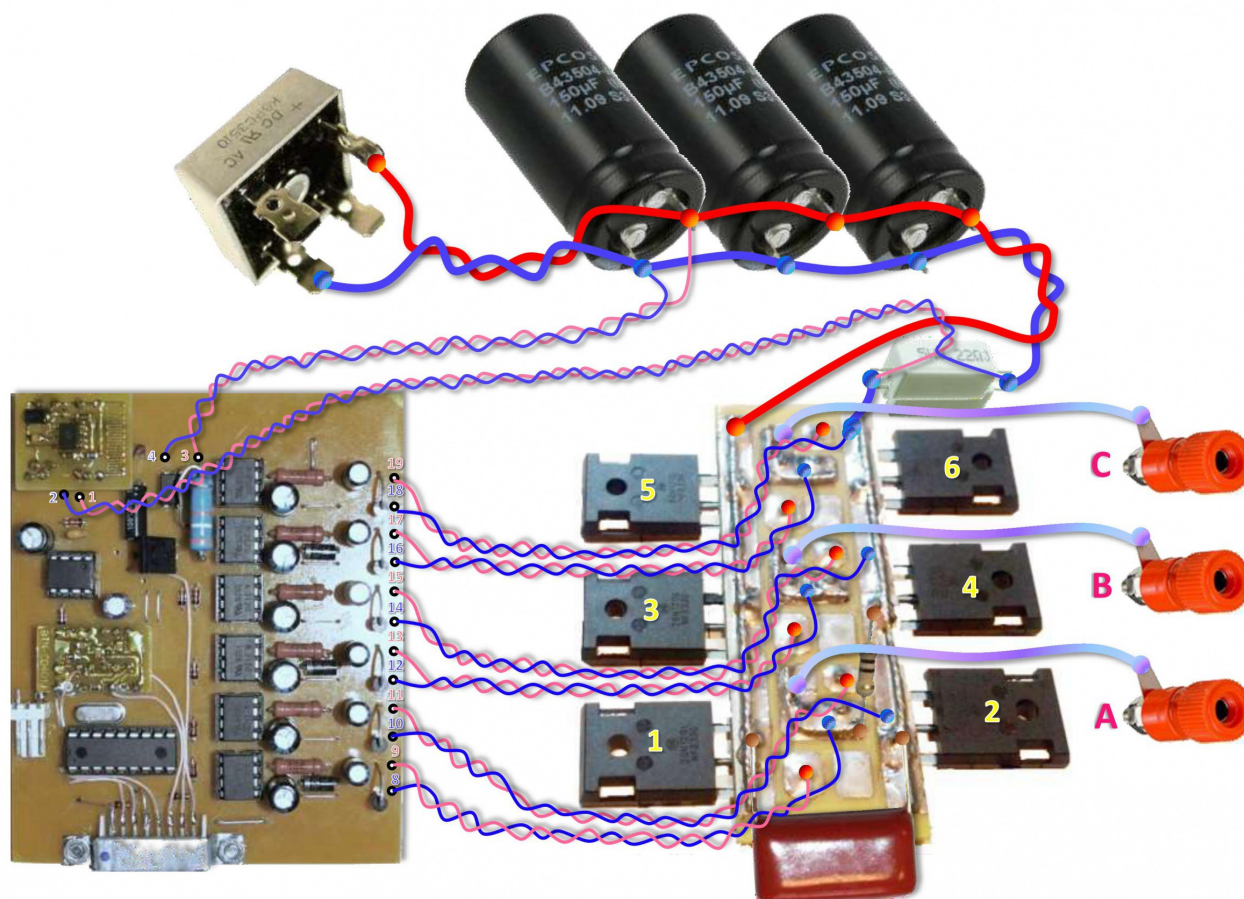


Рис 17. Монтаж основных узлов частотного преобразователя “Восьмикрут”



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Низкие потери и управление передачей энергии достигается за счёт работы активных элементов инвертора в ключевом режиме. Такой режим предполагает постоянное и очень быстрое включение-отключение тока в ветвях, при этом моментально изменяются параметры в электрической цепи – происходит коммутация с возникновением переходных процессов.

Основные явления в работе инвертора обусловлены законами коммутации:

- **Ток через индуктивность не может изменяться скачком**
- **Напряжение на ёмкости не может изменяться скачком**

Для любителей достаточно понять, что любой проводник обладает собственной индуктивностью и ёмкостью. Они могут быть выражены через его линейные размеры и форму. Индуктивность при этом является “инерцией” для тока, а ёмкость является “инерцией” для напряжения.

Индуктивность препятствует (индуктивное сопротивление) любому изменению тока в ней, индуцируя ЭДС самоиндукции, при этом накапливает (или сбрасывает) энергию магнитного поля ($E=LI^2/2$). При попытке резкого изменения тока через индуктивность ЭДС будет иметь очень большую величину.

Ёмкость препятствует (ёмкостное сопротивление) любому изменению напряжения на ней, создавая ток смещения, при этом накапливает (или сбрасывает) энергию электрического поля ($E=CU^2/2$). При попытке резкого изменения напряжения на ёмкости ток будет иметь очень большую величину.

Практическими примерами описанных явлений на практике, являются высоковольтная искра или дуга при разрыве цепи с индуктивностью и “светошумовые” эффекты при разряде конденсатора замыканием его выводов накоротко.

В инверторе преобразователя частоты коммутационные процессы происходят постоянно (с каждым фронтом управляющего импульса). Ток спадает в одной ветви цепи и тут-же нарастает в другой.. и т.д. При этом по определённому режимом работы алгоритму происходит управляемый обмен энергией между заряженной ёмкостью конденсаторов DC-звена и активно-индуктивной нагрузкой в виде двигателя. (Инвертор с таким принципом работы, где есть жёсткий источник напряжения и называется - инвертор напряжения).



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Основными критериями, определяющими выбор силовых ключей инвертора являются:

- **режим работы с жёстким переключением (HARD SWITCHING, Motorcontrol, Motor Drives), прямоугольная область безопасной работы (ОБР или SOA—Safe Operating Area)**
- **наличие быстродействующего обратного диода в корпусе с транзистором**
- **максимальное напряжение коллектор-эмиттер**
- **номинальный ток**
- **скоростные и токовые характеристики**

Рекомендуется применение именно IGBT транзисторов (или IGBT модулей), как более жёстких и имеющих меньшие потери при высоком питающем напряжении. Статические потери на IGBT при номинальных режимах подобны потерям диодов и пропорциональны среднему значению протекающего через ключ тока. Дальнейшее описание направлено на выбор и применение в силовой части именно дискретных IGBT транзисторов или IGBT модулей в разных конфигурациях с управлением от платы “Восьмикрута”. Применение интеллектуальных модулей со встроенными драйверами требует существенного изменения схемы, менее ремонтпригодно и должно рассматриваться отдельно.

Использование полевых MOSFET транзисторов должно рассматриваться отдельно и целесообразнее для низковольтных применений. Статические потери MOSFET омические, пропорциональны квадрату действующего значения протекающего через ключ тока. А также, канал открытого полевого транзистора имеет двустороннюю проводимость. При используемой комплементарной модуляции на стойке ключей, ток, который при применении IGBT проходит по диодам инвертора, при использовании MOSFET будет проходить по открытым каналам в обратную сторону (имеет значение при расчётах потерь).

Для многих IGBT транзисторов в параметрах (datasheet) указывается время “Short circuit withstand time” – время выдерживания тока короткого замыкания. Рекомендуется использовать ключи с данном параметром 10мкс. Этот параметр является одним из важных для обеспечения гарантированного выхода из режима короткого замыкания с сохранением дальнейшей работоспособности преобразователя.

При верном и простом монтаже силовых проводников (шин) инвертора с конденсаторами DC – звена и верном выборе ключей можно обеспечить надёжную работу транзисторов без дополнительных цепей защит. В большинстве случаев для надёжности достаточно применение простого снаббера в виде плёночного конденсатора, располагаемого на шинах DC-питания в непосредственной близости к силовым ключам (С36, см. силовую схему).

Нагрев инвертора складывается из статических потерь проводимости (прямое падение напряжение на открытом ключе при протекании тока нагрузки) и



динамических потерь (потерь переключения, переходные процессы открытия - закрытия). При увеличении частоты ШИМ динамические потери увеличиваются и, соответственно, имеет место снижение характеристик инвертора по току, возрастают требования к охлаждению силовой части.

Силовая электроника развивается, появляются новые электронные приборы с более совершенными характеристиками. Физические основы работы импульсных преобразователей остаются неизменными.

Далее подробнее рассмотрены критерии.

5.1 Режим HARD SWITCHING, Motorcontrol

Работа инвертора преобразователя частоты сопровождается постоянным жёстким переключением (коммутацией) тока между электронными приборами. Происходит обрыв и подхват непрерывного индуктивного тока двигателя с постоянным процессом обратного восстановления диодов.

При обрыве тока – индуктивность нагрузки будет продолжать гнать ток через запирающийся ключ, пока напряжение коллектор-эмиттер не превысит напряжение DC-звена плюс перенапряжение на DC-шине из-за рассеивания энергии, накопленной в паразитной индуктивности контура питания. Только тогда возникнет условие отпираания коммутирующего диода, и ток будет им перехвачен, а транзистор закроется. До этого момента в транзисторе выделяется энергия потерь выключения.

При подхвате тока – напряжение коллектор-эмиттер на открывающемся ключе будет оставаться высоким, пока он полностью не перехватит индуктивный ток нагрузки с дальнейшим следованием импульса тока обратного восстановления коммутируемого диода и перенапряжением на DC-шине при спаде обратного тока. В эти моменты в транзисторе выделяется энергия потерь включения, а в диоде энергия потерь обратного восстановления.

Также возникают дополнительные всплески тока, обусловленные ёмкостью монтажа и самих ключей, а также ёмкостью кабеля (между жилами и на землю), токи утечки через емкость двигателя.

Коммутационные всплески представляют собой в основном затухающие резонансные ВЧ колебания.

Поэтому, для инвертора частотного преобразователя необходимо выбирать транзисторы в паре с диодами, предназначенными для жесткой коммутации тока. Данные приборы имеют практически прямоугольную область безопасной работы открытия и закрытия (SOA—Safe Operating Area). Это означает, что могут коммутировать максимальный ток на максимальном напряжении. В документации для таких ключей присутствуют записи - **HARD SWITCHING, Motorcontrol, Motor Drives** и т.п. Также могут быть указаны сразу суммарные потери энергии при коммутации (Total Switching Loss) с учётом восстановления диода (например, для



ключей IRG4PH50UD), что упрощает в дальнейшем расчёт динамических потерь в инверторе (легче прикинуть, как будет греться инвертор на разной частоте ШИМ).

Транзисторы, имеющие в документации записи **“for the resonant or soft switching application”**, предназначены **для мягкой коммутации** в резонансных схемах и **не подходят для применения в инверторе преобразователя частоты**.

5.2 Обратный диод в корпусе с транзистором.

Диоды в инверторе являются необходимыми элементами силовой цепи. Они не просто установлены для защиты транзисторов от обратного напряжения - по ним протекает часть силового тока двигателя с постоянным его переключением. Для упрощения монтажа инвертора и снижения паразитных индуктивностей, а также экономии времени подбора подходящих по параметрам диодов рекомендуется **использовать транзисторы с встроенными обратными диодами**. HARD SWITCHING IGBT транзисторы и модули, предназначенные для работы в инверторах, как правило, уже снабжены подобранными по характеристикам и динамике обратными диодами для получения оптимального процесса коммутации.

Коммутация тока в стойке инвертора происходит между данным транзистором и обратным диодом второго транзистора. Они меняются местами в зависимости от направления тока. Динамические параметры диодов заметно влияют на режим работы ключей инвертора, в частности на величину перенапряжения при обратном восстановлении. При необходимости использования внешних дискретных диодов к IGBT ключам нужно выбирать их с более мягкой характеристикой восстановления и на напряжение и ток применяемых ключей.



5.3 Максимальное напряжение коллектор-эмиттер

Параметр максимального рабочего напряжения коллектор-эмиттер **Uкэ** (U(BR)CES) является очень важным. Он определяет класс IGBT транзистора, превышение этого напряжения в работе недопустимо, чревато пробоем и аварийным выходом из строя преобразователя. Напряжение ключей выбирается исходя из максимально возможного напряжения DC – звена, плюс возможные коммутационные перенапряжения **Uк**. Также необходим запас для обеспечения надёжности инвертора.

Возможное пиковое напряжение коллектор-эмиттер в работе не должно превышать 80% от максимального Uкэ для транзистора. Номинальное рабочее напряжение DC-шины рекомендуется не более 60% от максимального напряжения Uкэ.

$$U_{кэ} > (U_{dcmax} + U_{к})/0,8$$

где: **Uкэ** – максимальное рабочее напряжение коллектор-эмиттер, В
Udcmax – максимально-возможное напряжение DC - звена, В
Uк – коммутационное перенапряжение, В

Udcmax в частотном инверторе зависит от напряжения питающей сети, плюс может иметь место рекуперативный тормозной режим двигателя с отдачей энергии в конденсаторы DC-звена и дополнительного повышения напряжения на них. Величина этого превышения при торможении определяется алгоритмом системы управления двигателем. Верхняя граница может выбираться согласно с имеющимся запасом по напряжению применяемых полупроводниковых приборов, конденсаторов и изоляции двигателя.

В частотном инверторе “Восьмикрута” реализована защитная функция, отключающая генераторный режим при напряжении DC-звена >370В. С учётом возможных пульсаций напряжения и разброса параметров цепей можно принять **Udcmax =390В**.

На величину коммутационных перенапряжений **Uк** будут оказывать влияние множество факторов, таких как монтаж силовых компонентов, величина коммутируемого тока, скорость переключения, применение снабберов и различных защит от перенапряжения и т.д.

Причиной перенапряжений на электронных компонентах инвертора является паразитная индуктивность контуров силовых шин. Главный контур образуется между электролитическими конденсаторами и стойками транзисторов инвертора. Также имеет значение и индуктивность соединений между самими стойками ключей. В идеальном варианте нужно выполнить силовой монтаж с минимальной площадью токовых петель с распределённой ёмкостью, что может быть достигнуто



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



“бутербродной или сендвич” компоновкой силовых шин, а также с применением двухсторонней или многослойной печатной платы.

Для возможности простого изготовления инвертора в любительских условиях целесообразно упростить конструкцию силовой части, снизить требования к её монтажу, при этом сохранить функциональность и надёжность на заявленных характеристиках.

Для обеспечения надёжной всережимной работы инвертора частотного преобразователя “Восьмикрут”, смонтированного простым навесным монтажом ключей (модулей) на радиаторе или размещённых на односторонней печатной плате - рекомендуется применение транзисторов промышленного 12 класса по напряжению - 1200В.

Перенапряжение на ключевых элементах схемы будет наблюдаться в любом случае, а особенно при отключении токов короткого замыкания.

Собственная индуктивность провода диаметром 1,8мм (сечение 2,5мм²) и длиной 10см порядка 10⁻⁷ Гн. В качестве упрощённого примера можно рассмотреть порядок величины энергии, которая будет освобождаться при подобных значениях индуктивностей и отключении больших токов:

- порядок величины индуктивности **10⁻⁷ Гн**
- порядок величины тока **10² А**
- порядок величины энергии **$E = 10^{-7} \text{ Гн} * (10^2 \text{ А})^2 = 10^{-3} \text{ Дж}$** .

IGBT транзисторы, рассчитанные для жесткого переключения, могут штатно рассеивать энергию переключений данного порядка на кристалле, причём, чем более высокого класса (напряжения к-э) транзистор, тем большую энергию он способен рассеивать при данном токе. Наличие конденсатора С36 по питанию на DC-шинах позволяет снизить амплитуду импульсов перенапряжения, передав часть освобождённой энергии магнитного поля электрическому полю конденсатора, с дальнейшими резонансными релаксационными колебаниями.

Петлевая индуктивность DC-контура для простого варианта монтажа инвертора (см. Рис. 17) в среднем находится в пределах 0,3мкГн. Ток при коротком замыкании будет зависеть от жесткости применяемых ключей, места и характера замыкания.

При использовании ключей IRG4PH50UD и величине одной установленной ёмкости С36 0,15мкф, на выходе из режима короткого замыкания через внешний контур с индуктивностью 3-5мкГн (~пара метров кабеля) ожидаемая средняя величина Uк ~ 350-400В. Ток перед отключением достигает величины 200А, что является практически предельной величиной пропускаемого тока для данных ключей. Мгновенный пик напряжения на DC-шинах и на конденсаторе С36 уже после закрытия ключа может достигнуть величины Udc+400В с последующей релаксацией.

При сквозном замыкании в стойке, максимальный ток определяется в основном характеристикой ключа. При большем токе будет и большая величина Uк соответственно.

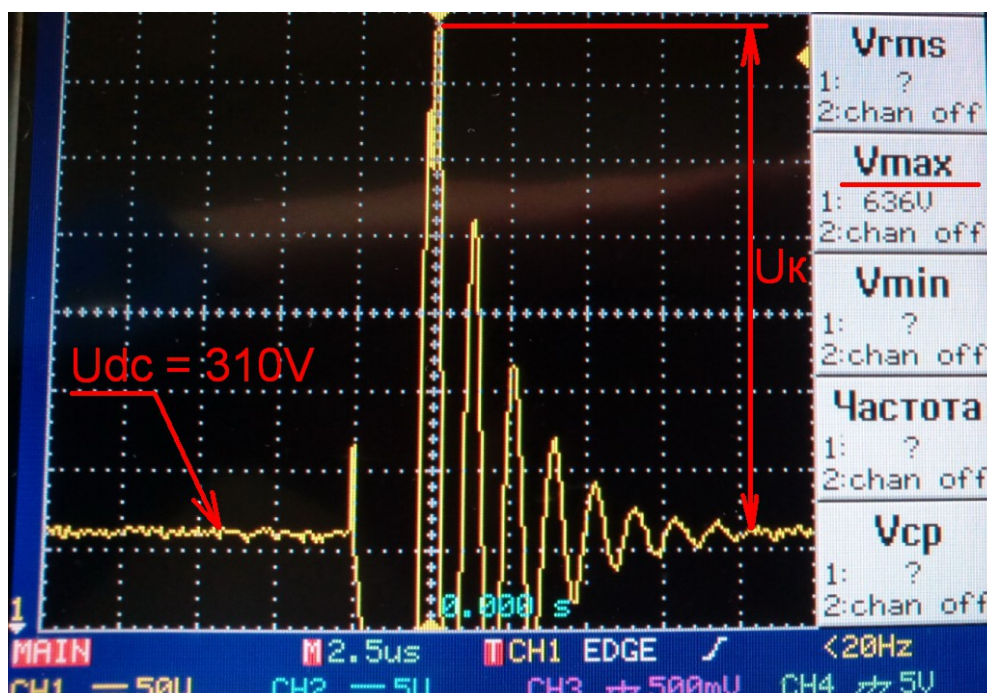


Рис 18. Осциллограмма напряжения к-э IGBT транзистора при отключении тока короткого замыкания.

В штатном режиме работы инвертора средняя величина U_k при коммутации диодов и от емкостных токов возможна $\sim 80B$, при выключении ключа $\sim 35-40B$.

При работе без конденсатора С36 на DC - шинах накопленная индуктивная энергия переходит в тепло кристалла, при этом перенапряжения при номинальных токах возможны до 250-300В.

Если подставить в формулу выбора $U_{кэ}$ величину перенапряжения при выходе из режима короткого замыкания, получится:

$$U_{кэ} > (390B+400B)/0,8$$

$$U_{кэ} > 987,5B$$