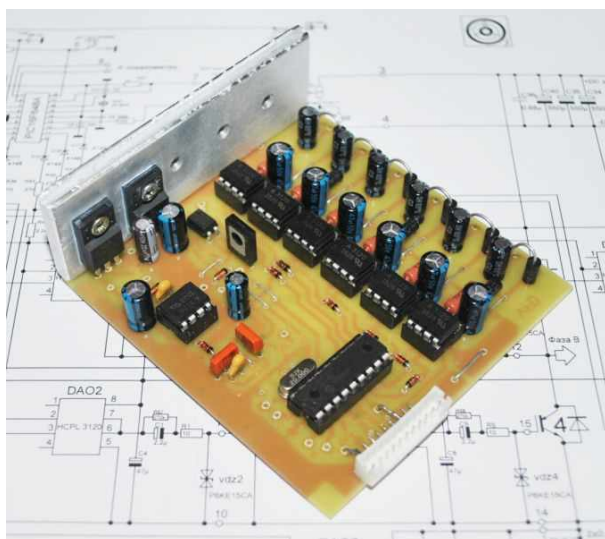




Частотный преобразователь “ВОСЬМИКРУТ” +“ВОСЬМИКРУТ НД”



U/f – скалярное управление АД
 $+U(\varphi_i)/f$ – управление возбуждением АД
(элемент векторного управления)

Устройство и наладка ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

(версия 3.2)



Настоящий документ содержит техническую информацию о преобразователях “Восьмикрут” для регулируемого электропривода. Каждый желающий имеет право, исходя из свойственного ему понимания общественной пользы, копировать и тиражировать настоящий документ, в том числе с коммерческими целями, в полном объёме или фрагментарно. Используя настоящие материалы в своей деятельности, при их цитировании, либо же при ссылках на них, принимает на себя персональную ответственность, и обязуется сохранять оригинальный смысловой контекст и достоверность информации.



Содержание

1. Введение	4
1.1 Общая характеристика преобразователя, основные узлы	5
1.2 Принцип управления и защиты в преобразователе	9
1.3 Восьмикрут HD, принципы управления и основные узлы HD	11
2. Принципиальные схемы узлов преобразователя частоты	17
2.1 Схема управления Восьмикрут300	17
2.2 Силовая схема	21
2.3 Общая схема	24
2.4 Схема индикатора (показометра)	27
2.5 Схема задатчика частоты (крутилки)	29
2.6 Схемы внешнего пульта	31
2.7 Схема управления Восьмикрут HD300	34
2.8 Схема модуля внешнего управления Восьмикрут HD	36
3. БЛОК ПИТАНИЯ	38
3.1 Особенности питания и требования к БП	38
3.2 Рекомендованная схема БП и её проверка	42
4. УПРАВЛЕНИЕ И ПРОВЕРКА УЗЛОВ	46
4.1 Варианты программ и схем управления частотным преобразователем	46
4.2 Программирование контроллеров	50
4.3 Проверка платы управления	53
4.4 Проверка индикатора (показометра)	58
4.5 Проверка задатчика частоты (крутилки)	59
4.6 Проверка модуля внешнего управления Восьмикрут HD	61
4.7 Проверка платы управления инвертором Восьмикрут HD	62
5. ИНВЕРТОР	65
5.0 Классификация возможных силовых схем	68
5.1 Режим HARD SWITCHING, Motorcontrol	79
5.2 Обратный диод в корпусе с транзистором	80
5.3 Максимальное напряжение коллектор-эмиттер	81
5.4 Номинальный ток IGBT	84



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.

“Восьмикрут” является открытым и развивающимся проектом частотного преобразователя для самостоятельной сборки. Он надёжен, обладает лучшими характеристиками ремонтпригодности, благодаря простым схемным решениям, свободному доступу к схемам и программному обеспечению, информационной поддержке.

Положительными следствиями применения частотного преобразователя являются обеспечение лёгкого запуска асинхронных двигателей от однофазной сети, регулирование их скорости вращения, высокий коэффициент использования мощности двигателя, высокий пусковой момент по сравнению с другими способами однофазного пуска.

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”, а также его новой модернизированной версии “Восьмикрут HD”.

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. Сначала из сетевого переменного напряжения формируется постоянное напряжение на промежуточном DC-звене. Затем из постоянного напряжения транзисторным инвертором (АИН) с помощью ШИМ формируется регулируемое трёхфазное напряжение, которое питает двигатель.

Мощность двигателя, с которым может работать преобразователь определяется допустимым током транзисторов инвертора, а степень использования мощности двигателя зависит от параметров питания (количество фаз, напряжение, сопротивление сети **Zc**). Схема и программное обеспечение Восьмикрут позволяет управлять двигателями до 11кВт.

Из-за особенностей однофазного питания преобразователя частоты использование двигателей более 3кВт на полную мощность ограничено. Наличие всего одной фазы питания при отборе мощности приводит к падению выпрямленного напряжения DC-звена преобразователя. Несмотря на использование векторной модуляции, снижение DC - напряжения не позволяет получать номинальное выходное напряжение для двигателя на номинальной частоте, что ухудшает режим работы, увеличивает скольжение и потребляемый ток. В большинстве однофазных “гаражных” сетей на валу мощных моторов удаётся получать до 3кВт механической мощности, при сохранении допустимых тепловых режимов инвертора и двигателя. Этого значения достаточно для работы механизмов.

Для приводов **мощностью >3кВт**, где требуется полная отдача мощности двигателя (например, привода мощных насосов и компрессоров при работе с полной производительностью) **рекомендуется подключение к сети с применением специальных блоков ККМ подкачки “Бульдюк” и AFE “Бульдюк HD600”**.

Для возможности реализации режима быстрого торможения привода, например, для работы на токарных станках, необходимо применять тормозной модуль. В блоке **AFE “Бульдюк HD600”** функция тормозного модуля уже встроена, плюс есть возможность рекуперации энергии в сеть.

В мощных сетях (**$Z_c < 0,55 \text{ Ом}$**) повысить эффективность привода без использования блока ККМ подкачки можно применением схемы выпрямителя с удвоением напряжения совместно с системой управления **“Восьмикрут HD600”**.

Ссылки, варианты силовых схем, таблицы коэффициентов крутящего момента, значений токов, сечений кабелей и номиналов защитных аппаратов размещены в

п.5.0

ПО и схемы “Восьмикрут HD” на базе мотор-контроллера PIC18 и управляющего контроллера PIC16F690 доступны [здесь](#) и [здесь](#). Описание возможностей и основные отличия от классической схемы публикуются в данном документе – п1.3, п2.7, п2.8, п4.1, п4.2, п4.6, 4.7



Примечание. На шильдике двигателя в ваттах или киловаттах указывается номинальное значение механической мощности развиваемой на валу:

$$P_{д.ном} = M_{ном} * \omega_{ном}$$

где: **$M_{ном}$** – номинальный момент на валу, **Н*м**; **$\omega_{ном}$** – номинальная угловая скорость вращения вала, **рад/с**; **$P_{д.ном}$** – мощность двигателя, **Вт**

Угловая скорость связана с частотой вращения:

$$\omega_{ном} = \pi * n_{ном} / 30 = n_{ном} / 9,55$$

где: **$n_{ном}$** – указанная на шильдике номинальная частота вращения, **об/мин**

Аналогично номинальная механическая мощность:

$$P_{д.ном} = M_{ном} * n_{ном} / 9,55$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{ном} = 9,55 * P_{д.ном} / n_{ном}$$

История изменений и обновлений [здесь](#) и [здесь](#).

Видео ресурсы:

https://www.youtube.com/channel/UCxjGR3WJkex6I_o_FSWEPyA

<https://zen.yandex.ru/id/6228e49b7d728d3bad0e8325>

<https://rutube.ru/channel/25158207>



Основные характеристики Восьмикрута на PIC16F648A:

- скалярный способ управления двигателем
 - простая разомкнутая система регулирования
 - линейная зависимость U/f с поднятием U на низких частотах (имеются оптимальные ramпы $P \leq 550W$, $\leq 1500W$, $\leq 4000W$, универсальная)
 - полное использование питающего напряжения на номинальной частоте двигателя (векторный ШИМ, раскрытие модуляции)
 - 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
 - раздельная 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 раскашке различных вариантов силовых транзисторов и модулей (двухполярное напряжение раскашки 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:

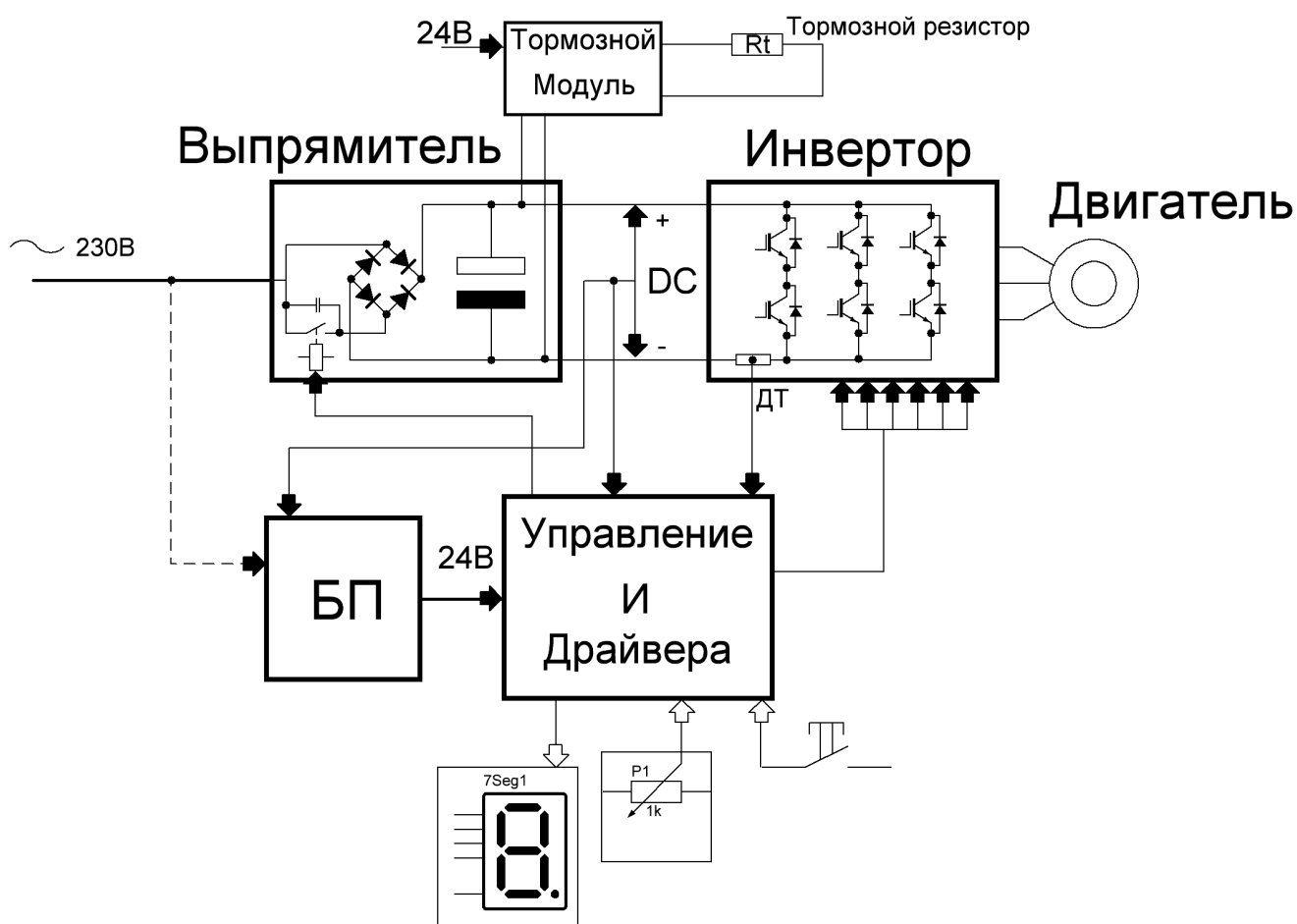


Рис 1. Структурная схема преобразователя “Восьмикрут”

Можно выделить основные узлы преобразователя:

- блок питания
- плата управления инвертором
- 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 платы управления “VOSMIKRUT” универсальными. Их можно применять для управления различными по комплектации силовыми IGBT инверторами, в том числе на мощных IGBT модулях и при напряжении DC-звена 535-600В (полный заряд затвора $Q \leq 2\text{мкКл}$ при $DT=2\text{мкс}$).



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 (при достаточном напряжении DC-звена).

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



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.

Имеется опция – программа для управления двигателями постоянного тока. Трёхфазный инвертор от DC-звена посредством ШИМ-модуляции может с лёгкостью 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 питании 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](#)



1.3 Восьмикрут HD, принципы управления и основные узлы HD (возможно дальнейшее обновление ПО и изложенной здесь информации)

Основные характеристики Восьмикрута HD на PIC18F1330:

- элемент векторного управления двигателем, контроль загрузки по фазе угла вектора тока статора и форсирование возбуждения на низких частотах (решение “Восьмикрут HD” без датчиков тока)
- стабилизация питания двигателя (обратная связь по DC-напряжению)
- частичная компенсация мертвого времени и падения напряжения на силовых ключах инвертора (на низких частотах)
- оптимальная рампа U/f для $P_{дв} \leq 4000\text{Вт}$, $\leq 11000\text{Вт}$
- пусковой момент $>150\%M_{ном}$ для моторов 4кВт и 11кВт даже при пониженном напряжении в сети (на частотах от 2Гц)
- простая разомкнутая система регулирования скорости с повышенной жесткостью, обусловленная стабилизацией питания двигателя
- полное использование питающего напряжения на номинальной частоте двигателя (векторный ШИМ, раскрытие модуляции)
- отдельная параболическая U/f рампа для использования с центробежными насосами и вентиляторами $P_{дв} \leq 15\text{кВт}$
- безопасное управление приводом через гальванически изолированный интерфейс с внешнего управляющего модуля
- минимальная выходная частота 0,5Гц
- максимальная выходная частота 75Гц
- возможность управления с внешнего пульта
- регулирование выходной частоты аналоговым задатчиком
- шаг изменения задания частоты по задатчику 0,5Гц
- шаг изменения выходной частоты на двигателе 0,1Гц
- легкий реверс двигателя
- функция автозапуска
- раздельная установка темпов разгона и торможения с сохранением параметров и просмотром ранее установленных
- торможение постоянным током (в режиме управления U06)
- торможение с 50Гц за 0,5-0,25с (при использовании тормозного модуля)
- универсальность платы управления по раскочке различных вариантов силовых транзисторов и модулей (двухполярное напряжение раскочки затворов, пиковый ток управления 2,5А, $dead\ time = 1-2\mu\text{с}$, заряд затвора $Q \leq 1-2\mu\text{Кл}$)
- защита от пониженного напряжения (просадки) сети и превышения DC напряжения при торможении (с частичным ограничением интенсивности торможения)
- защита от перегрузки и короткого замыкания



Ниже представлена структурная схема HD версии:

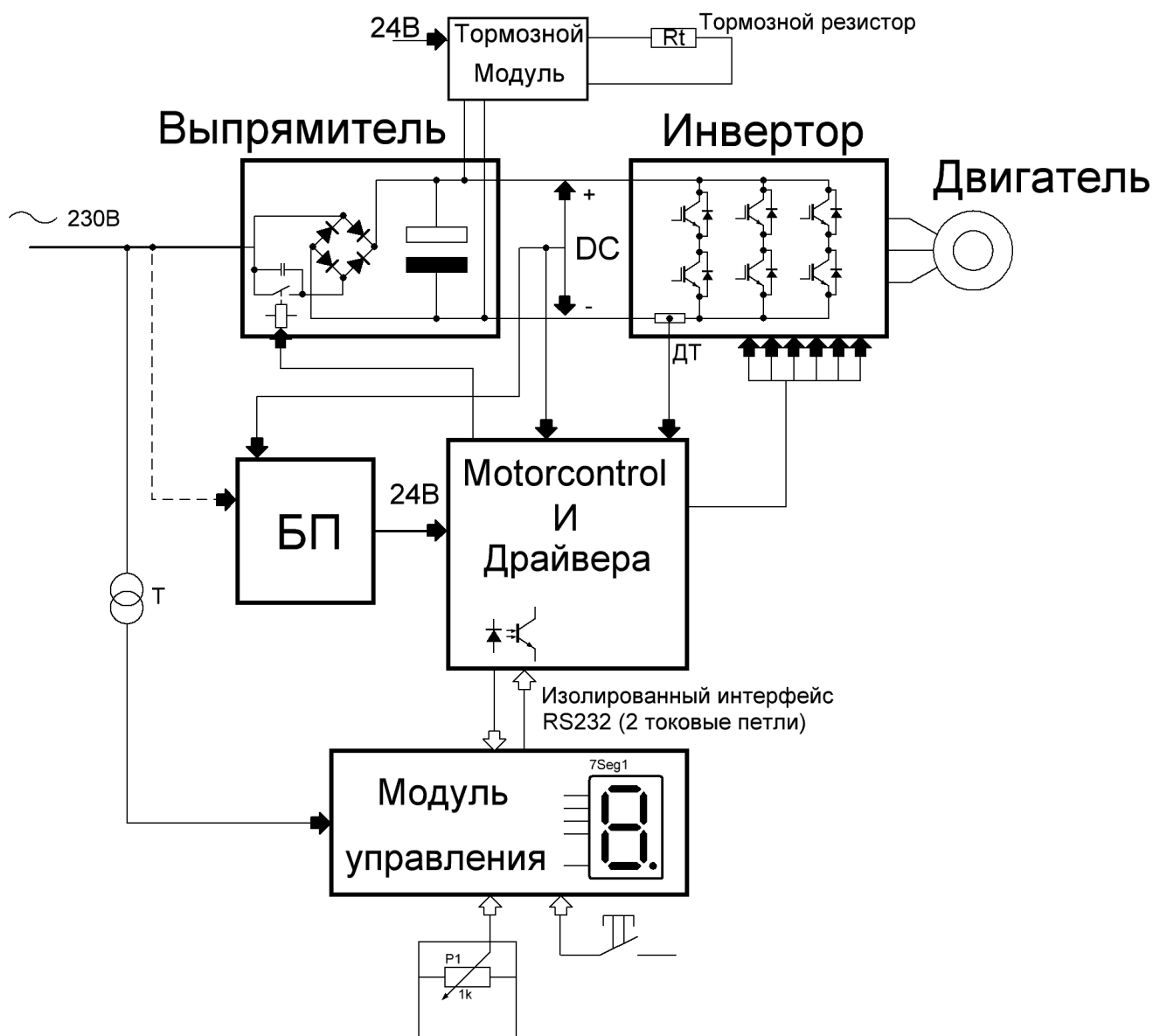


Рис 1а. Структурная схема преобразователя “Восьмикрут HD”

Основные узлы преобразователя:

- блок питания
- плата управления инвертором
- силовой выпрямитель с фильтром
- трёхфазный инвертор
- модуль внешнего управления
- тормозной модуль (для быстрого тормоза)



Основные отличия HD версии – применение микроконтроллера PIC18F1330 в качестве моторного, наличие обратных связей, управление командами по интерфейсу, отдельный управляющий модуль “показометра” на микроконтроллере PIC16F690. Применению PIC18F1330 способствовала его относительная простота и наличие специализированной периферии, а именно аппаратного модуля формирования ШИМ, а также, наряду с возможностями быстрого табличного чтения, наличие элемента цифровых сигнальных процессоров - аппаратного умножителя 8x8 за один машинный цикл.

Программа для HD разработана также на языке ассемблер. В её основе шести секторный формирователь пространственного вектора напряжения (SVPWM), а также обработка сигналов обратных связей и управляющих команд с передачей строки состояния на внешний контроллер управления. Основной функционал системы управления направлен на улучшение режима работы асинхронной машины. Подробная информация о программе HD будет изложена в описании [здесь](#) и [здесь](#).

Применение обратных связей позволило получить дополнительные возможности – высокий ($>1,5M_{ном}$) момент при пуске двигателя и более жесткие механические характеристики.

Введена быстродействующая коррекция векторной ШИМ по возмущению напряжения DC-звена. Это стабилизирует выходное напряжение и соответственно снимает зависимость потока возбуждения машины от величины напряжения DC-звена, когда контур регулирования не ограничен. На средних частотах при неизменной нагрузке магнитный поток практически не зависит от колебаний напряжения DC-звена и можно считать его стабилизированным. Тем самым, получаются более жесткие механические характеристики (за счёт лучшего саморегулирования АД) и снижаются искажения тока статора из-за влияния пульсаций DC-напряжения. При тормозных режимах устраняется излишнее повышение тока, которое происходило из-за возрастания напряжения DC-звена. Стало возможным использование более эффективной топологии силовой части с удвоителем напряжения во всех режимах работы (220-380).

Кроме стабилизации магнитного потока, упреждающая коррекция ШИМ способствует подавлению резонанса электромеханической системы и колебаний скорости двигателя, которые возникают при мощностях моторов $>\sim 3\text{ кВт}$ и работе от преобразователей частоты с простым U/f управлением (в основном во время холостого хода из-за нелинейных искажений инвертора).

На низких частотах (2-14Гц) при загрузке возбуждение снижается больше, а также снижаются и потери в стали. Для сохранения и увеличения момента выше номинального при этом целесообразно увеличивать (и форсировать) возбуждение машины выше номинала. Для момента $1,5M_{ном}$ достаточная величина потока $\Phi_{1,5} = 1,22\Phi_{ном}$ при неизменном и оптимальном скольжении. С постоянной добавкой напряжения (буст) получить оптимальные режимы работы машины с увеличением



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



возбуждения не удаётся. Величина напряжения, необходимая при загрузке, на холостом ходе оказывается избыточной и вызывает существенное насыщение магнитной системы с чрезмерным возрастанием тока и быстрым перегревом машины, инвертора, срабатыванием токовой защиты.

Решением “Восьмикрут HD” по данному вопросу является определение текущей загрузки двигателя по фазе угла вектора тока статора и, когда это необходимо, выполнение дополнительной корректировки напряжения и соответственно потока возбуждения. При этом датчики тока не применяются, а фаза тока определяется детектором по изменению уровня напряжения на нижнем ключе одной из фаз.

Функции защиты аналогичны классической схеме – быстродействующая аппаратная токовая защита, программная защита от понижения и превышения напряжения DC-звена, дополнительная защита от потери связи с управляющим контроллером (контроль приёма данных через $t=100\text{мс}$). Через неё осуществляется и защитное выключение при пропаже сетевого напряжения.



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 работает, 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 подключения 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 загрузка.

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?

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 $U/f = \text{const}$. 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 в данном пункте рассмотрим общую схему, схему индикатора, схему задатчика частоты, схемы внешнего пульта, а также схемы обновлённой версии “Восьмикрут HD”. Особенности питания и рекомендованная схема блока питания будет рассмотрена отдельно в п 3.

2.1 Схема управления Восьмикрут300

Примечание. Индекс “300” означает управление для напряжения DC-звена 300В, при этом преобразователь выдаёт на двигатель напряжение 220В. Данная схема самая распространённая, индекс “300” для классических схем может быть не указан. Для применения с более высоким напряжением DC-звена имеется схема с индексом “600” и незначительными изменениями.

Схема **платы управления** преобразователя:

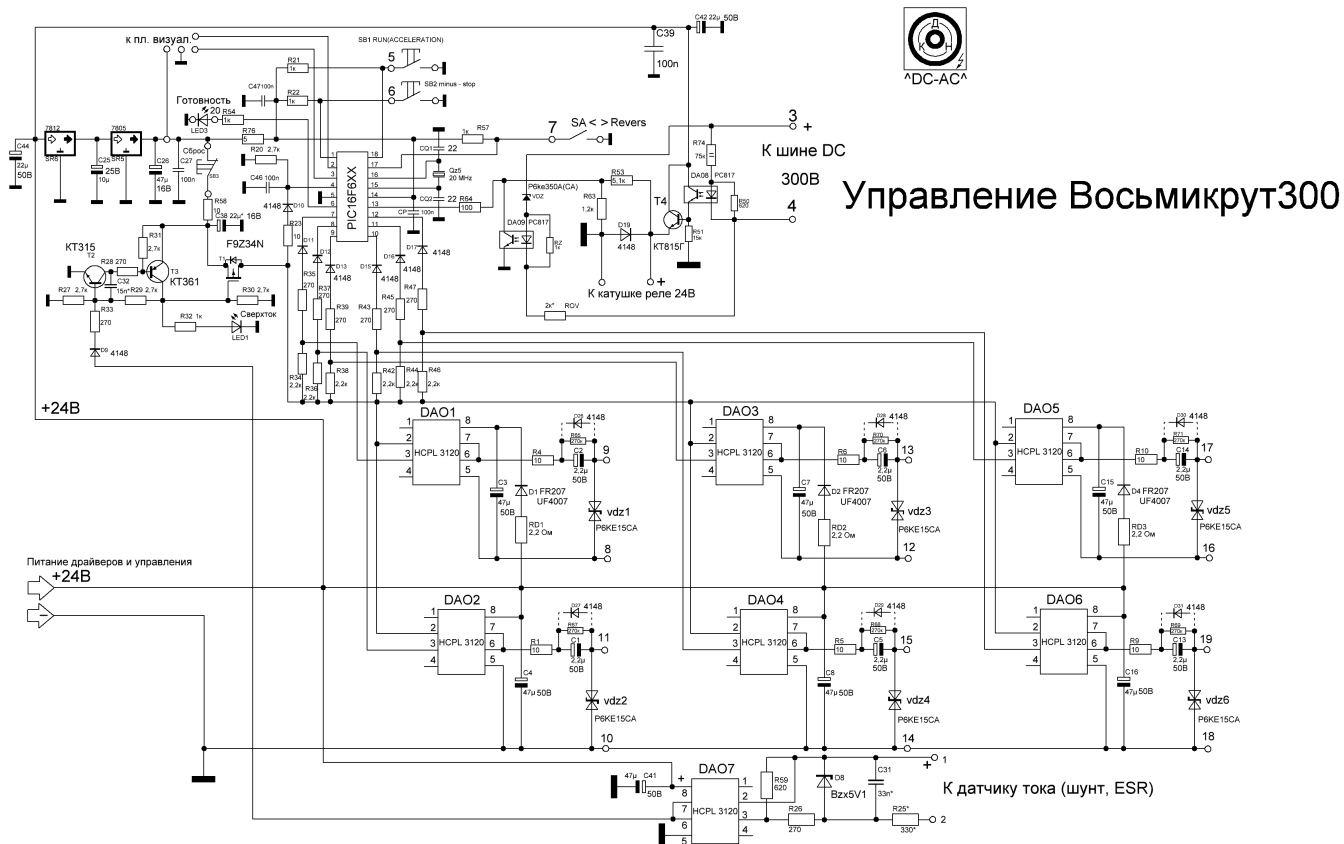


Рис 2. Принципиальная схема управления преобразователя “Восьмикрут300”



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 эмитерной 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 раскочки 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 отрабатывать 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)**.

В схеме управления Восьмикрут600 для повышения устойчивости к возможным микро-утечкам тока с коллекторов IGBT в обвязку затворов добавлены маломощные диоды D26-D31 для связи затвора с драйвером, минуя конденсатор. Это подтягивает потенциал затвора через драйвер к эмиттеру в моменты отсутствия импульсов и питания платы управления. Диоды могут устанавливаться и в классическую схему Восьмикрут300 (поэтому на схеме рис. 2 обозначены пунктиром).

Примечание. При работе на низких частотах напряжение питания верхних драйверов HCPL коллекторной группы ключей и их затворов может колебаться из-за влияния падения напряжения на силовых ключах эмиттерной группы от



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



тока нагрузки. Это не влияет на работу верхних IGBT, т.к. знак падения напряжения на нижних IGBT зависит от направления тока. Напряжение питания верхнего драйвера снижается, когда верхний IGBT не проводит ток = ток коммутируется через нижний IGBT и обратный диод верхнего IGBT ключа. Соответственно, напряжение питания верхнего драйвера возрастает ($>24V$), когда ток коммутируется как раз через верхний IGBT и обратный диод нижнего IGBT (падение на диоде прибавляется к напряжению питания). Для инвертора на полевых транзисторах, где ток протекает не по обратному диоду, а по открытому каналу в обратную сторону процессы нужно рассматривать отдельно.

Подключение управляющих светодиодов оптодрайверов к моторному контроллеру осуществлено через задающие ток резисторы по 270Ω и развязывающие диоды 4148. Резисторы по $2,2k\Omega$, 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 $2\mu s$. 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 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 T2 и T3, и уже известный полевой ключ T1. Цепь R25 и C31 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. C32 уменьшает чувствительность триггера к помехам. R58 и C38 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 T1 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 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 контроллером 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



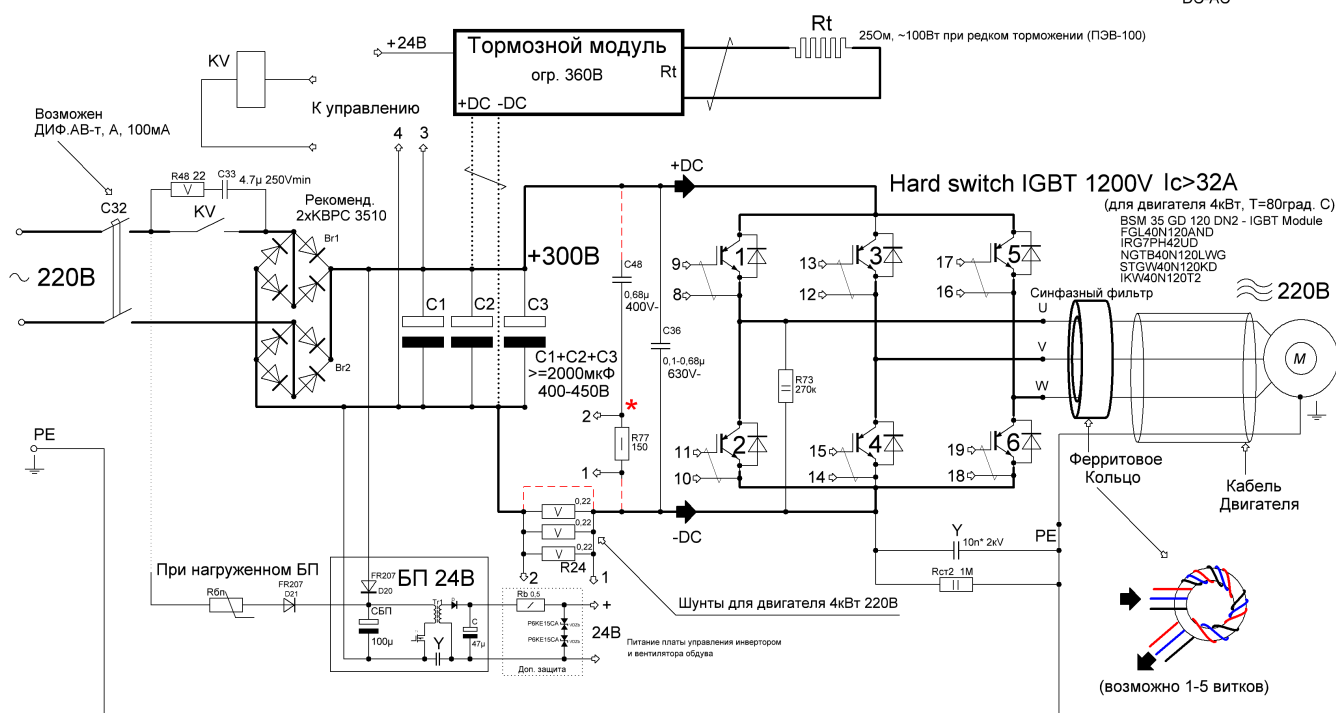
напряжения на DC выше пробоя стабилитрона, начинает течь ток через светодиод оптопары DA09, ограниченный резистором ROV. При этом транзистор оптрона сажает логический уровень, идущий на контроллер, что вызывает программную отработку, как и при пониженном напряжении - выключаются все драйвера с индикацией 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

Примечание. Силовые схемы преобразователя Восьмикрут возможно выполнить на напряжение DC-звена 300В и выходом ~220В, а также с высоковольтным DC-звеном на 535-600В и выходом ~380В. Высоковольтные схемы могут отличаться по входному напряжению и топологии выпрямителя – однофазный вход 220В с удвоителем напряжения и трёхфазный вход 380В с двухтактным выпрямителем (Ларионова). Подробнее См. п.5.0

Рассмотрим силовую часть преобразователя на 300В, объединяющую в себе силовой выпрямитель с фильтром и трёхфазный инвертор:

Силовая часть Восьмикрут (HD) 220В-220В



* Цепь C48-R77 используется для максимальной токовой защиты без применения шунта +ДИФ.АВт, А, 100мА

Рис 3. Принципиальная схема силовой части преобразователя “Восьмикрут300”

На входе схемы мостовой выпрямитель из двух мостов Br1-Br2 и цепочка R48 C33, которая служит для ограничения начального тока заряда емкостей фильтра C1-



C2-C3. 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).

Примечание. Под стойкой в данном случае понимается полумост из двух ключей, соединенных между собой К-Э и подключенными на DC звено (например, на схеме ключи 1 и 2).

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 (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-C2-C3 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 мгновенного **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). При напряжении DC-звена 300В **можно устанавливать как один, так и три таких конденсатора на каждую стойку ключей.**

При напряжении DC-звена 535-600В рекомендуется устанавливать три конденсатора C36 на каждую стойку ключей.

Резистор R73 необходим для начальной подачи минуса питания на драйверы HCPL 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 (при напряжении DC-



звена 300В). Обычно в цепи R6п 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. При напряжении DC-звена 600В – БП подключается от сети, параллельно с блоком управления (для реализации защиты при пропаже напряжения питания). Особенности питания и рекомендованная схема самого БП будут рассмотрены далее в **п.3., а схемы с DC-звеном 535-600В представлены в п.5.0. По выходу БП может устанавливаться дополнительная защита от перенапряжения по линии 24В.**

Следует обратить внимание на реализацию защитного заземления двигателя (при наличии защитного заземляющего проводника PE) и установку фильтра синфазных ВЧ помех (снижает емкостные ВЧ токи утечек в двигателе и подшипниковые токи). При этом внутри корпуса устройства, между проводником защитного заземления PE и минусовой шиной инвертора должен устанавливаться Y конденсатор (для шунтирования напряжения помехи). Заземляющая жила кабеля двигателя, как указано на схеме, должна подключаться к PE ближе к точке подключения Y конденсатора. Через кольцо фильтра нужно пропускать только фазные проводники. Для данного фильтра возможно применение одного или нескольких ферритовых колец PC40, M2000NM (минимальный размер пара колец 20-12-5). Применение стандартных трубчатых ферритовых фильтров ЭМП с защёлкой возможно, но заземляющая жила кабеля не должна проходить через фильтр.

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 (650В при DC 535-600В), ограничивает 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:

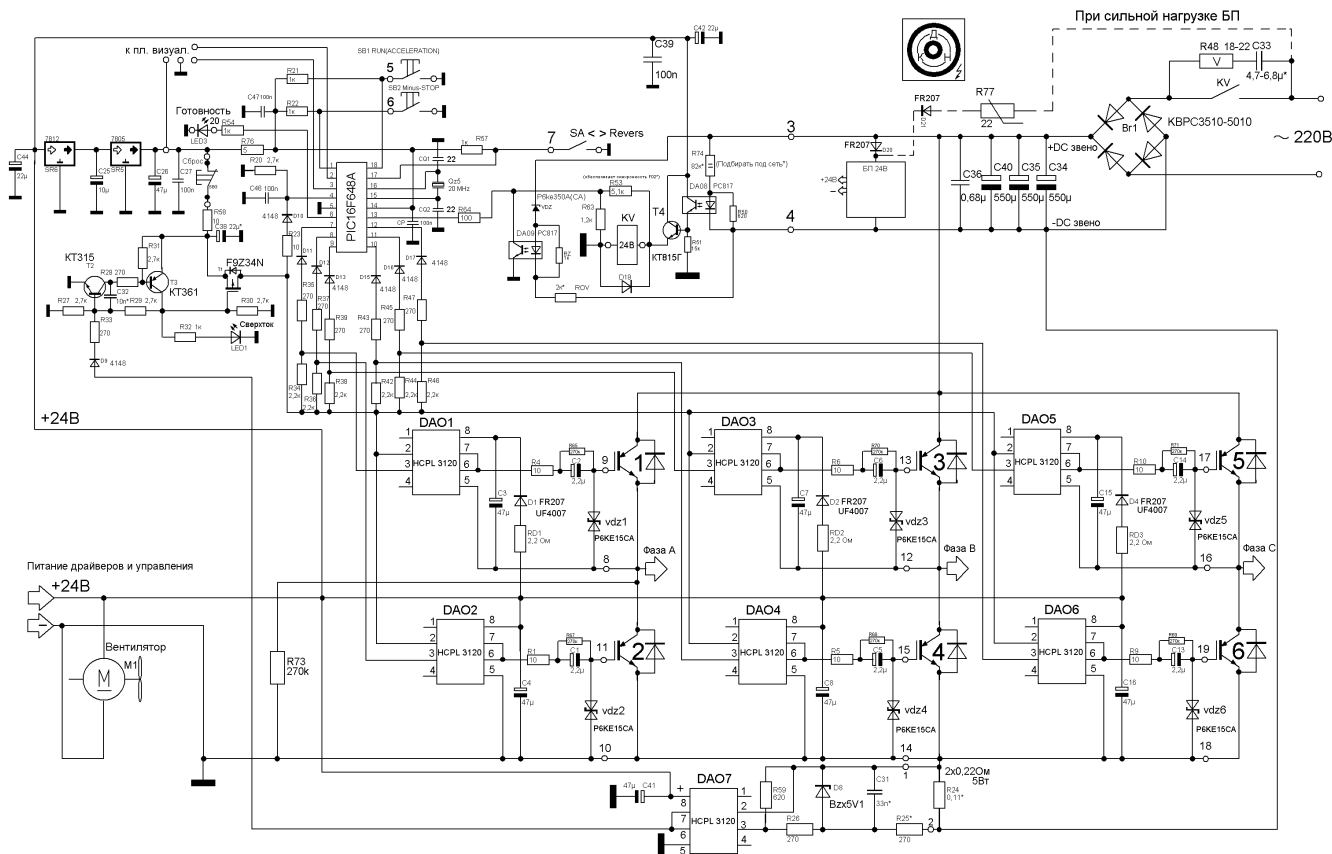


Рис 4. Принципиальная схема преобразователя “Восьмикрут” общая

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. Архивы будут дополняться обновлёнными схемами соответствующих силовых частей (для HD версии отдельно схемы управления и силовых частей). Имеющиеся варианты программ и схем управления преобразователем будут подробно рассмотрены в п.4.1

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.

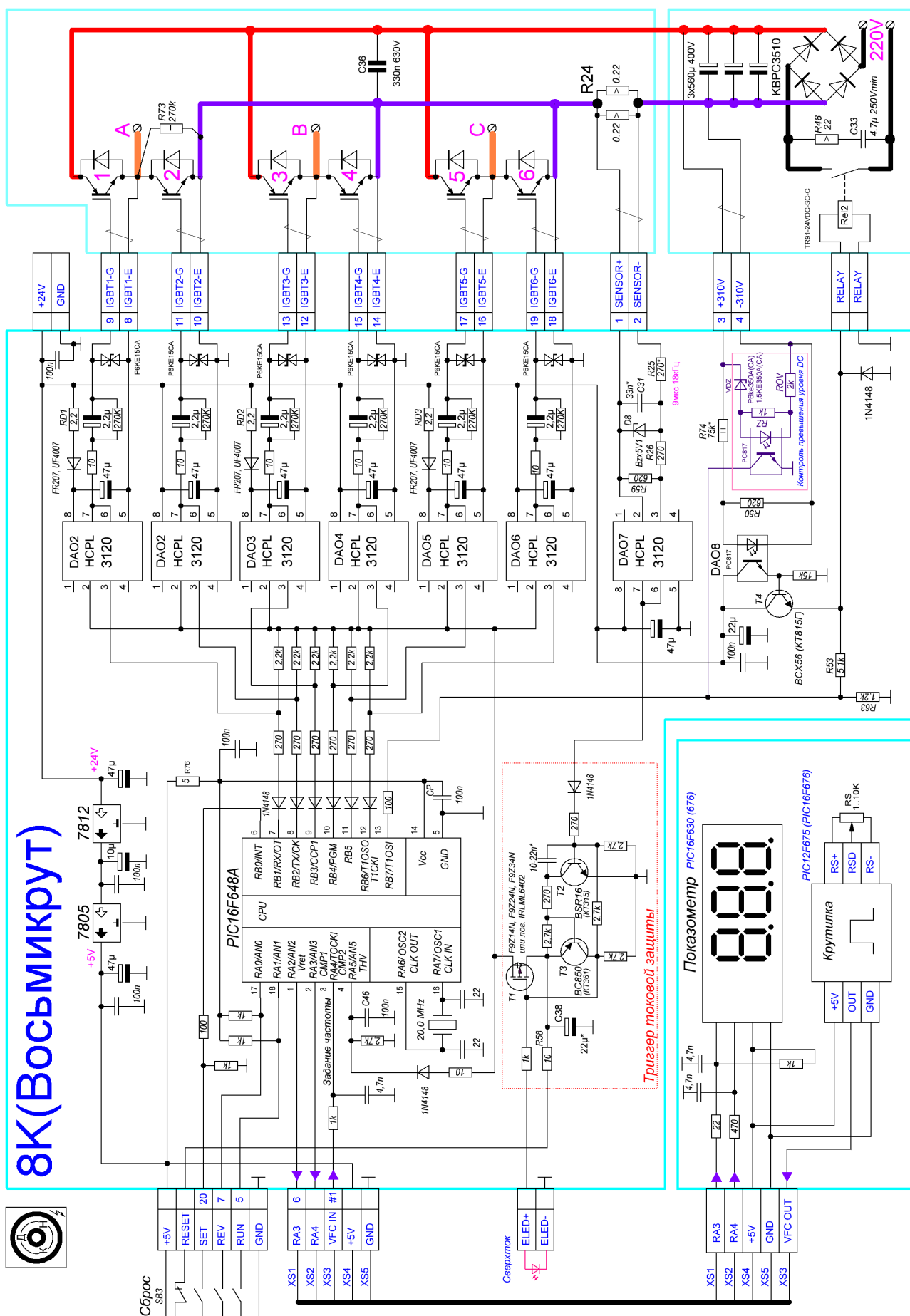


<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



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





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

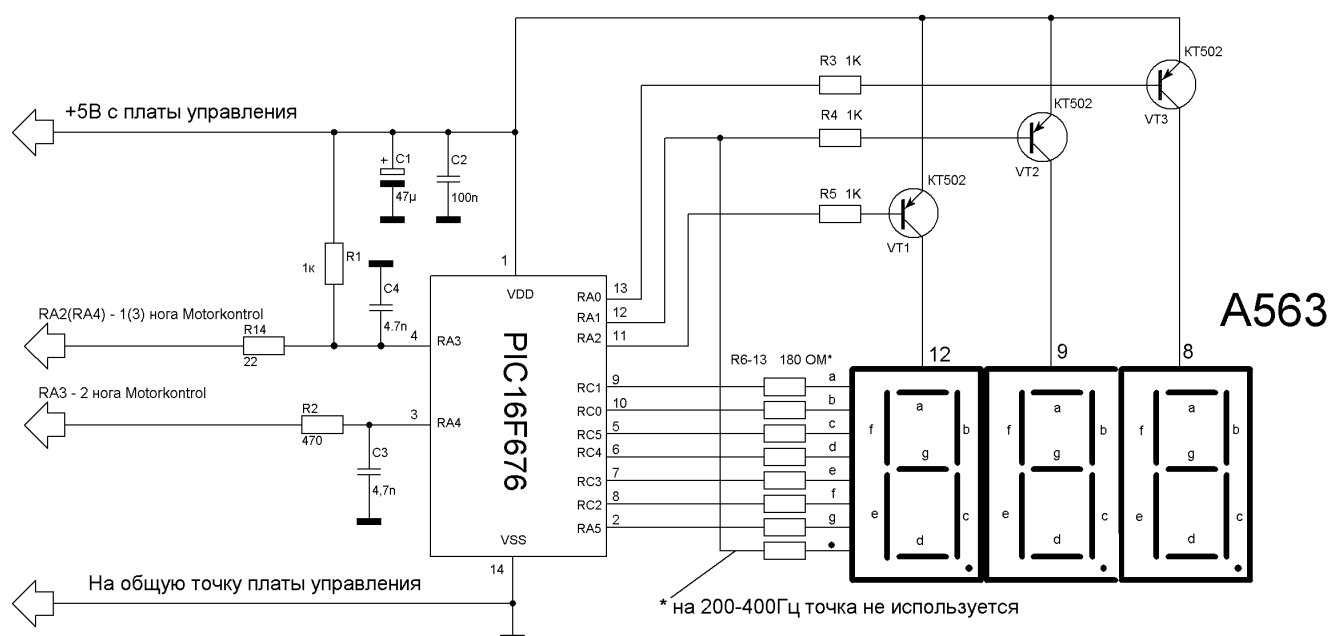


Схема от 21. 09. 2017г.

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. 4.2

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**.

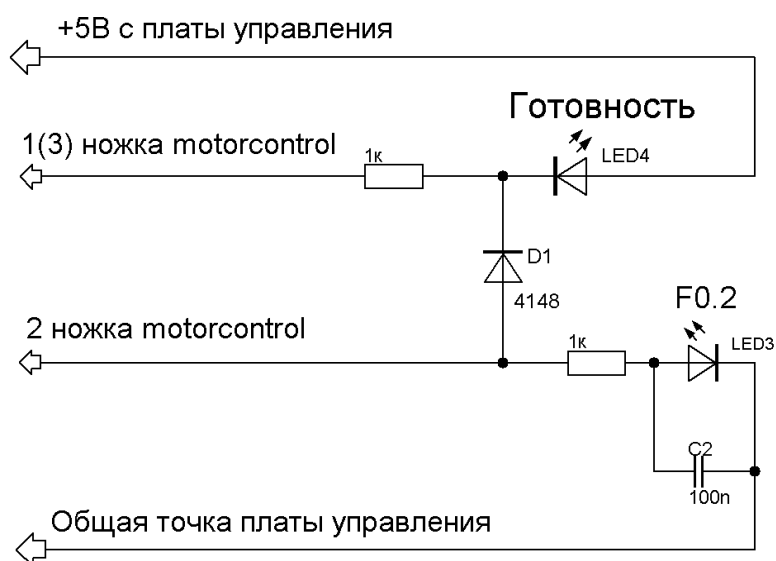


Рис 5а. Принципиальная схема отображения состояний “Восьмикрут”



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.

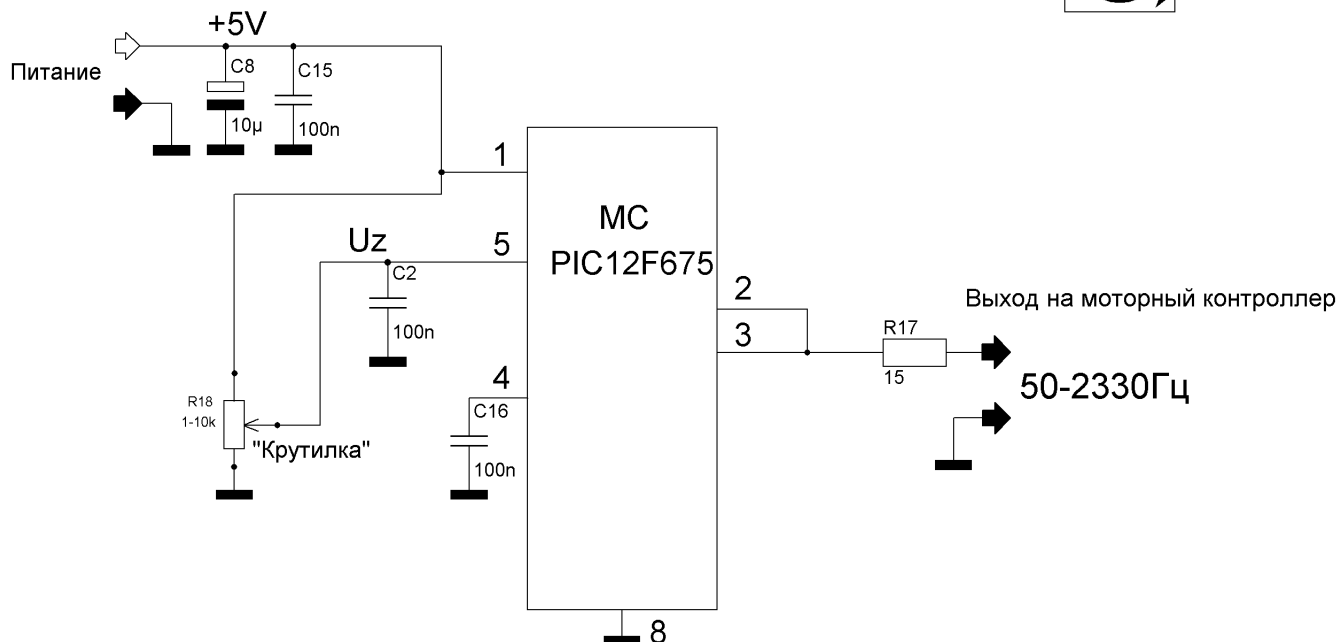
Сам генератор изменяемого частотного сигнала задания от аналогового напряжения может быть реализован на основе аналоговой или цифровой схемы. Для повышения стабильности вращения и плавности регулировки двигателя желательна стабильность и линейность характеристик генератора. В связи с этим рекомендуются 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



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:

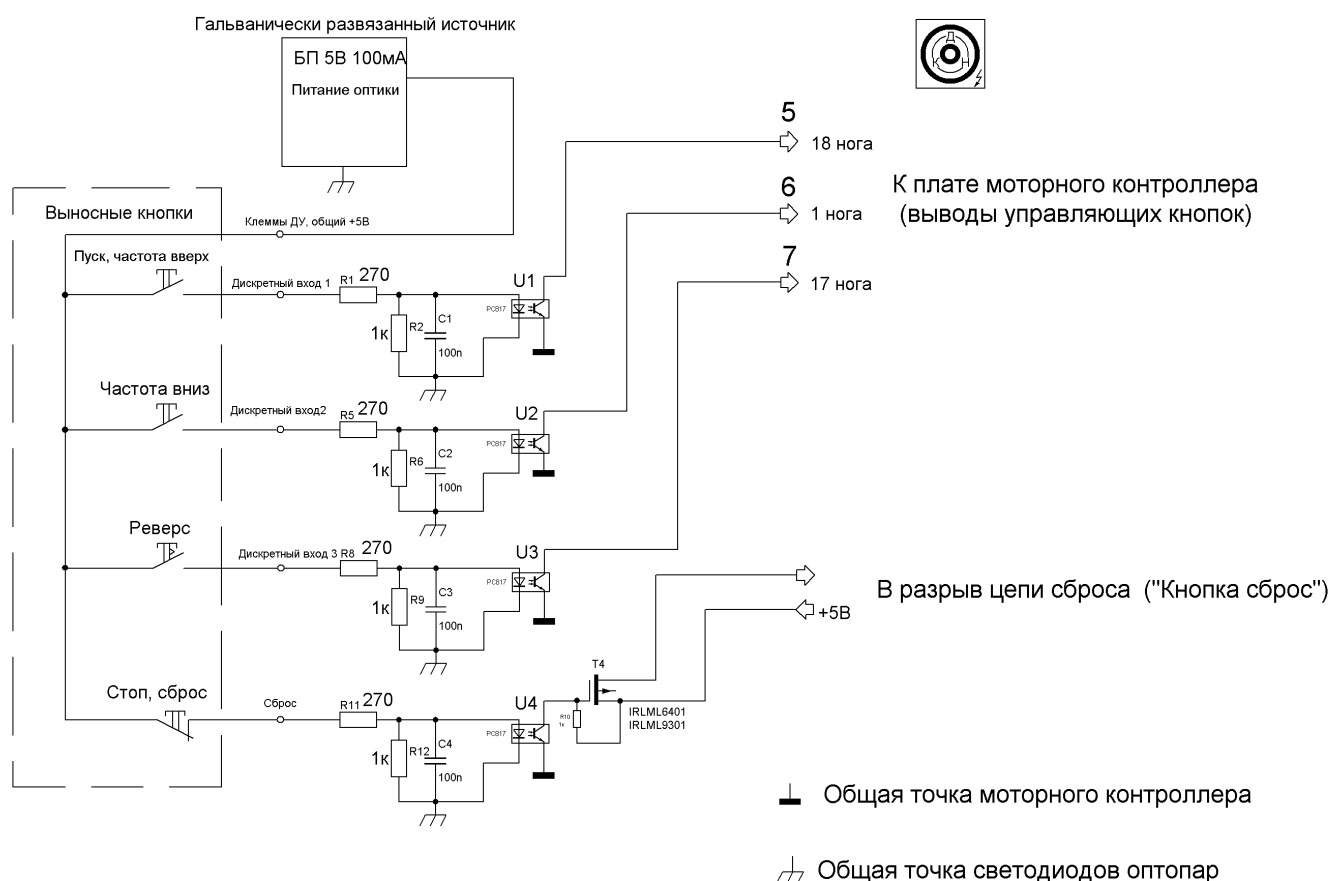


Рис 7. Принципиальная схема развязки для внешнего пульта "Восьмикрут"

Как видно, схема просто дублирует кнопки оптронами. Для такого вида управления необходим кабель с пятью жилами. Схема имеет фильтры наводок C1-C4. В качестве блока питания может использоваться любой, обеспечивающий



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 БП от сети, например, в случаях высоковольтного DC-звена).

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:

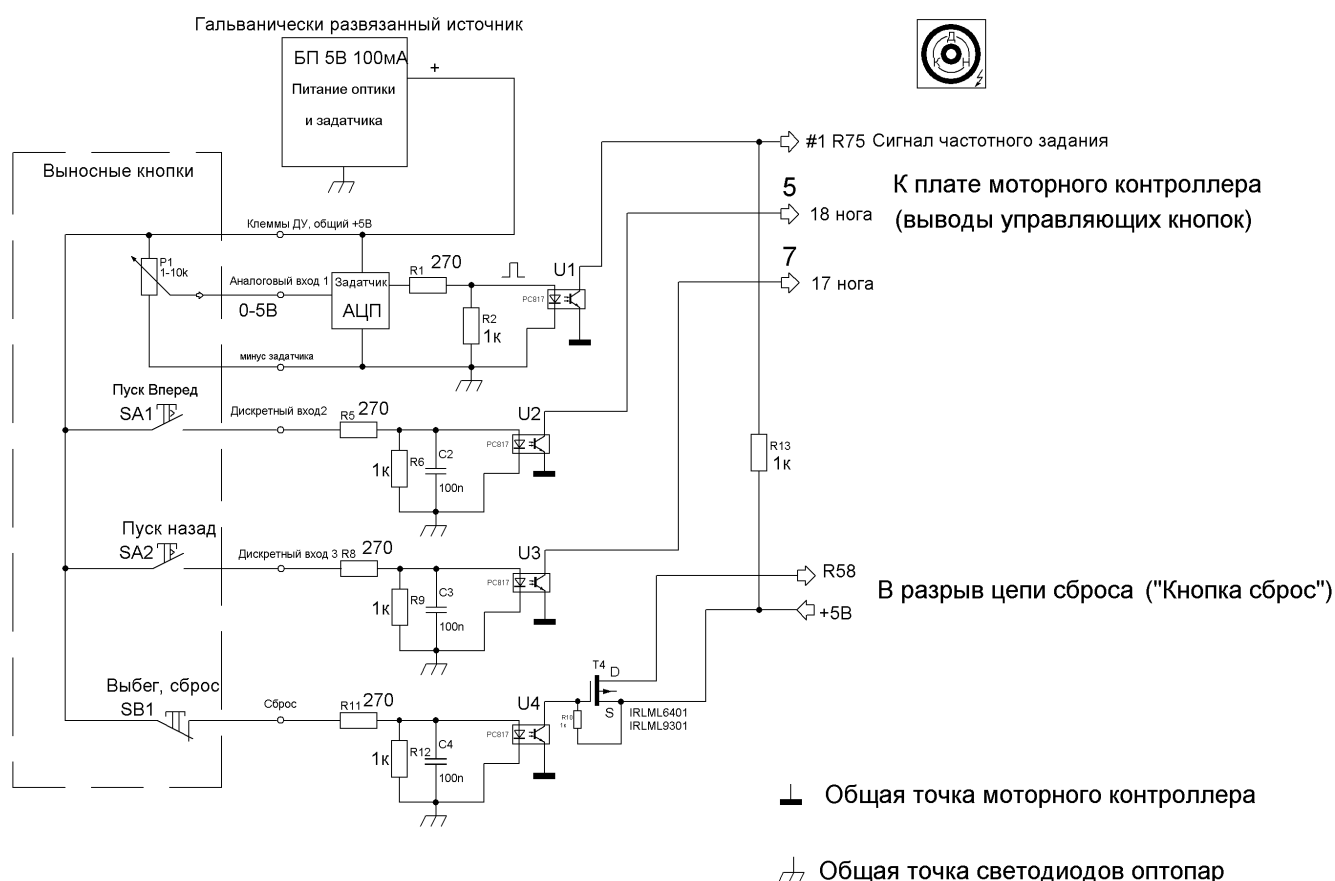


Рис 8. Принципиальная схема развязки с задатчиком для внешнего пульта "Восьмикрут"

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



2.7 Схема управления Восьмикрут HD300

Примечание. Индекс “300” означает управление для напряжения DC-звена 300В, при этом преобразователь выдаёт на двигатель напряжение 220В. Для применения с более высоким напряжением DC-звена имеется схема с индексом “600” и незначительными изменениями.

Схема **платы управления инвертором** обновленного HD преобразователя:

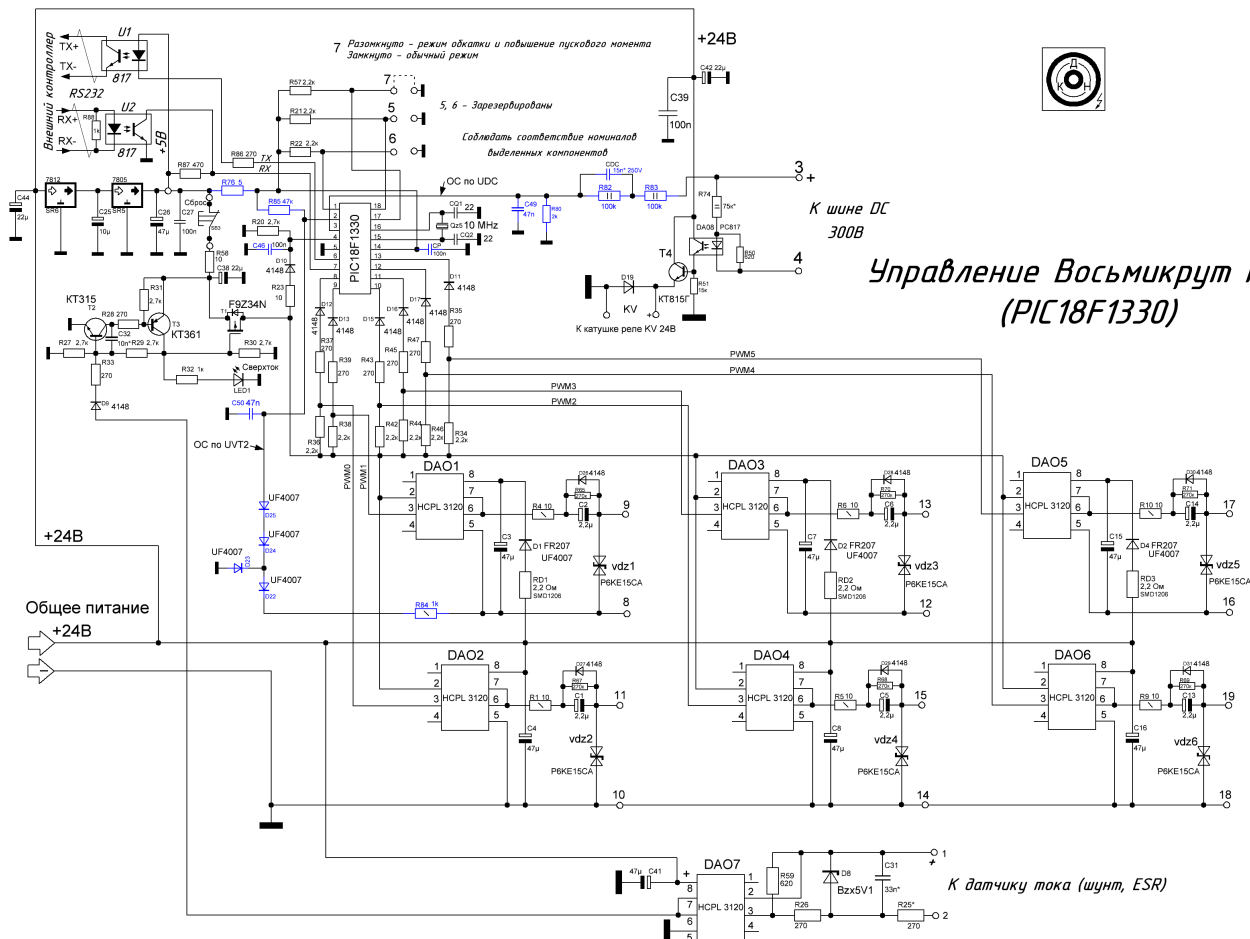


Рис 8а. Принципиальная схема управления преобразователя “Восьмикрут HD300”

Основная часть схемы выполнена без изменений от классического варианта (см. п2.1). Основные отличия – микроконтроллер PIC18F1330, наличие дополнительных цепочек для формирования обратных связей, а также наличие двух оптопар для реализации гальванически-развязанного интерфейса. Узел включения реле остался без изменений. Защита **по превышению и снижению напряжения DC** – звена **выполняется программно без дополнительных внешних элементов**. На порог по снижению может оказывать влияние аппаратная схема управления реле KV. Программная уставка **выполнена по минимальному уровню**, при котором уже не возможна нормальная работа привода (UDC=180В), при этом отпадание реле может происходить и раньше в зависимости **от резистора R74**. Отпадание реле вызовет просадку DC-напряжения и срабатывание программной защиты.



Элементы C49, R80, R82, R83, CDC – реализуют специально компенсированный делитель для реализации **обратной связи по DC-напряжению и стабилизации режима питания двигателя в реальном времени**. Конденсатор CDC обеспечивает необходимое быстродействие корректирующего программного регулятора (повышение устойчивости, демпфирование резонанса). **Для корректной работы необходимо точное соблюдение номиналов резисторов и конденсаторов делителя.**

Элементы C50, R85, D22-D25, R84 – реализуют **детектор изменения напряжения на силовом ключе №2** (к точке 8 подключен его коллектор, а эмиттер подключен к общему минусу, см. общую или силовую схемы). Характеристика проводимости IGBT транзисторов и их обратных диодов нелинейная. При работе привода ток может либо втекать в стойку, либо вытекать из неё. При смене направления тока происходит изменение знака падения напряжения на силовом ключе. Например, если ток втекает в стойку, он течёт через IGBT **№2**, падение напряжения на нём имеет знак + на коллекторе и минус на эмиттере. При смене направления тока, он начинает вытекать из стойки и проходит уже через обратный диод IGBT **№2**. Падение напряжения меняется – знак минус на коллекторе и + на эмиттере. Данные факты позволяют методом измерения уровня напряжения после детектора определить направление тока стойки и смену его знака (переход через 0).

Этот момент детектируется программой управления и используется **при работе на низких частотах** для двух целей:

- частичной компенсации мертвого времени и нелинейности драйверно-силовой части
- для определения **фазового сдвига (фазы угла) вектора тока от генерируемого выходного вектора напряжения**.

Компенсация позволяет **снизить искажения формы кривой тока и его величины** при низких выходных напряжениях преобразователя, когда уже оказываются заметными влияния падения напряжения на ключах и мёртвого времени.

Определение фазы вектора тока статора позволяет **наблюдать загрузку двигателя по величине разности номинального и текущего значений фазы и корректировать выходное напряжение, и магнитный поток соответственно, когда разность положительна и требуется увеличение момента на валу**. Для верного начального определения фазы угла вектора тока в программу введён **режим обкатки** – проворот поля на ~1 оборот при начале разгона (может выбираться пользователем, рекомендуется отключать при многодвигательном применении, если валы двигателей не связаны механически). **Для корректной работы детектора необходимо точное соблюдение номиналов деталей и типов диодов**. Элементы схемы, программные величины уровней напряжений и компенсаций установлены подходящими для большинства современных **IGBT транзисторов на напряжение к-э 1200В**. Они и **рекомендуются к применению** в инверторе преобразователя частоты “Восьмикрут HD”.

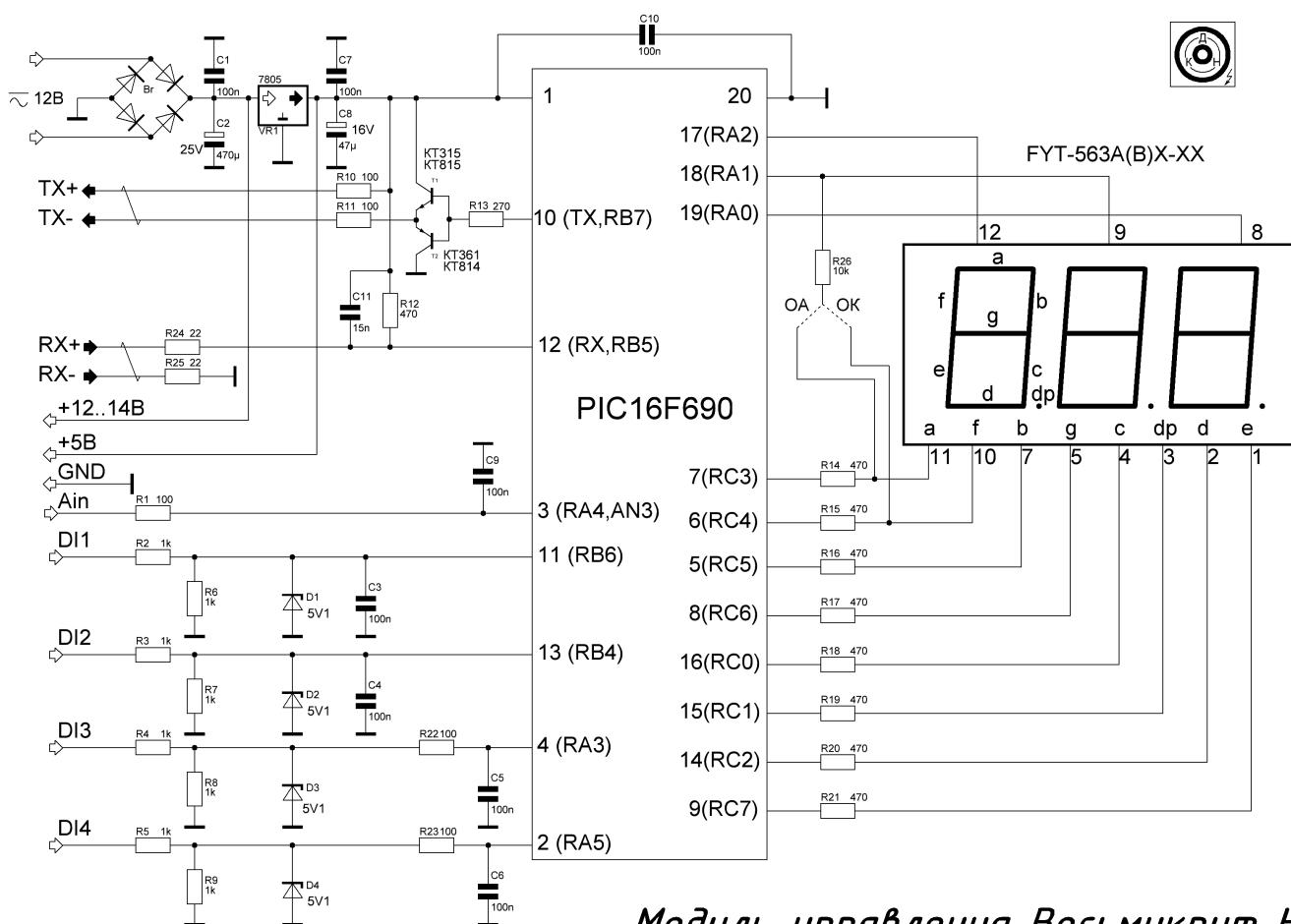


Схема силовой части остаётся без изменений (см. п. 2.2). Требования к БП сохраняются.

2.8 Схема модуля внешнего управления Восьмикрут HD

Для управления мотор-контроллером Восьмикрут HD и отображения состояний привода предлагается модуль с дискретными входами и аналоговым входом, а также трёх знаковым семи сегментным индикатором.

Схема представлена ниже:



Модуль управления Восьмикрут HD

Рис 8б. Схема модуля внешнего управления преобразователя “Восьмикрут HD”

Основа - микроконтроллер PIC16F690. Он осуществляет приём данных, отображение (частота на сегментах 1кГц), опрос входов и передачу управляющих команд в реальном времени.

Питание схемы может производиться от гальванически-изолированного источника постоянного или переменного напряжения 12В. Но, при вариантах силового питания Восьмикрута HD от трёх фаз или использования удвоителя напряжения (**HD600**), когда импульсный БП24В питается не от DC-звена, а от сетевого напряжения 220В, необходимо использовать отдельный маломощный НЧ



трансформатор, запитанный параллельно с импульсным БП 24В для реализации функции защиты от пропажи сетевого напряжения (см. п.3.1 и п.5.0).

Полярность для свечения индикатора (ОА или ОК) определяется подтягивающим резистором R26, а при его отсутствии, по проводимости светодиодов (может не сработать из-за высокого падения напряжения на светодиодах некоторых индикаторов).

Имеются 4 дискретных входа DI, с напряжением 12В..14В, что улучшает пробиваемость оксидного слоя контактов (5В маловато и могут возникать проблемы с “плохими контактами”). Аналоговый вход A_{in} на напряжение 5В используется для аналогового задатчика частоты и параметров темпов. Установленные параметры сохраняются в памяти PIC16F690.

Модуль управления подключается к моторной плате двумя витыми парами и может быть удалённым от моторной платы, (испытания проводились на 2метрах, но возможно и больше т.к. сигналы интерфейса токовые). Также провода дискретных входов могут быть выведены удалённо, до 10м и более. При удалённом подключении задатчика частоты – переменного резистора, его сопротивление целесообразнее выбирать ниже, например, 1кОм. Также необходимо во всех случаях придерживаться правила, что **сигнальные кабели всегда прокладываются отдельно от силовых.**

Схема подключения входов, а также описание отображающихся ошибок имеется в архиве с программой.



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 7-12В 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. Именно такой способ развязки изначально



заложен в модернизированной системе управления Восьмикрут HD, где применяется отдельный внешний модуль управления, развязанный и запитанный **от отдельного НЧ трансформатора.**

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÷2с) 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 ($\geq 150\text{мкФ}$) 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).

Примечание. Запитка БП от DC звена способствует быстрому разряду конденсаторов при снятии питания, что повышает безопасность.



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 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). Отработка защиты в HD300 версии аналогична (375В).

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 0,5с после пропажи питающего сетевого напряжения (нагрузка – плата управления инвертором+реле+вентилятор обдува)**

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, и НЧ трансформатором см. п. 2.6). **При этом питание НЧ трансформатора гальваноразвязки (модуля внешнего управления для HD) осуществляется параллельно с основным БП** и при пропаже сетевого напряжения, сначала теряет питание гальваноразвязка (модуль внешнего управления для HD) и привод выключается, а уже после этого отключается БП и пропадает 24В.



Аналогично выполняется реализация защиты по пропаже напряжения питания при силовом подключении Восьмикрута HD600 от трёх фаз 380В или однофазном подключении по схеме с удвоителем напряжения, когда DC-звено имеет повышенное значение, а штатный БП может запитываться только от 220В. **(см. п.5.0)**

Допускается запитка БП от сети 220В, без дополнительных защит, если отсутствуют тормозные режимы работы и привод всегда находится под номинальной нагрузкой. При этом ошибка F02 отключает привод, затем следует отключение БП.

При силовом питании преобразователей частоты от модулей подкачки и коррекции коэффициента мощности “Бульдюк” и “Бульдюк HD600” необходима запитка БП непосредственно от DC-звена. В зависимости от номинального напряжения DC-шины (310В и 600В) компоненты схем БП будут отличаться. Особенности данных подключений и схемы высоковольтных БП рассматриваются отдельно. См. описание конструкций.

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



3.2 Рекомендованная схема БП и её проверка

Блок питания VOSMIKRUT

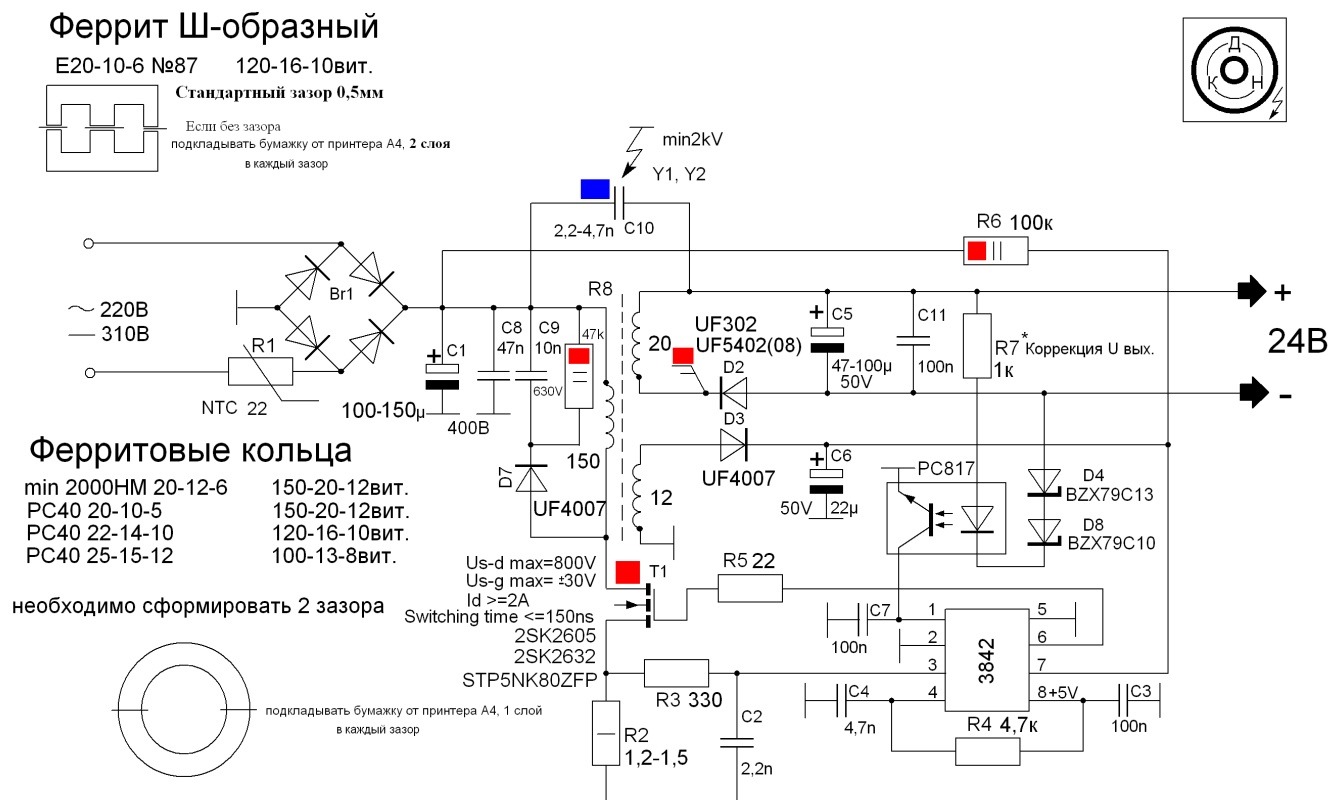


Рис 9. Схема принципиальная блока питания частотного преобразователя

Схема представляет собой обратноходовый (flyback) преобразователь на распространённом ШИМ контроллере серии UC3842B. Высокий коэффициент заполнения ШИМ позволяет расширить нижнюю границу диапазона питающих напряжений (частично возможен асимметричный режим неразрывного тока). В импульсном трансформаторе БП необходимо наличие немагнитного зазора. Сам трансформатор может быть выполнен как на стандартном Ш – образном ферритовом сердечнике, так и на кольцевом феррите (только нужно сломать или распилить целое ферритовое кольцо, сформировать зазоры и склеить его). На схеме обозначены применённые на практике марки ферритов и количество витков обмоток. Средний требуемый немагнитный зазор 0,4-0,5мм. Из-за искажения пути магнитного потока в областях зазора, и возможных неровностей и сколов краёв феррита реальный зазор оказывается выше физического, поэтому на практике для ферритовых колец достаточным является слой бумаги от листа A4, примерно 0,12-0,2мм плюс слой клея в каждом зазоре. При чётко обработанных краях подкладываются 2 слоя бумаги.

Стандартный Ш – образный сердечник E20-10-6 от EPCOS необходимо выбирать из феррита №87 со стандартным зазором 0,5мм. Если на имеющемся в наличии



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 стабилизаторов 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 300 силовой части Рис 3). **Для схем 220-380 и 380-380 (Варианты HD600) БП подключается от сети ~220В и рекомендуется устанавливать конденсатор С1 ёмкостью 150мкФ для увеличения задержки отключения и выполнения требований защиты.**
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 4.7н?

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 ощутимой 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 3 группы:

- под моторный контроллер PIC16F628(A)
- под моторный контроллер PIC16F648A
- под моторный контроллер PIC18F1330 (HD-версия)

По схемной реализации индикации первые две группы можно разделить на:

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

По схемной реализации управления частотой первые две группы можно разделить на:

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

Доп. опция

- управление двигателем постоянного тока

Максимально простой вариант частотного преобразователя имеет всего один контроллер (628A или 648A) и кнопки управления. Если понадобится использование, например, варианта с аналоговым задатчиком частоты (крутилкой), но без индикации частоты – это возможно, т.к. наличие или отсутствие индикатора не оказывает влияния на работу моторного контроллера.

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

Третья группа (HD-версия) – на момент выхода документа имеет реализацию для двигателей $\leq 4\text{кВт}$, $\leq 11\text{кВт}$, $\leq 15\text{кВт}$ (**15кВт для центробежных насосов и вентиляторов**). Работают с внешним управляющим модулем на контроллере PIC16F690. Он выполняет и функцию индикации (трёхзнаковый семисегментный



индикатор) и через него реализуется управление приводом, как аналоговым резистором (крутилкой), так и кнопками (режимы выбираются пользователем). ПО и схемы HD версии Восьмикрута на PIC18F1330 доступны [здесь](#) и [здесь](#).

Обновлённые архивы всех видов программ под все контроллеры [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 по вышеуказанным ссылкам имеются архивы с удобной иерархией каталогов, согласно приведённым ниже структурным схемам.

Структура программ 628 контроллера (шаг 1,25Гц)

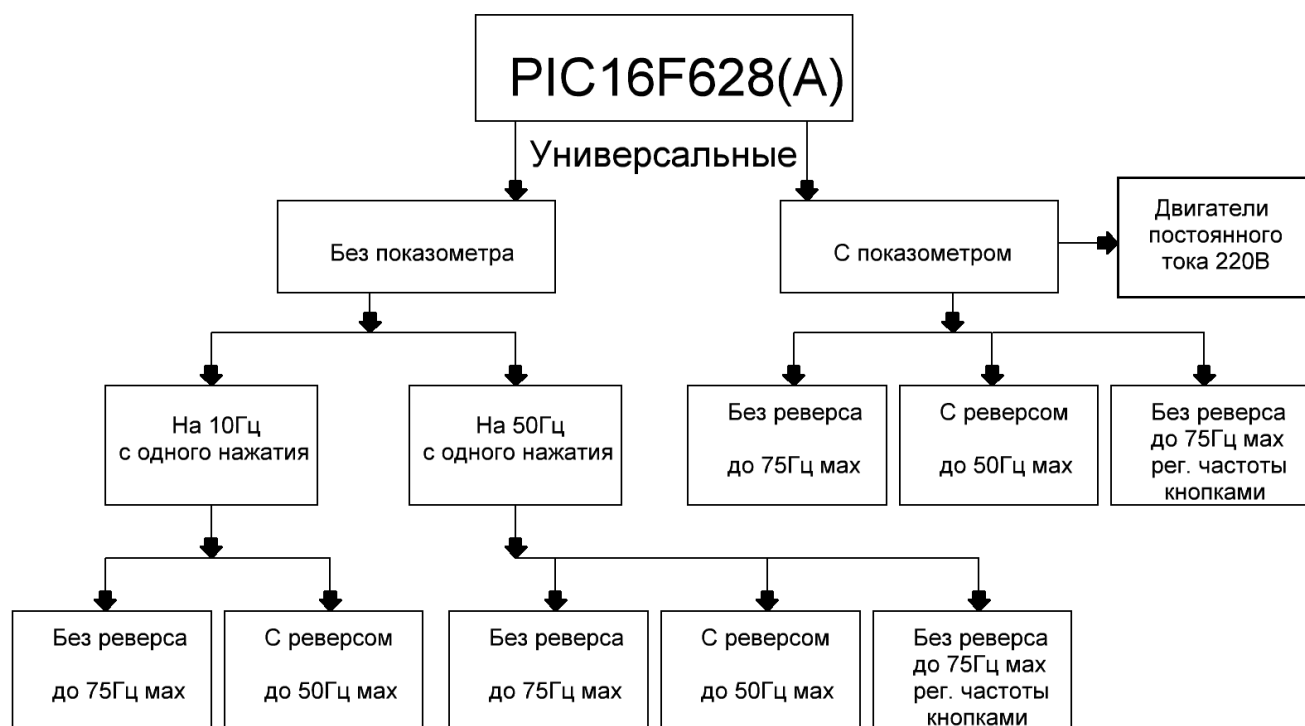


Рис 10А. Структурная схема различных вариантов программ “Восьмикрут” 628



Структура программ 648A контроллера

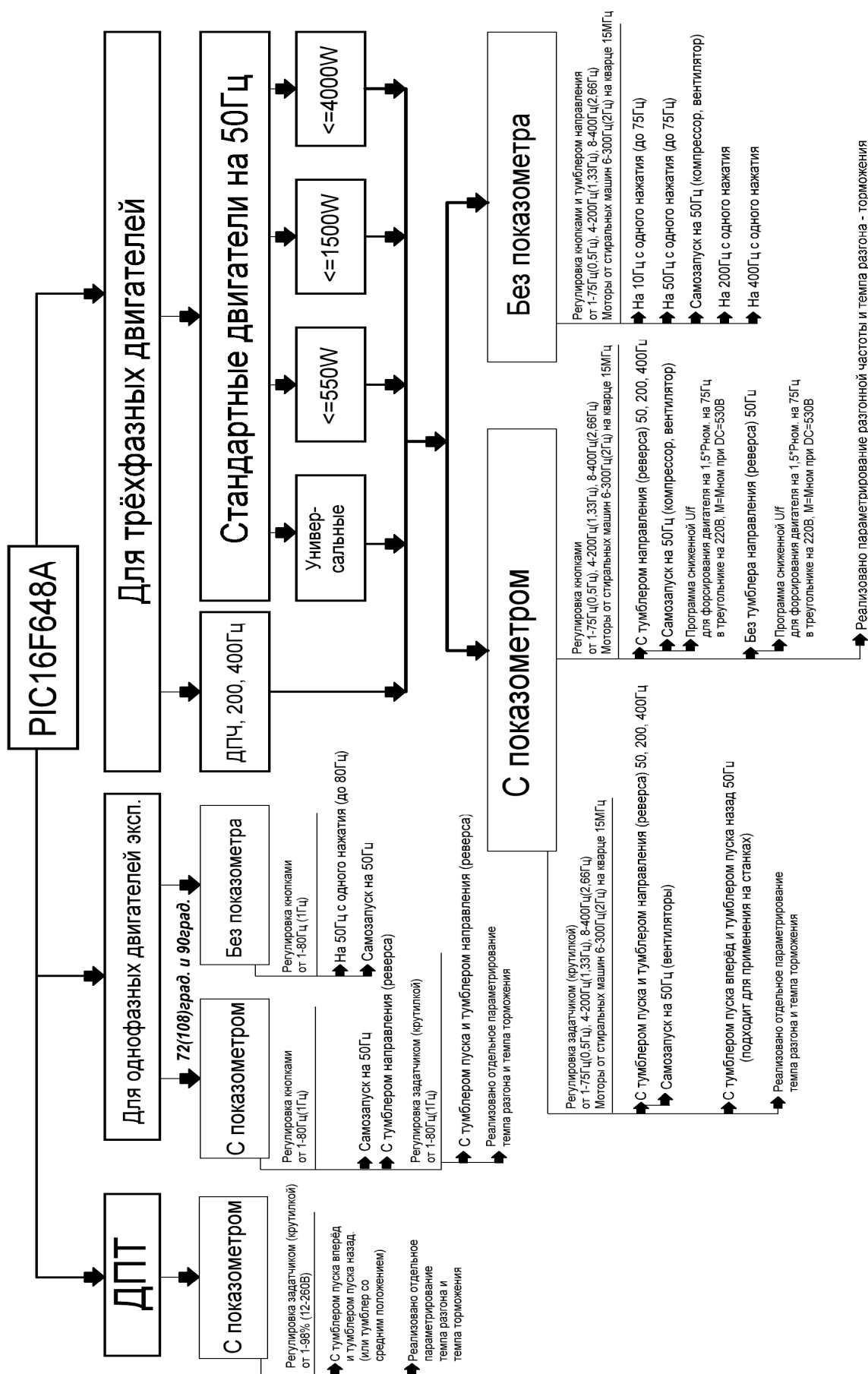


Рис 10Б. Структурная схема различных вариантов программ “Восьмикрут” 648А



Структура программ и схем Восьмикрут HD



Рис 10В. Структурная схема для “Восьмикрут HD” PIC18F1330



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 ещё контроллер PIC12F675 (или PIC16F676).

При реализации версий Восьмикрут HD – программируются всего два контроллера – моторный PIC18F1330 и управляющий PIC16F690. При этом управляющий контроллер совмещает функции показометра и задатчика частоты. Также возможно управление мотор-контроллером с любого другого управляющего контроллера или компьютера, например, через USB-COM (для HD300, а для HD600 требуется цепь дополнительной защиты от пропажи сетевого питания). Описание команд управления прилагается в архивах.

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, а также применяемый в HD версии контроллер PIC18F1330 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 PIC 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).

Файл для программирования имеет расширение HEX. Он содержит внутри все необходимые данные, в том числе и данные 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” и на HD-версии установлена конфигурация с выключенными битами защиты. Проблем с чтением памяти устройства быть не должно.

Пример рекомендуемой простой схемы программатора JDM:

JDM - Программатор для PIC- контроллеров

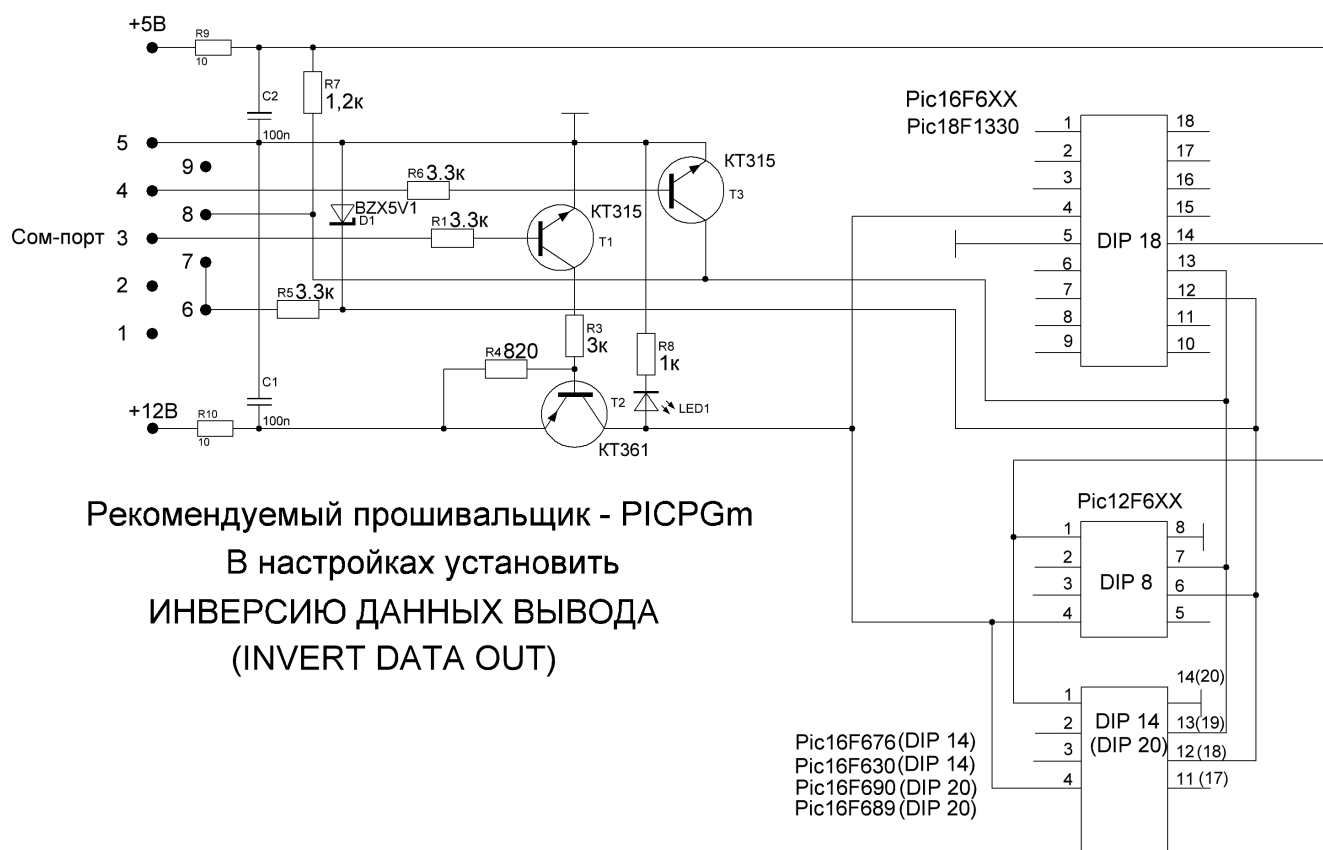


Рис 11. Принципиальная схема программатора JDM с внешним питанием.

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, PICpgm и др.)

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

Программирование PIC16F628A-648A, PIC18F1330, PIC16F690 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 для внутреннего RC-генератора (оно же осциллятора) и его можно по ошибке или незнанию стереть. 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 брешке 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 одноступенчатые 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 и без высокого напряжения.

По проверке плат Восьмикрут HD см. п 4.6, 4.7

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 HCPL 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 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).

6. 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:

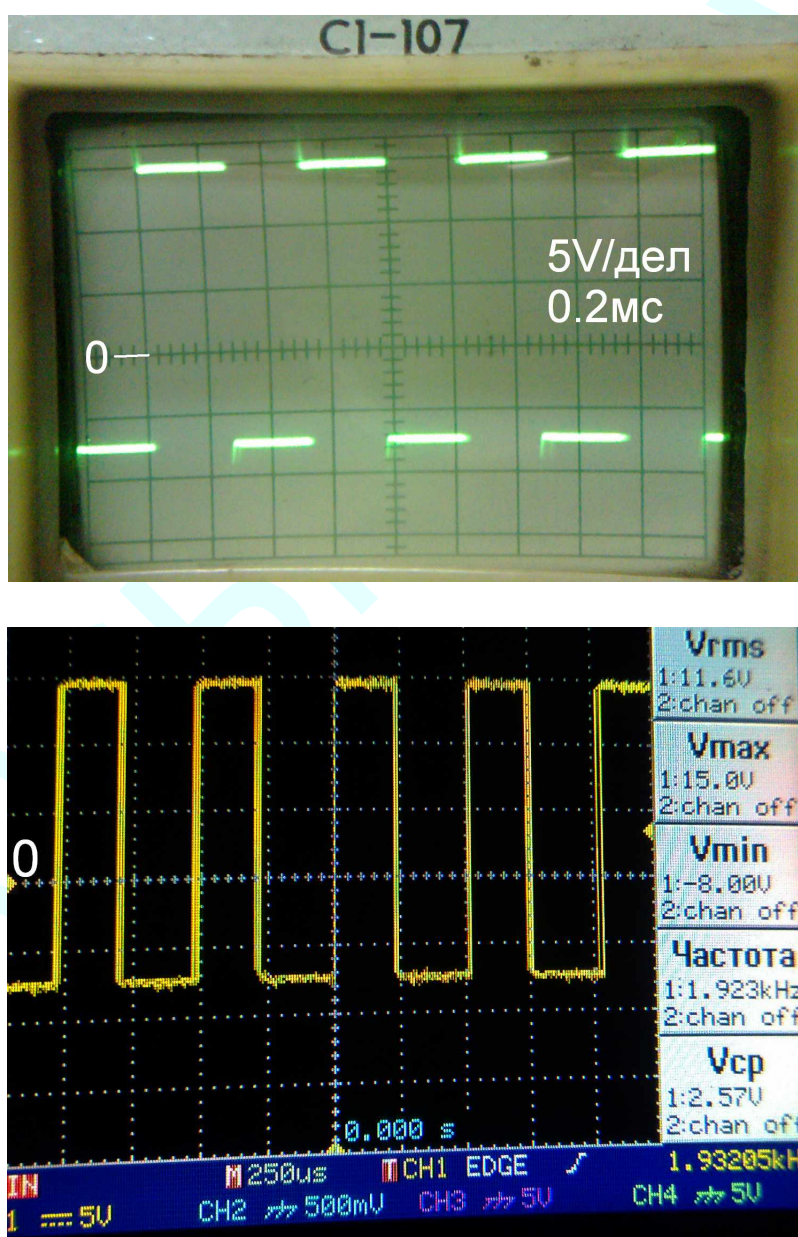


Рис 12. Осциллограммы управляющих импульсов на выходе платы управления при генерации контроллером выходной частоты 1Гц



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

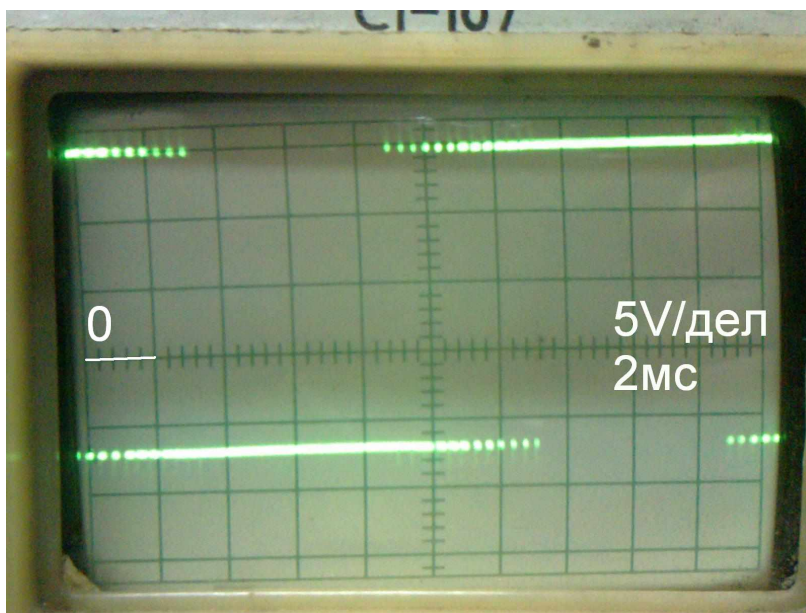


Рис 13. Осциллограмма управляющих импульсов на выходе платы управления при генерации контроллером выходной частоты 50Гц

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:

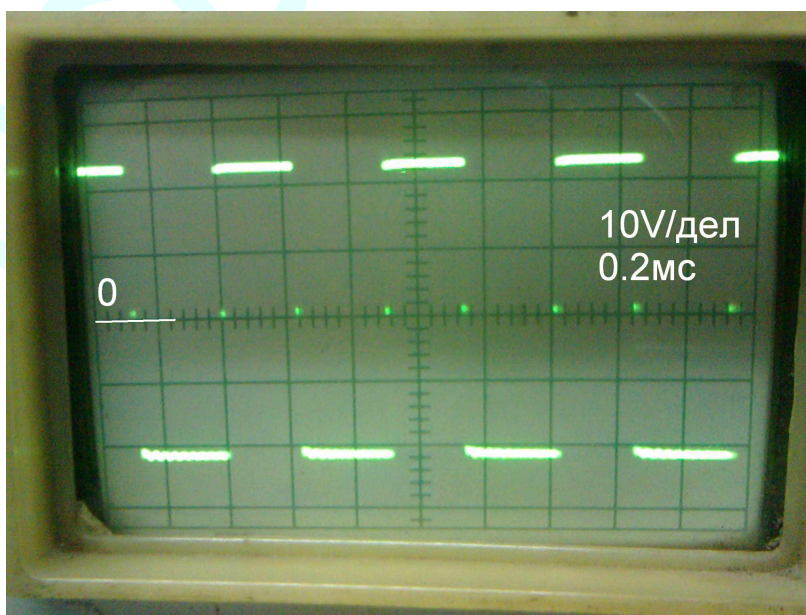


Рис 14. Осциллограмма сигнала между затворными выводами одной стойки ключей для проверки наличия мёртвого времени при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

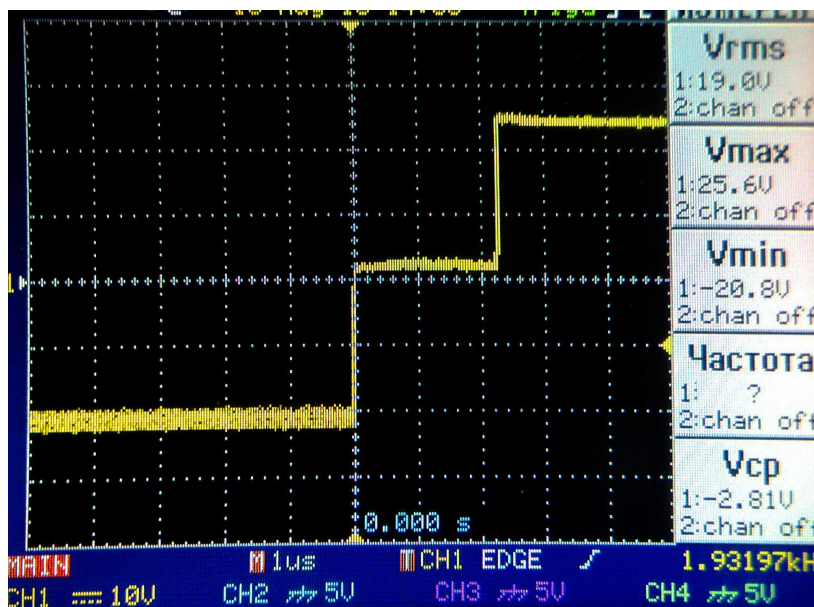


Рис 15. Цифровая осциллограмма сигнала между затворными выводами одной стойки ключей для проверки наличия мёртвого времени (2мкс) при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

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

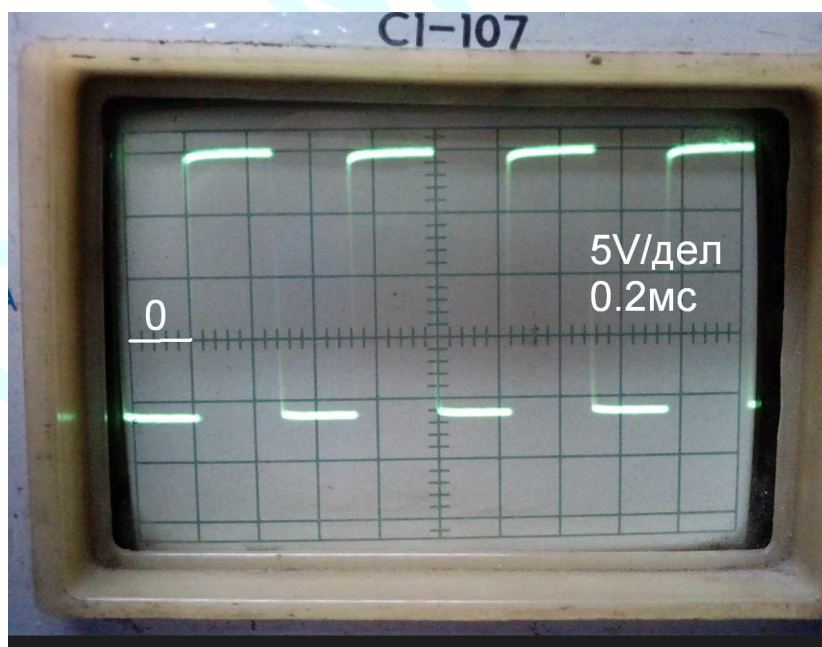


Рис 16. Осциллограмма импульсов на выходе платы управления на емкостную нагрузку 0,1мкф при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

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



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 C3) 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 перепрошивкой 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



4.6 Проверка модуля внешнего управления Восьмикрут HD

Данный пункт описывает проверку общей работоспособности изготовленной платы модуля внешнего управляющего контроллера (см. п 2.8) для Восьмикрута HD.

Полная проверка выполняется в связке с платой управления инвертором Восьмикрут HD. Текущая версия программы для модуля внешнего управления **HDU2** с возможностью выбора вариантов управления (подробнее см. pdf описание в архиве HD)

Понадобится для проверки:

- Источник питания 12В постоянного или переменного напряжения.
- Соединительные провода, нормально-замкнутая кнопка
- Мультиметр, светодиод

Возможные пункты проверки, перечислены ниже:

1. Внешний осмотр печатной платы, **проверка на отсутствие ошибок пайки.**
2. Подключить нормально-замкнутую кнопку **SB1 “Стоп, Сброс”** согласно схеме подключения, к входу **DI3**.
3. Подать напряжение питания 12В без установки контроллера, проверить **наличие 5В**.
4. Установить контроллер и снова подать питание 12В. **На индикаторах должно высветиться в течение секунды U01. и далее F01.**
5. Проверить наличие **5В** между выводами **RX**.
6. Проверить **появление импульсов напряжения между выводами TX при нажатии кнопки SB1 “Стоп, Сброс”**. Нагляднее всего подключить **светодиод** между выводами **TX**, соблюдая полярность. При нажатии кнопки светодиод должен светиться, что свидетельствует о работе выходного каскада передачи данных. Эту проверку можно сделать и мультиметром - он должен показывать постоянное напряжение ~1,7В.

При выполнении данных пунктов модуль готов к работе с платой управления инвертором HD.



4.7 Проверка платы управления инвертором Восьмикрут HD

Данный пункт описывает начальную проверку изготовленной платы управления инвертором (см. п 2.7) для Восьмикрута HD. Проверка выполняется без наличия силовой части и без высокого напряжения.

Полная проверка выполняется в связке с платой модуля внешнего управляющего контроллера (см. п 2.8) для Восьмикрута HD.

Понадобится для проверки:

- Источник питания 24В, >0,5А (изготовленный штатный или любой другой)
- Укомплектованную плату и прошитый моторный контроллер PIC18F1330
- Мультиметр
- Соединительные провода, проверенная (п. 4.6) плата модуля внешнего управления
- Источник питания 12В постоянного или переменного напряжения для модуля внешнего управления, кнопки и резистор “крутилки”
- Осциллограф (крайне желателен)
- Батарейка на напряжение 4,5В
- Конденсатор 0,1мкф для проверки драйверов на емкостной нагрузке
- Резистор 15кОм для имитации DC-напряжения

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, светодиода, подключение кнопки **“Сброс токовой защиты”** и интерфейсных пар проводов RX-TX к модулю внешнего управления согласно схеме. Подключение кнопок и “крутилки” к модулю внешнего управления согласно схеме.

2. Формирование питания верхних драйверов HCPL 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. Прижатой кнопке “Сброс токовой защиты” напряжение на 4 ножке должно отсутствовать.**

4. Проверка запуска контроллера совместно с платой модуля внешнего управления. Подключить питание на модуль внешнего управления. Показания



U01. и далее **F01.** Подключить питание платы управления инвертором. Показания должны измениться на **F02.**

5. Имитация наличия напряжения DC-звена. Выключить питание. Установить временно резистор 15кОм с питания +24В на 3 ножку контроллера (можно, например, припаять параллельно выводу резистора R80, который идёт на 3 ножку контроллера). Включить питание модуля внешнего управления и питание платы управления инвертором. Тумблер S1 “Пуск” должен находиться в нулевом положении. Показания при этом должны быть 0.0 с чередующимся отображением задания частоты с “крутилки”. При вращении резистора “крутилки” значение должно изменяться – от 0,5 до 75,0. Это состояние готовности к включению.

6. Запуск генерации ШИМ тумблером S1 “Пуск” в любую из сторон. При этом постоянно отображается выходная частота привода и возможно её регулировать “крутилкой”. При реверсе – частота снижается и снова возрастает, меняется знак. Произвести проверку выходных управляющих сигналов драйверов осциллографом. Форма управляющих импульсов должна быть как на Рис.12-Рис.16, но с частотой импульсов 2,44кГц (программа для насосов-вентиляторов 1,22кГц).

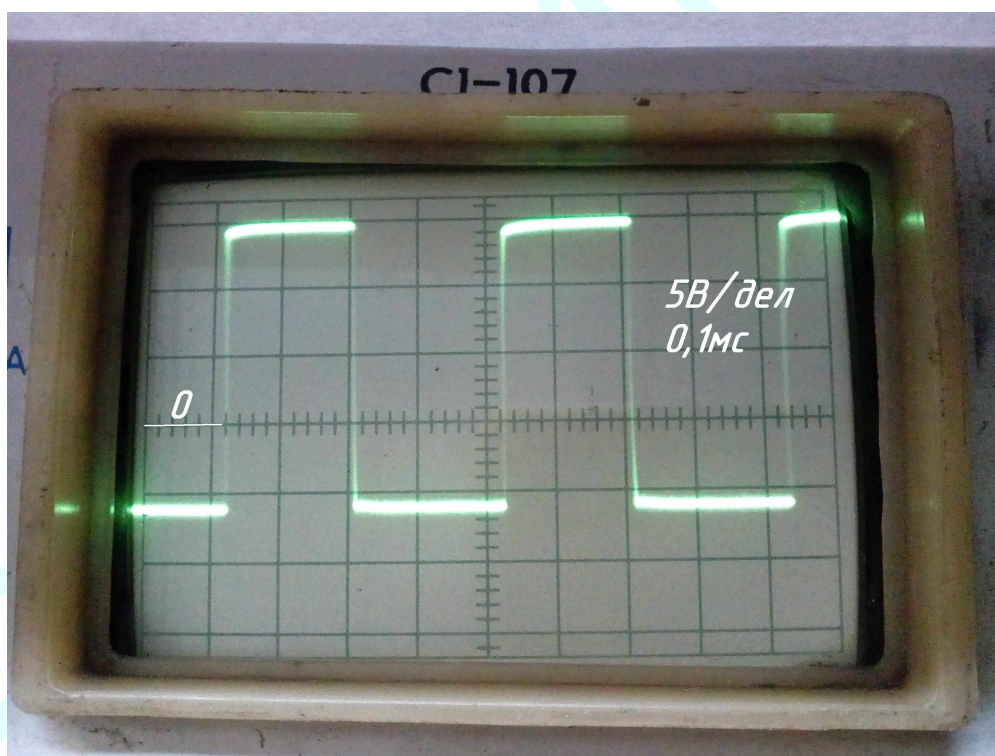


Рис 16а. Осциллограмма импульсов на выходе платы управления HD на емкостную нагрузку 0,1мкф при генерации контроллером выходной частоты 1Гц

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 им-



пульсов 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 токовой защиты”**, которая подключена непосредственно к плате управления инвертором. При этом на индикации будет отображаться **F01**. Кнопка **“Стоп, Сброс”**, с модуля внешнего управления, может сбросить только ошибки напряжения **F02** и **F03**, а сброс токовой защиты с неё недоступен.

8. Проверка уровня на детекторе напряжения ключа. Мультиметром измерить напряжение на **2 ножке** контроллера, оно должно составлять **~1,3В**.

При нормальной отработке этих пунктов, можно приступать к проверке с силовой частью, удалив установленные временные перемычки для питания драйверов, резистор для имитации наличия DC-звена.





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**

Магнитное поле катушки индуктивности или электрическое поле конденсатора обладают энергией, которая не может мгновенно измениться (для этого потребуется бесконечно большая скорость передачи энергии = мощность).

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 ($W = LI^2/2$). 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 ($W = CU^2/2$). 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).



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 данным 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 одного или нескольких плёночных конденсаторов, располагаемых на шинах DC-питания в непосредственной близости к силовым ключам (С36, см. силовые схемы).



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.

5.0 Классификация возможных силовых схем

Могут быть выполнены разные схемы силового питания и выпрямителей для преобразователей частоты Восьмикрут и Восьмикрут HD:

- **вход 1Ф ~220В** - мост, **выход 3Ф ~220В**, напряжение DC-звена 300В
- **вход 1Ф ~220В** - удвоитель, **выход 3Ф ~380В**, напряжение DC-звена 600В
- **вход 3Ф ~380В** - мост (Ларионова), **выход 3Ф ~380В**, напряжение DC-звена 535-600В
- **питание постоянным напряжением** от внешнего блока силового питания “Бульдюк”, напряжение DC-звена 310В, **выход 3ф ~220В**
Информация [здесь](#) и [здесь](#)
- **питание постоянным напряжением** от внешнего блока силового питания и торможения “Бульдюк HD600” AFE, напряжение DC-звена 600В, **выход 3ф ~380В (лучшее решение для приводов >3кВт)**
Информация [здесь](#) и [здесь](#)
- **тормозной модуль** для напряжения DC-звена 300В и 600В
Информация [здесь](#) и [здесь](#)

Примечание. Под словом “вход 1Ф ~220В” подразумевается действующее значение переменного синусоидального напряжения, от которого питается преобразователь частоты.

Под словом “выход 3Ф ~220В” подразумевается значение выходного ШИМ-эквивалента напряжения для индуктивной нагрузки.

ШИМ-эквивалент напряжения 220В – это модуляция, которая задаёт ток намагничивания двигателя эквивалентный току намагничивания при подключении к синусоидальному напряжению с действующим значением 220В.



<DC-AC> VOSMIKRUT – устройство и наладка



Измерение ШИМ-эквивалента недоступно для простых цифровых мультиметров.

Ниже представлены варианты возможных силовых схем, таблицы рекомендуемых кабелей и аппаратов для подключения приводов, а также данные получаемых крутящих моментов для частоты 50Гц, токов и мощностей для разных вариантов силовых схем, и управлений:

ВОСЬМИКРУТ



- 70 -



Управление Восьмикрут 648А Вх220В-Вых220В, мостовая схема выпрямителя

Номинальная мощность двигателя, кВт	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3	4
Минимальное сечение кабеля двигателя, мм ²	1	1	1	1	1,5	1,5	2,5
Выходной номинальный ток, А	2,5	3	4,5	6	9	12	16
Ток IGBT, А (Т=80град. С)	5	6	10	12	18	24	32
Минимальное сечение вводного кабеля, мм ²	1	1	1,5	1,5	2,5	4	4
Входной ток, А	5	7	10	14	18	25	30
Полная мощность, кВА	1,3	1,7	2,4	3,3	4,5	6	7,7
Коэффициент снижения момента, на частоте 50Гц, М/Мном	1	1	1	0,9-1	0,8-1	0,6-0,95	0,45-0,75
Рекомендуемая ёмкость DC-шины, мкФ	660	660	1000	1500	1800	2000	2000
Сопротивление шунта, Ом	~0,22	~0,2	~0,18	~0,15	~0,1	~0,094	~0,075
Вводной Автомат, А	10	10	16	16	25	32	32

Таблица 1 – Вх220В-Вых220В, мост, Восьмикрут PIC16F648А

Для обеспечения штатной работы электродвигателей, а также минимизации влияния ШИМ преобразователя на их ресурс, рекомендуется:

- применение ВЧ-фильтра синфазных помех на выходе инвертора (У конд. и ферритовые кольца, см. п. 2.2)

- необходимо двигатель соединять на 220В (в треугольник)



Управление Восьмикрут HD
Вх220В-Вых220В, мостовая схема выпрямителя

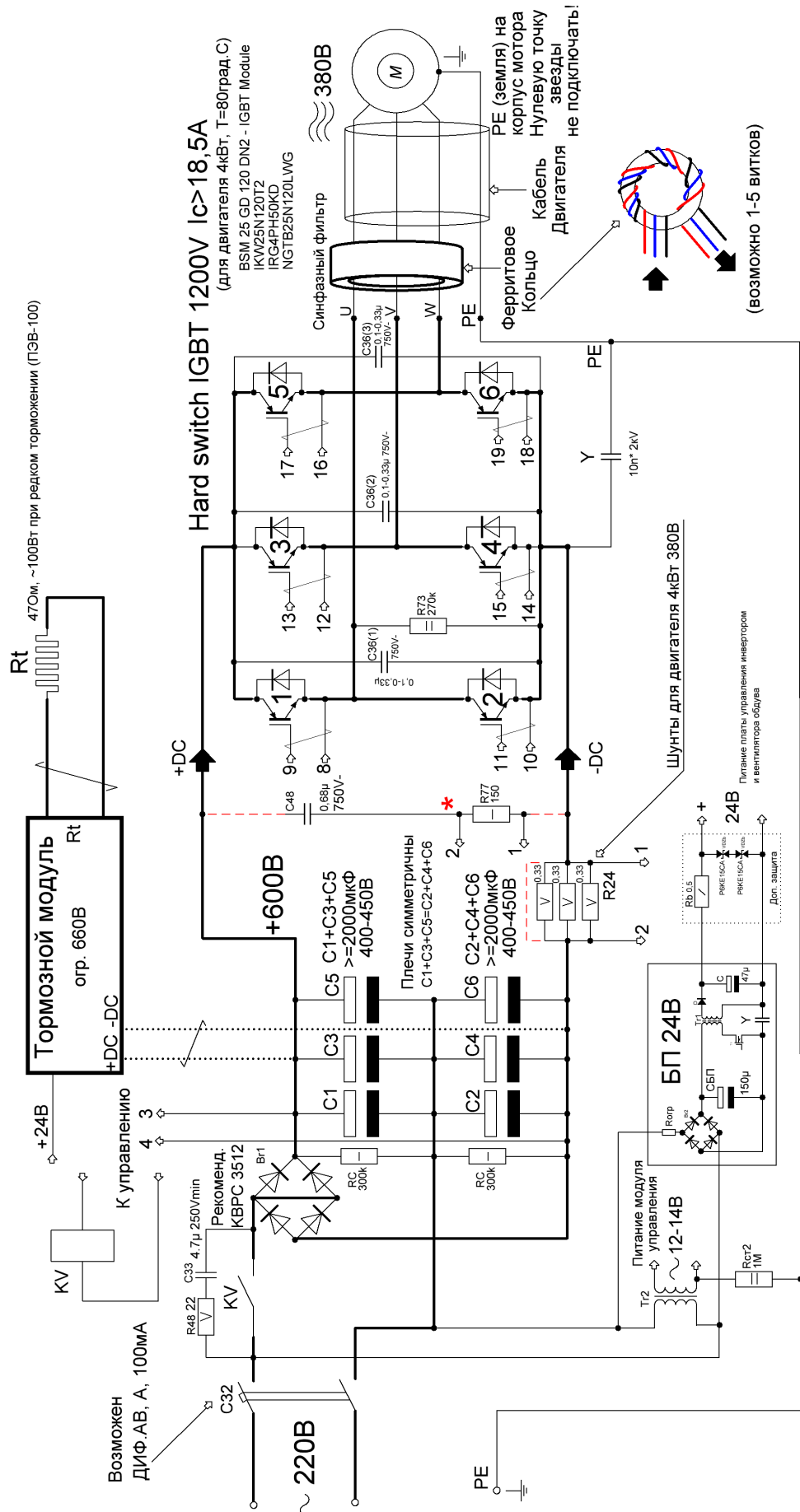
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3	4
Минимальное сечение кабеля двигателя, мм ²	1	1	1	1	1,5	1,5	2,5
Выходной номинальный ток, А	2,5	3	4,5	6	9	12	16
Ток IGBT, А (Т=80град. С)	5	6	10	12	18	24	32
Минимальное сечение вводного кабеля, мм ²	1	1	1,5	1,5	2,5	4	4
Входной ток, А	5	7	10	14	18	25	30
Полная мощность, кВА	1,3	1,7	2,4	3,3	4,5	6	7,7
Коэффициент снижения момента, на частоте 50Гц, М/Мном	1	1	1	0,9-1	0,8-1	0,6-1	0,45-0,8
Рекомендуемая ёмкость DC-шины, мкФ	660	660	1000	1500	1800	2000	2000
Сопротивление шунта, Ом	~0,22	~0,2	~0,18	~0,15	~0,1	~0,094	~0,075
Вводной Автомат, А	10	10	16	16	25	32	32

Таблица 2 – Вх220В-Вых220В, мост, Восьмикрут HD PIC18F1330

Для обеспечения штатной работы электродвигателей, а также минимизации влияния ШИМ преобразователя на их ресурс, рекомендуется:

- применение ВЧ-фильтра синфазных помех на выходе инвертора (Y конд. и ферритовые кольца, см. **п. 2.2**)

- необходимо двигатель **соединять на 220В (в треугольник)**



* Цепь С48-R77 используется для максимальной токовой защиты без применения шунта +ДИФ.АВ, А, 100мА для защиты при утечке на землю

Рис 19. Схема с удвоителем напряжения, вход 220В-выход 380В.



Управление Восьмикрут HD600

Вх220В-Вых380В, схема выпрямителя с удвоением напряжения

Номинальная мощность двигателя, кВт	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5	11
Минимальное сечение кабеля двигателя, мм ²	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	4
Выходной номинальный ток, А	3,5	5	7	9	11	15	22
Ток IGBT, А (T=80град. С)	7	10	14	18,5	23	32	45
Минимальное сечение вводного кабеля, мм ²	1,5	2,5	4	4	4	6	6
Входной ток, А	14	18	25	30	32	>32	>32
Полная мощность, кВА	3,3	4,5	6	7,7	~8	~8	~8
Коэффициент снижения момента, на частоте 50Гц, М/Мном	1	0,9-1	0,7-1	0,5-1	0,35-0,75	0,27-0,6	0,2-0,45
Рекомендуемая ёмкость DC-шины, мкФ	750 (2x1500)	900 (2x1800)	1000 (2x2000)	1000 (2x2000)	1000 (2x2000)	1100 (2x2200)	1100 (2x2200)
Сопротивление шунта, Ом	~0,25	~0,2	~0,16	~0,11	~0,094	~0,075	~0,055
Вводной Автомат, А	16	25	32	32	32	32	32

Таблица 3 – Вх220В-Вых380В, удвоитель, Восьмикрут HD600 PIC18F1330

Цветом помечены мощности двигателей, использование которых при питании преобразователя частоты от однофазной сети ограничено сетью (номинальная мощность не будет достигнута). Но, преобразователь частоты позволяет с лёгкостью запускать и использовать мощные двигатели при питании от однофазной сети, с частичной загрузкой на частотах близких к номинальной. Коэффициент снижения момента указан в таблице.

На средних оборотах возможен номинальный момент на валу. По торможению ограничений нет. При наличии тормозного модуля, торможение может осуществляться с номинальным моментом и с номинальных оборотов. Темп подбирается пользователем. См. PDF файл в папке с программой.



Для обеспечения штатной работы электродвигателей, а также минимизации влияния ШИМ преобразователя на их ресурс, рекомендуется:

- применение ВЧ-фильтра синфазных помех на выходе инвертора (Y конд. и ферритовые кольца, см. **п. 2.2**)

- двигатель следует **соединять на 380В (в основном звездой)**. В большинстве случаев именно так внутри соединены двигатели, которые имеют всего три вывода. Применение схемы удвоителя позволяет штатно эксплуатировать такие машины от 220В (не требуется выводить недостающие три провода, чтоб соединить в треугольник)

- двигатели на напряжение в треугольнике 380В и в звезде 660В соответственно соединять **на 380В в треугольник**. Двигатель может быть использован полностью или частично в зависимости от его мощности и состояния питающей сети.

Применение схемы выпрямителя с удвоением напряжения в системе трёхфазного асинхронного привода при питании от однофазной сети позволяет получить большую эффективность по сравнению с классической мостовой схемой. Среднее улучшение по моменту на номинальной частоте двигателя составляет 1,15 (15%).

Применение классического управления Восьмикрут600 на PIC16F648A с удвоителем напряжения рекомендуется только для постоянно-нагруженных приводов и с применением защиты от пропажи сетевого напряжения. В режиме холостого хода и малой загрузки существуют дополнительные потери в двигателе (связано с увеличенным выходным напряжением).

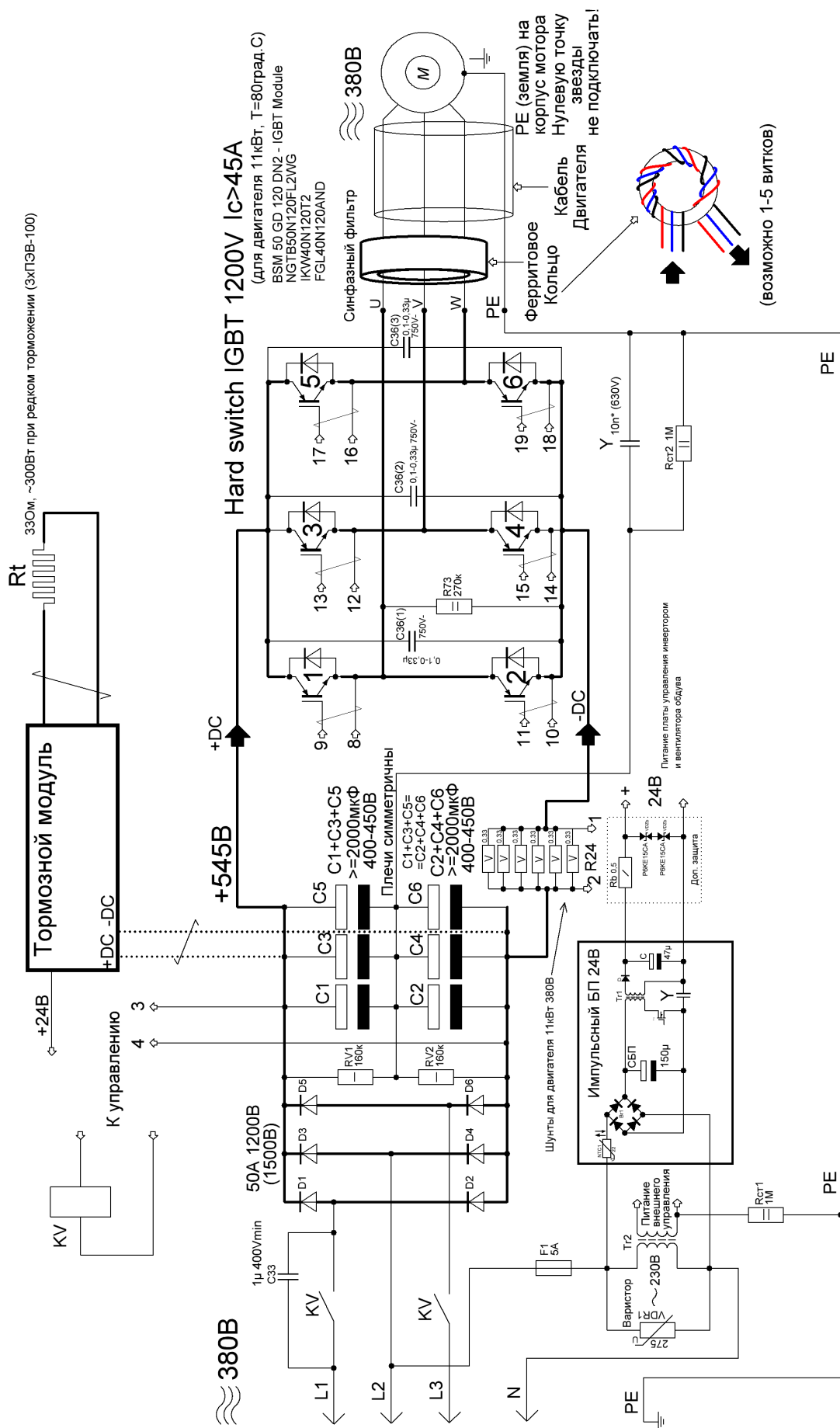


Рис 20. Схема с трёхфазным питанием, вход 380В-выход 380В.



Управление Восьмикрут HD600

Вх380В-Вых380В, схема трехфазного двухтактного выпрямителя (Ларионова)

Таблица рекомендуемых данных для подключения приводов и получаемый момент на 50Гц

Номинальная мощность двигателя, кВт	1,5	2,2	3	4	5,5	7,5	11
Минимальное сечение кабеля двигателя, мм ²	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5 (4)	4 (6)
Выходной номинальный ток, А	3,5	5	7	9	11	15	22
Ток IGBT, А (T=80град. С)	7	10	14	18,5	23	32	45
Минимальное сечение вводного кабеля, мм ²	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5 (4)	4 (6)
Входной ток, А	4	5	7,5	10	15	20	28
Полная мощность, кВА	3	3,6	5,2	7	10,4	14	20
Коэффициент снижения момента, на частоте 50Гц, М/Мном	1	1	1	1	1	1	1
Рекомендуемая ёмкость DC-шины, мкФ	110 (2x220)	165 (2x330)	235 (2x470)	280 (2x560)	500 (2x1000)	1000 (2x2000)	1000 (2x2000)
Сопротивление шунта, Ом	~0,25	~0,2	~0,16	~0,11	~0,094	~0,075	~0,055
Вводной Автомат, А	16	16	16	25	25	32	32

Таблица 4 – Вх380В-Вых380В, трёхфазное питание, Восьмикрут HD600 PIC18F1330

Цветом отмечено сечение кабелей, которое необходимо применять при длине трассы более 5м.

При наличии тормозного модуля, торможение может осуществляться с номинальным моментом и с номинальных оборотов. Темп подбирается пользователем. См. PDF файл в папке с программой.



Для обеспечения штатной работы электродвигателей, а также минимизации влияния ШИМ преобразователя на их ресурс, рекомендуется:

- применение ВЧ-фильтра синфазных помех на выходе инвертора (У конд. и ферритовые кольца, см. **п. 2.2**)

- двигатель следует **соединять на 380В (в основном звездой)**. В большинстве случаев именно так внутри соединены двигатели, которые имеют всего три вывода.

- двигатели на напряжение в треугольнике 380В и в звезде 660В соответственно соединять **на 380В в треугольник**.

С данной трёхфазной схемой питания двигатель может быть использован полностью.

Примечание. Существует нестандартное подключение асинхронного двигателя, когда обмотки соединяются на 220В (треугольник), а в частотном преобразователе используется удвоитель напряжения или трёхфазное питание и его выходное напряжение может быть 380В. Работа двигателя обеспечивается сниженной U/f рампой. При этом возникает запас по намагничивающему напряжению и возможно выполнение форсирования двигателя по мощности (работа на 75Гц с номинальным моментом).

Данное решение, наряду с достоинствами увеличения мощности, **снижает ресурс изоляции двигателя**, возможны значительные **подшипниковые токи**, **повышаются потери** в стали, в обмотках статора и ротора из-за **усиления высокочастотных гармоник тока**. При использовании такого подключения рекомендуется **применение DU/dt и синус - фильтров**.

Далее подробнее рассмотрены критерии выбора IGBT ключей в инвертор.



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 отпирания 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

Обратные диоды в IGBT 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 (в инверторе на полевых транзисторах силовой ток проходит через канал, проводящий в любом направлении). 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 IGBT транзистором и обратным диодом второго IGBT 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.

$$U_{кэ} > (U_{dcmax} + U_k)/0,8$$

где: Uкэ – максимальное допустимое 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, от используемой схемы выпрямителя, 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 схеме управления “Восьмикрута” и “Восьмикрута HD” с напряжением DC-звена 300В реализована защитная функция, отключающая генераторный режим при напряжении DC-звена >370В. С учётом возможных пульсаций напряжения и разброса параметров цепей можно принять **Udcmax =390В**. Для схемы с DC-звеном 535-600В (Восьмикрут600 и Восьмикрут HD600) **Udcmax =720В**.

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 “бутербродной или сэндвич” 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” и “Восьмикрут HD”, смонтированного простым навесным монтажом ключей (модулей) на радиаторе или размещённых на односторонней печатной плате - рекомендуется применение IGBT транзисторов промышленного 12 класса по напряжению - 1200В.

Для схем с напряжением DC-звена 535-600В применение IGBT на 1200В является необходимым условием.

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 $E = 10^{-7} \text{ Гн} \cdot (10^2 \text{ А})^2 = 10^{-3} \text{ Дж.}$

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 C36 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-контра 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 C36 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 C36 уже после закрытия ключа может достигнуть величины $U_{dc}+400B$ с последующей релаксацией.

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

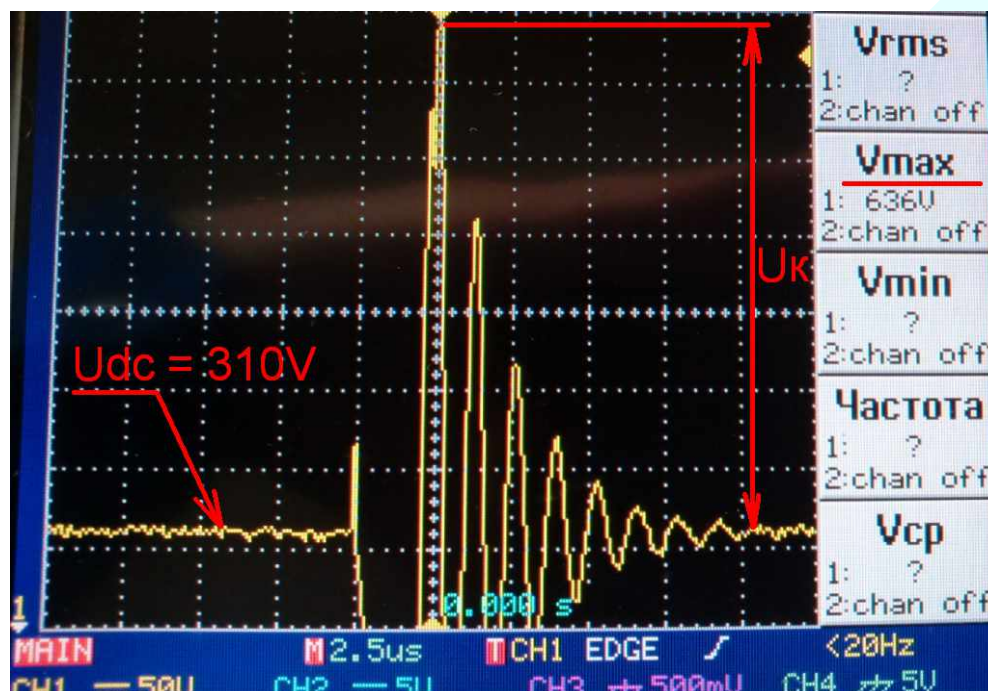


Рис 21. Осциллограмма напряжения к-э IGBT транзистора при отключении тока короткого замыкания.

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 C36 на DC - шинах накопленная индуктивная энергия переходит в тепло кристалла, при этом перенапряжения при номинальных токах возможны до 250-300B.

Если подставить в формулу выбора $U_{kэ}$ величину перенапряжения при выходе из режима короткого замыкания при $U_{dcmax} = 390B$, получится:

$$U_{kэ} > (390B+400B)/0,8$$
$$U_{kэ} > 987,5B$$

Для инвертора с напряжением DC-звена 600B рекомендуется применение IGBT ключей с меньшим значением максимального импульсного тока коллектора (менее 180A, например, IRG4PH50KD – 90A, вместо IRG4PH50UD – 180A) и применение трёх



снабберных конденсаторов С36 0,1-0,22мкф напряжением не ниже 750В на каждой стойке ключей. При этом импульс перенапряжения при выходе из режима к-з будет снижен **Uк ~ 200В** и менее в зависимости от амплитуды тока.

Тогда при **Udcmax** = 720В получится:

$$U_{кз} > (720В + 200В) / 0,8$$

$$\underline{U_{кз} > 1150В}$$

При применении мощных IGBT модулей с большими значениями максимальных токов возможно увеличение емкости снабберных конденсаторов до 1-3,3мкФ и применение дополнительной защиты от перенапряжений, компоненты которой следует рассматривать отдельно (например, каскад супрессоров).

5.4 Номинальный ток IGBT

Главный параметр силового электронного блока преобразователя частоты – **номинальный ток**. Основными **исходными данными для сборки инвертора являются питающее напряжение и номинальный ток двигателя**, для которого он собирается.

Примечание. Если двигатель на 11кВт, то силовые компоненты инвертора должны рассчитываться на ток этого двигателя. **Номинальное действующее значение** тока двигателя указывается на шильдике в зависимости от используемого напряжения питания. Обычно указываются два значения тока для разных напряжений и схем соединения, звезды и треугольника.

С целью нахождения простого и оптимального способа выбора современных силовых HARD SWITCH IGBT транзисторов были рассмотрены режимы работы ключей при различных коэффициентах модуляции. Учитывались факторы, оказывающие влияние на их режим работы, в том числе применяемые в “Восьмикрутах” частоты ШИМ и алгоритмы управления инвертором. Ниже предлагается общая информация для определения исходных данных и наиболее простой метод выбора транзисторов по номинальным значениям тока или мощности двигателя и значению длительно-допустимого постоянного тока коллектора силового транзистора из справочных данных (datasheet).



Общая информация по определению тока и подключению моторов.

Если известна только мощность двигателя, то до значений ~5,5кВт для схемы треугольника на 220В, ток можно с приемлемой точностью рассчитать так:

$$I_{\text{д}} = 4 * P_{\text{д}}$$

где: $I_{\text{д}}$ – номинальный ток двигателя при соединении на 220В (в треугольнике), А
(действующее значение)

$P_{\text{д}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт

Для соединений на 380В ток можно рассчитать аналогично:

$$I_{\text{д}} = 2,3 * P_{\text{д}}$$

где: $I_{\text{д}}$ – номинальный ток двигателя при соединении на 380В, А
(действующее значение)

$P_{\text{д}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт

Если планируется подключать к преобразователю частоты **несколько моторов** (например, несколько станков или других механизмов, **работающих отдельно**), необходимо брать за исходные данные **наибольший ток** (ток самого мощного мотора).

Если планируется работа механизма с многодвигательным приводом, когда несколько моторов работают **одновременно** и питаются параллельно от одного частотного преобразователя (например – зерновесельный агрегат) следует брать за исходные данные сумму номинальных токов всех параллельно-включенных моторов.

Примечание. В версиях Восьмикрут HD – при параллельном включении моторов рекомендуется отключать режим повышенного момента, если валы моторов не связаны механически.

При работе привода всегда возможны обстоятельства, когда номинальный ток двигателя должен быть превышен. Это могут быть такие режимы как тяжёлый и (или) быстрый разгон (торможение), силовая работа на низких частотах, перегрузка и т.д.

Питание от однофазной сети по мостовой схеме выпрямителя, без дополнительных устройств подкачки звена и коррекции коэффициента мощности (см. “Бульдюк”), предполагает всегда сниженное напряжение DC-звена в работе, соответственно будет снижено и напряжение на двигателе (удвоитель напряжения см. HD600, в этом случае действует эффективнее благодаря запасу напряжения). Для асинхронного мотора величина питающего напряжения очень важна (зависимость момента от напряжения квадратичная).



Из-за просадки напряжения на моторе при нагрузке, падает магнитный поток, момент на валу создается уже за счёт повышенного скольжения двигателя и увеличения потребляемого тока сверх номинала. При этом ток повышается больше, чем момент, а обороты проваливаются.

Ток двигателя будет превышать номинальный и в режимах быстрого торможения привода с превышением номинального момента.

Для обеспечения надёжной всережимной работы инвертора частотного преобразователя “Восьмикрут” и “Восьмикрут HD” рекомендуется выбирать двойной запас по выходному току инвертора по отношению к номинальному току двигателя.

Кзт = 2 - коэффициент запаса по току.

Силовая часть также должна **периодически обеспечивать ток выше номинального значения в течение времени**, которое определяется режимом привода, параметрами охлаждения силовых компонентов и двигателя.

Приблизительная средняя перегрузочная способность для инвертора - ~ 1,5 номинальных тока двигателя в течение 1 минуты, с повтором каждые 5мин.

При любительском построении инвертора, его силовые приборы и охладители будут отличаться от конструкции к конструкции, поэтому перегрузочная способность реальных конструкций по времени будет различной.

Примечание. Правильный выбор по току силовой части позволяет эксплуатировать преобразователь частоты без опасения “лишний раз поднадавить”. Из практики применения приводов “Восьмикрут” в условиях домашней мастерской, значительно удобнее, когда преобразователь штатно выдерживает периодическую кратковременную токовую перегрузку от полутора до двух номиналов тока, не отключаясь по токовой защите.

Условия выбора тока силового транзистора.

Выбор по номинальному току двигателя:

$$I_k \geq I_d * K_{zt}$$

где: ***I_k*** – длительно допустимый постоянный ток коллектора при 80° С, ***A***
I_d - номинальный ток двигателя, ***A***
K_{zt} – коэффициент запаса по току, рекомендуется ***K_{zt}=2***



Выбор по мощности двигателя с коэффициентом запаса $K_{zt} = 2$ при напряжении двигателя 220В и до мощности ~5,5кВт:

$$I_k \geq 8 * P_d$$

где: I_k – длительно допустимый постоянный ток коллектора при 80° С, А
 P_d – номинальная мощность двигателя, кВт

Данное соотношение легко запомнить, как **“Правило 8”** для выбора транзисторов в инвертор частотных преобразователей “Восьмикрут” по мощности двигателя при напряжении двигателя 220В.

Выбор по мощности двигателя с коэффициентом запаса $K_{zt} = 2$ при напряжении двигателя 380В (HD600) и до мощностей ~11кВт:

$$I_k \geq 4,5 * P_d$$

где: I_k – длительно допустимый постоянный ток коллектора при 80° С, А
 P_d – номинальная мощность двигателя, кВт

Приведённые условия выбора справедливы для инверторов с симметричным режимом работы ключей и частотами ШИМ 2,5-5кГц в зависимости от динамических потерь применяемого силового транзистора. При более высоких частотах ШИМ динамические потери растут и, соответственно, снижается допустимая токовая нагрузка. Кроме этого возрастают нелинейные искажения генерируемого инвертором сигнала, из-за увеличивающегося влияния мертвого времени. В системах управления “Восьмикрут” и “Восьмикрут HD” для стандартных асинхронных двигателей на 50Гц не применяются частоты ШИМ более 4,9кГц.

