

## Заявка на конкурс

### Инвертор для BLDC\PMSM

Цель работы: разработка драйвера синхронного трёхфазного двигателя с явно и неявно выраженными магнитными полюсами (BLDC/PMSM).

#### Требования:

Напряжение питания - 400 вольт (96s);

Пиковая мощность - 50-55 киловатт;

Охлаждение – жидкостное;

Определение положения ротора с помощью датчиков Холла или вращающегося трансформатора (резольвера);

Водонепроницаемость, герметичность;

Управление - CAN или RS485.

Научно-технический задел (в части, касающейся рассматриваемой тематики).

В течение нескольких лет ведется работа над созданием и внедрением драйверов синхронных и асинхронных сервомоторов и двигателей общепромышленного применения. Проводятся исследования и эксперименты по оптимизации алгоритмов управления двигателями в задачах высокоточного позиционирования, а также по векторному управлению асинхронными двигателями без обратной связи. На рисунке 1 представлены фотографии одного из вариантов серводрайвера.



Рисунок 1 – Фотография драйвера серводвигателя (слева), установленные на оборудовании драйверы (справа).

Основные характеристики данного варианта исполнения:

Напряжение питания 50 – 350 В.

Максимальный ток двигателя 20 А.

Максимальная мощность двигателя 1,5 кВт.

Максимальная частота ШИМ 20 кГц.

Автоматизированное измерение характеристик двигателя.

Два контура обратной связи.

Интерфейсы обратной связи (2 независимых канала):

- аналоговый сигнал скорости (тахогенератор);
- датчики Холла;
- инкрементальный энкодер;
- абсолютный энкодер (интерфейс RS-485, RS-422);
- резольвер.

На рисунке 2 представлен внешний вид интерфейса программного обеспечения, предназначенного для настройки и конфигурирования серводрайвера. Язык программирования C#.

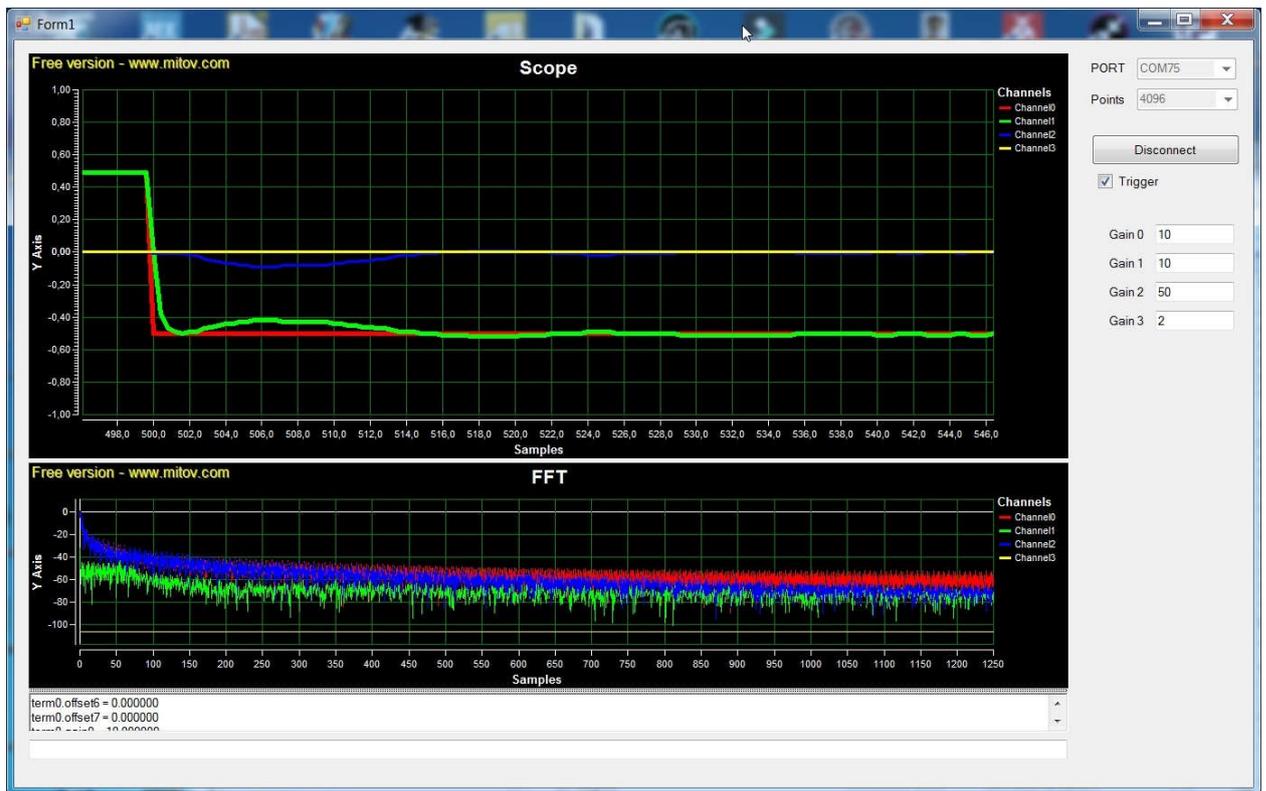


Рисунок 2 – внешний вид интерфейса программного обеспечения.

Представленный драйвер серводвигателя успешно прошел испытания по управлению двигателями позиционирования в 5-и осевом обрабатывающем центре.

Проект драйвера BLDC/PMSM двигателя.

Общие принципы управления BLDC/PMSM

Для работы синхронного двигателя с постоянными магнитами обязательно требуется система управления, например, частотный преобразователь или сервопривод. При этом существует большое количество способов управления, реализуемых системами контроля. Выбор оптимального способа управления, главным образом, зависит от задачи, которая ставится перед электроприводом. Основные методы управления синхронным электродвигателем с постоянными магнитами приведены в таблице ниже.

Управление		Достоинства	Недостатки
Синусоидальное	Скалярное	Простая схема управления	Управление не оптимально, не подходит для задач, где нагрузка меняется, возможна потеря управляемости
	Векторное	С датчиком положения	Требуется датчик положения ротора
		Без датчика положения	Не требуется датчик положения ротора. Плавная и точная установка положения ротора и скорости вращения двигателя, большой диапазон регулирования, но меньше, чем с датчиком положения
Трапецеидальное	Без обратной связи	Простая схема управления	Управление не оптимально, не подходит для задач, где нагрузка меняется, возможна потеря управляемости
	С обратной связью	С датчиком положения (датчиками Холла)	Требуется датчики Холла. Имеются пульсации момента. Предназначен для управления СДПМ с трапецеидальной обратной ЭДС, при управлении СДПМ с синусоидальной обратной ЭДС средний момент ниже на 5%.
		Без датчика	Требуется более мощная система управления, необходимо измерение фазного напряжения

Таблица 1 – сравнение способов управления синхронными двигателями.

Для решения несложных задач обычно используется трапецеидальное управление по датчикам Холла (например - компьютерные вентиляторы). Для решения задач, которые требуют максимальных характеристик от электропривода, обычно выбирается векторное управление.

Исходя из приведенных данных, в задачах силового привода наилучшие показатели позволит получить применение векторного управления с

датчиком абсолютного положения ротора высокого разрешения. Также возможно реализовать векторное управление на основе сигналов датчиков Холла, используя их для работы на низких скоростях, при этом на высоких скоростях управление будет вестись в бездатчиковом режиме. Однако такой вариант имеет два существенных недостатка: большие пульсации момента на низких скоростях, возможность управления только BLDC двигателями (с ротором с явно выраженными полюсами). Также такой способ управления имеет более низкую надежность и невозможность, в некоторых случаях, определения аварийной ситуации.

На рисунке 3 представлена общая структура векторного управления синхронным двигателем с заданием скорости вращения.

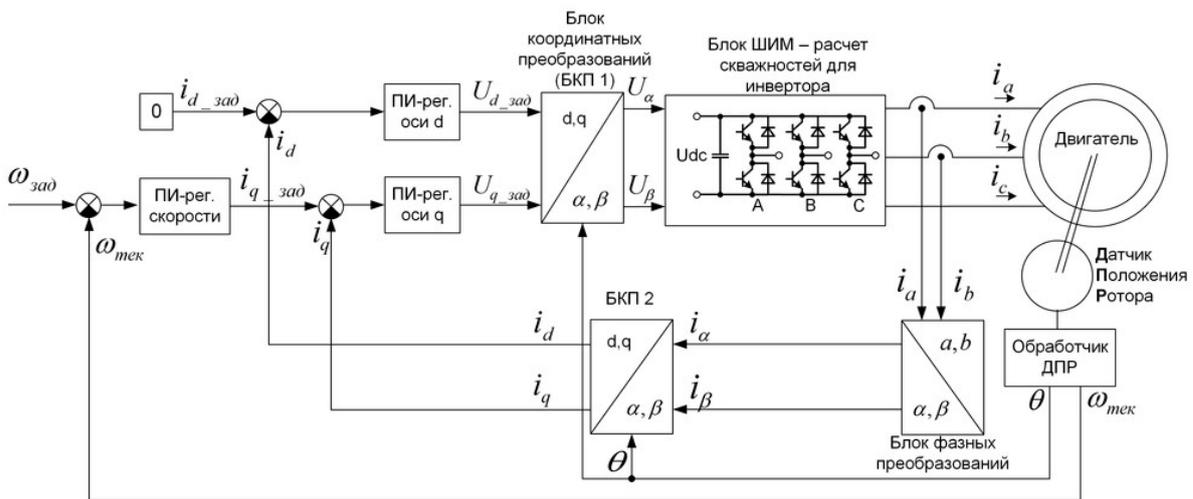


Рисунок 3 – общая структура системы векторного управления двигателем.

Структура является стандартной и в подробном ее описании нет необходимости. Однако, следует сделать одно важное замечание. При использовании векторного управления, управление всегда ведется моментом двигателя, т.е. вектором тока в обмотках. Все остальные режимы управления (по скорости, положению) реализуются путем охватывания контура управления моментом дополнительными обратными связями. Также следует отметить, что в эту структуру возможно добавить дополнительные блоки, позволяющие скомпенсировать определенные механические и конструктивные особенности конкретных двигателей. На рисунке 4

представлена структура драйвера, реализующего векторное управление синхронным двигателем.

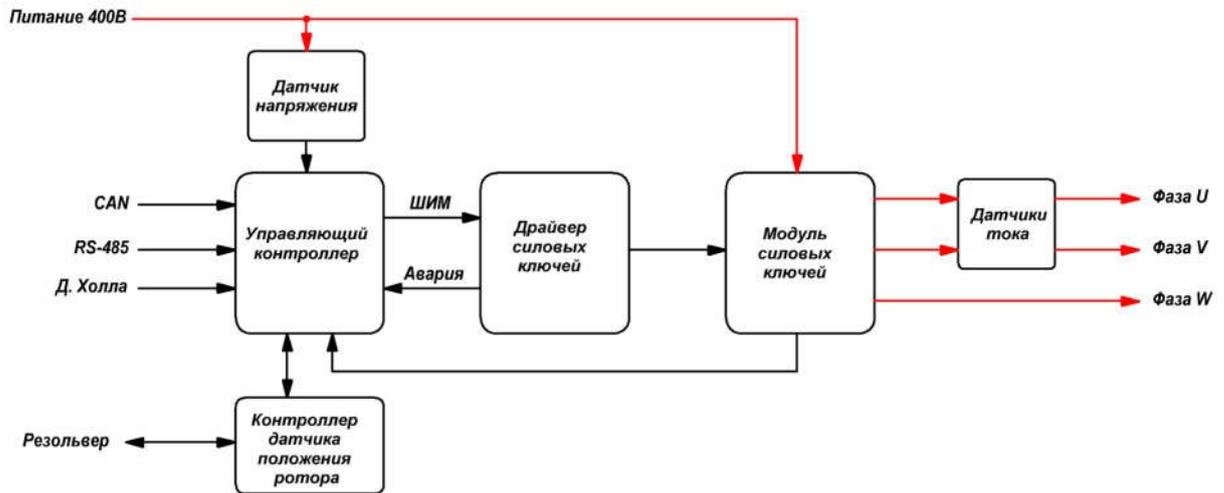


Рисунок 4 – общая структура драйвера.

Основные элементы:

Управляющий контроллер.

Драйвер силовых ключей.

Модуль силовых ключей.

Датчики напряжения и тока фаз.

Контроллер датчика положения ротора.

Особое внимание следует обратить на то, что драйвер питается от высокого напряжения и для обеспечения безопасности необходимо обеспечить гальваническую развязку силовой части и внешних сигналов управления и контроля. Это возможно реализовать несколькими различными путями, например, поставив изолирующий барьер в различных местах.

Варианты реализации гальванической развязки:

Изоляция сигналов контроля и управления непосредственно на вводе в устройство. Применяется в основном на простых и маломощных

частотных приводах по причине простоты и дешевизны. Удобен в использовании с неизолированными силовыми модулями со встроенным драйвером ключей другой периферией.

Разделение управляющего контроллера на две части. Первая обеспечивает обработку сигналов контроля и управления, реализацию алгоритма управления двигателем, вторая – формирование сигналов управления драйверами силовых ключей, измерение и стабилизацию токов фаз. Связь между двумя частями обеспечивается через изолированный последовательный интерфейс. Такое решение применено в серводрайвере, показанном вначале.

Изоляция драйверов силового модуля. В этом способе используются гальванически развязанные трансляторы сигналов ШИМ. Также требуется гальваническая развязка сигналов датчиков тока и напряжения.

Для решения данной задачи предпочтительным является последний вариант по ряду причин:

Применение силового модуля большой мощности.

Применение изолированных датчиков тока на основе эффекта Холла.

Далее по тексту эти пункты будут пояснены.

Отдельные элементы и варианты их реализаций.

Управляющий контроллер.

Задачи управляющего контроллера:

Прием сигналов управления (RS-485, CAN);

Формирование трех комплиментарных сигналов ШИМ для управления силовым модулем, с возможностью задания времени мертвой зоны (для исключения сквозного тока через силовые транзисторы);

Аналого-цифровое преобразование сигналов датчиков тока фаз и питающего напряжения;

Прием сигналов от датчиков Холла;

Связь с контроллером датчика положения ротора двигателя и (или) реализация контроллера положения ротора путем формирования опорного сигнала и измерения значений квадратурного сигнала отклика датчика (резольвера);

Реализация алгоритмов управления двигателем;

Контроль работоспособности, выдача сигнала аварии;

Возможны различные варианты построения аппаратной части управляющего контроллера, однако оптимальным, с точки зрения сложности схемотехнических решений, разработки ПО, стоимости является применение современного микроконтроллера на ARM ядре с развитой периферией, позволяющей на аппаратном уровне внутри микроконтроллера решить все поставленные задачи. Большинство фирм, выпускающих микроконтроллеры имеют в своей номенклатуре модели, удовлетворяющие предъявленным требованиям. Самыми распространенными микроконтроллерами для решения подобных задач являются представители линеек STM32F4, STM32G4 фирмы STMicroelectronics. В последнее время, в связи со сложной ситуацией с поставками электронных компонентов возник определенный дефицит продукции STMicroelectronics, в связи с чем также возможно применить микроконтроллеры фирмы Renesas Electronics. Этот производитель имеет свои собственные производственные мощности и гарантирует (по словам менеджеров компании) поставку комплектующих в срок.

## Драйвер силовых ключей.

Задачей драйвера является создание условий для надежного и быстрого переключения транзисторов силового модуля. Также на него могут быть возложены функции контроля и защиты силовых транзисторов.

На рисунке 5 схематично представлена схема силового модуля.

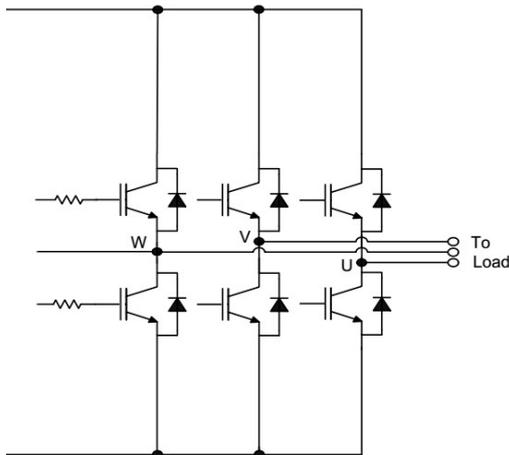


Рисунок 5 – схема силового модуля.

Т.к. силовой модуль состоит из трех транзисторный полумостов, требуется одновременное управление транзисторами как верхнего, так и нижнего плеч. При этом, если транзисторы нижних плеч управляются относительно общего проводника, то транзисторами верхних плеч необходимо управлять относительно фазных напряжений (точка соединения транзисторов одного полумоста). Соответственно питание для драйверов верхних ключей необходимо формировать также относительно фазных напряжений. На практике применяются два основных способа формирования питания:

С использованием преобразователя на так называемом «зарядовом насосе» (Charge pump)

С использованием полноценного изолированного DC/DC преобразователя.

Недостатком первого способа является ограниченная мощность и запас энергии, а также зависимость мощности от периода и скважности ШИМ. Т.к.

требуется обеспечить коммутацию больших токов (до 200 А), силовые транзисторы будут иметь, соответственно, большую емкость затвора, что требует обеспечения надежного и мощного питания драйверов на основе изолированных DC/DC преобразователей.

Следует отметить, что для питания драйверов нижних ключей также желательно применить отдельные изолированные DC/DC преобразователи, чтобы развязать на уровне драйверов эмиттеры транзисторов и ликвидировать возможные паразитные токовые петли.

Исходя из этого, необходимо реализовать шесть изолированных драйверов транзисторов, одинаковых как для нижних, так и для верхних плеч.

Современная промышленность выпускает интегральные микросхемы драйверов, обеспечивающие все необходимые требования. Одним из вариантов для решения данной задачи является микросхема ACPL-344JT Avago Technologies.

На рисунке 6 представлена типовая схема включения драйвера.

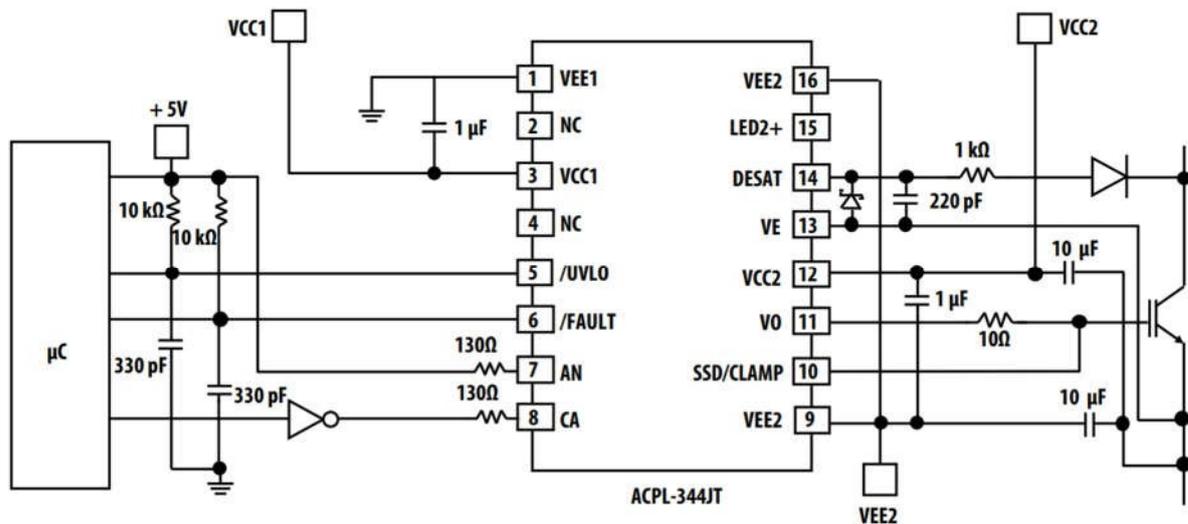


Рисунок 6 – типовая схема включения драйвера ACPL-344JT

Особенностью этой микросхемы является возможность контроля напряжения питания и падения напряжения на открытом транзисторе, что

обеспечивает защиту транзисторов от превышения тока и неполного открытия. По этим событиям драйвер выдает сигнал аварии.

Микросхема имеет внутреннюю гальваническую всех сигналов управления и контроля, что требует обеспечения питания как со стороны управляющего контроллера, так и со стороны силовых транзисторов. Для этого используется изолированный трансформаторный преобразователь напряжения. Подобные преобразователи имеют стандартную схемотехнику и не требуют подробного рассмотрения.

### Модуль силовых ключей

Модуль силовых ключей обеспечивает коммутацию фазных токов в соответствии с ШИМ сигналом и состоит из шести транзисторов. Обычно используется структура IGBT, как наиболее подходящая для коммутации больших токов и напряжений. В последнее время появляются высоковольтные транзисторы MosFET, также обеспечивающие коммутацию больших токов, но широкого распространения они еще не получили ввиду очень высокой стоимости.

Модуль может быть реализован как в виде интегрального решения, так и в виде дискретных транзисторов. Однако, применение дискретных транзисторов оправдано только лишь при решении каких-либо специфических задач, т.к. мировая индустрия выпускает достаточное количество интегральных решений практически под любые задачи. Также большим достоинством интегрированного решения является наличие готового теплового интерфейса для различных способов отвода тепла. Например, для жидкостного охлаждения на задней поверхности модуля формируется радиатор, оптимизированный производителем для качественного и надежного охлаждения во всех режимах работы.

Для решения поставленной задачи требуется обеспечить коммутацию средних токов до 150А при напряжении 400В. Соответственно, исходя из

рекомендаций производителей, необходимо применить силовой модуль с максимально допустимым током не менее 450А и напряжением не менее 650В.

Одним из лидеров в сфере силовых модулей является компания Infineon Technologies, поглотившая некоторое время назад одного из лидирующих производителей силовой электроники.

Компания представляет широкий спектр различных силовых модулей, в том числе соответствующих обозначенным выше требованиям.

В качестве примера можно выбрать тип FS450R07. Модуль состоит из шести IGBT транзисторов, максимально допустимый ток 450А, напряжение 650В. На рисунке 7 представлен внешний вид силового модуля.

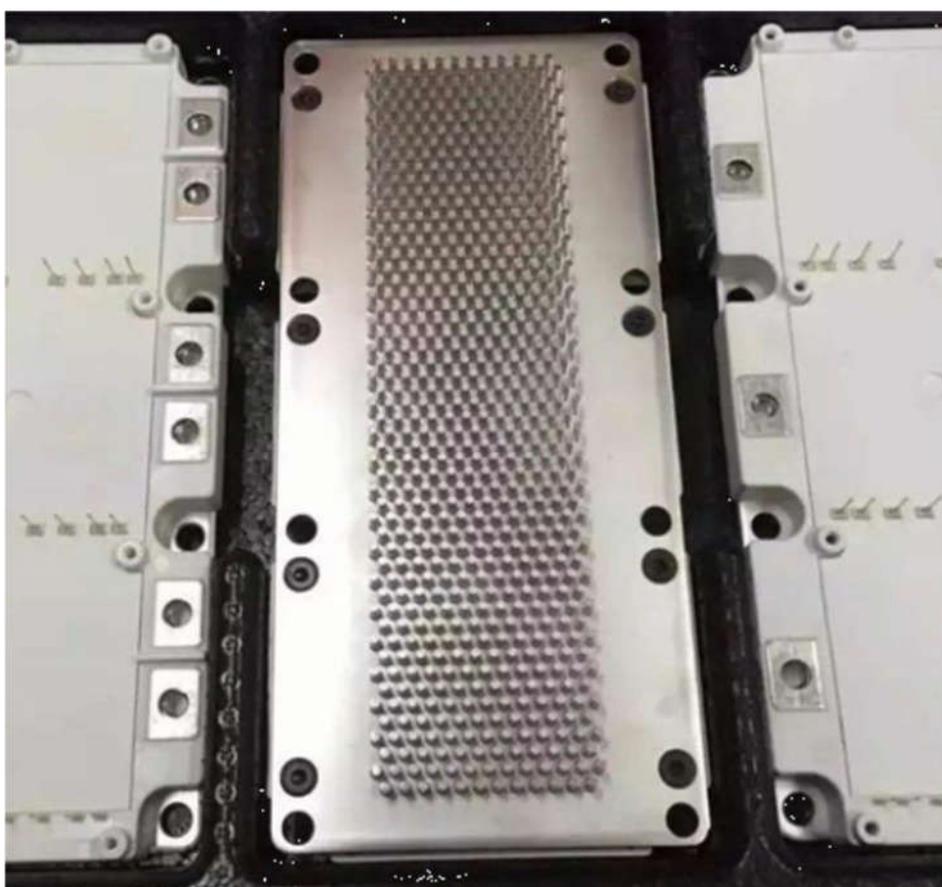


Рисунок 7 – внешний вид модуля FS450R07.

На задней стороне модуля выполнен игольчатый радиатор, позволяющий охлаждать жидкостью непосредственно сам модуль, без применения промежуточных теплопроводящих конструкций.

Особое внимание следует уделить обеспечению качества коммутируемого напряжения и фильтрации помех. Для этого необходимо в непосредственной близости с модулем расположить фильтрующий конденсатор. Для этих целей выпускаются специализированные пленочные конденсаторы.

Датчики напряжения и тока фаз.

Для обеспечения алгоритмов векторного управления, необходимо контролировать ток в трех фазах двигателя. Но, т.к. известно, что сумма токов в фазах равна нулю, измерять необходимо значения токов только в двух фазах.

Существует два основных способа измерения фазных токов с использованием полу мостовых ключей:

Установка датчиков тока в эмиттерах нижних ключей

Установка датчиков тока непосредственно на фазных проводниках.

Установка датчиков в фазных проводниках позволяет более точно измерять значение токов.

По типу датчики делятся на:

Резистивные (шунты)

Индуктивные или магнитные (токовый трансформатор, токовый датчик Холла)

Резистивные датчики обладают двумя существенными недостатками: выделение мощности на шунте и необходимость дополнительной гальванической развязки.

Токовый трансформатор и токовый датчик Холла позволяют измерять ток бесконтактным методом, однако токовый трансформатор не позволяет

измерять постоянный ток. Исходя из этого наиболее предпочтительным является применение датчиков Холла, установленных на фазных проводниках.

Для измерения напряжения питания силовой части выпускаются специализированные интегральные микросхемы, обеспечивающие гальванически развязанную трансляцию сигнала значения напряжения. Выходной сигнал может быть как аналоговым, так и цифровым. В качестве примера можно привести микросхему ACPL-C87BT. На рисунке 8 представлена ее типовая схема включения.

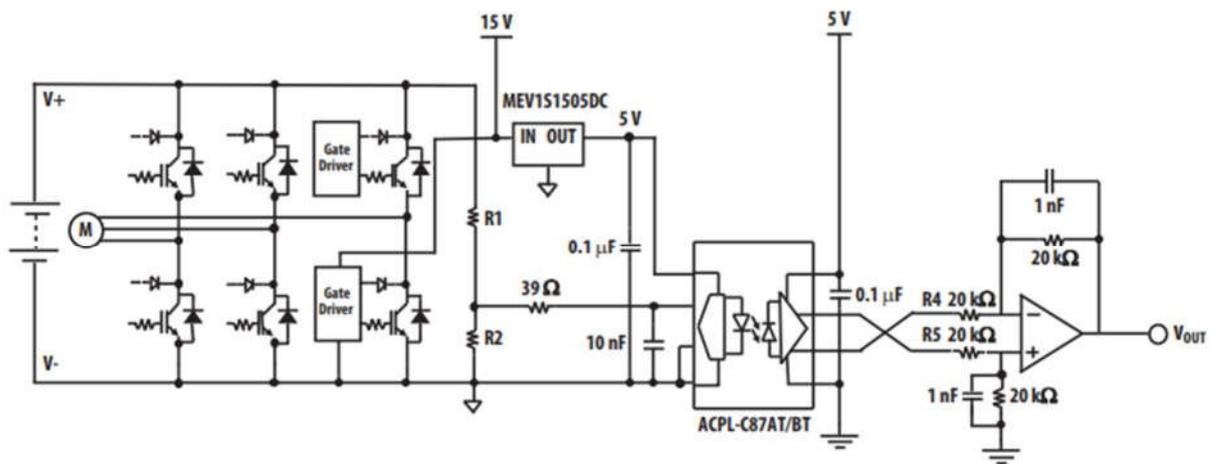


Рисунок 8 – типовая схема включения ACPL-C87BT.

### Контроллер датчика положения ротора

Для определения положения ротора с помощью резольвера необходимо сформировать опорный сигнал синусоидальной или прямоугольной формы и измерить значения сигналов отклика, представляющих собой синусную и косинусную составляющие. Далее при помощи очевидных математических преобразований производится вычисление положения ротора. Эти функции возможно реализовать путем применения специализированных микросхем или же средствами управляющего контроллера. Эксперименты, проведенные на серводрайвере, изображенном на рисунке 1 показали, что средствами микроконтроллера серии STM32F4 возможно получить разрешающую

способность порядка  $1/2^{15} - 1/2^{14}$  оборота, что более чем достаточно для решения данной задачи.

При использовании датчиков Холла для определения положения ротора какого-либо внешнего контроллера не требуется. Положение определяется путем простого табличного преобразования сигналов датчиков и угол.

Контроль неисправностей и отказов.

При проектировании необходимо уделить особое внимание обеспечению безопасной работы устройства. Для этого необходимо ввести как программные, так и аппаратные средства диагностики и самоконтроля:

Программный контроль величины напряжения питания;

Программный контроль токов;

Аппаратную защиту от превышения тока;

Аппаратный контроль сигналов аварии отдельных элементов;

Программный контроль целостности программного обеспечения;

Программный контроль целостности данных интерфейса управления.

## Конструкция

На данном этапе вести проработку конструкторских решений нет необходимости, т.к. сама компоновка и внешний облик устройства больше зависит от габаритов применяемых элементов, а также требований по занимаемому объему и расположению. При конструировании устройства и корпусных деталей необходимо обеспечить необходимые механические характеристики по стойкости, которые не указаны в требованиях и должны быть согласованы позднее. Герметичность устройства обеспечивается стандартными методами, путем применения уплотнителей, герметизирующих составов. Внешние разъемы также необходимо применять герметичного исполнения. На корпусе устройства необходимо расположить

газопроницаемую мембрану для выравнивания давлений внутри и снаружи устройства. Все электронные компоненты печатные платы должны быть покрыты защитными составами.

### Макет драйвера

Для апробации и демонстрации работоспособности решений, представленных выше, был разработан и изготовлен макет устройства.

Для этого использованы:

Силовой модуль на IGBT транзисторах FS450F07A2P2 с установленной на нем платой драйверов. Максимальной ток 450А, максимальное напряжение 650В.

Датчики тока, работающие на эффекте Холла. Измеряемые токи -300 – +300А.

Фильтрующий конденсатор специального исполнения, предназначенный для применения в подобных задачах. Емкость 1000 мкФ, Рабочее напряжение 450В.

Отладочная плата на основе микроконтроллера STM32F407.

Отдельные дискретные компоненты, предназначенные для формирования питающих напряжений, согласования уровней сигналов.

В ходе работы, до построения окончательного облика макет был собран в виде отдельных узлов для проведения предварительных проверок и тестов на различных типах двигателей.

Модель конструктивного исполнения макета устройства разработана в среде проектирования SolidWorks и показана на рисунке 9.

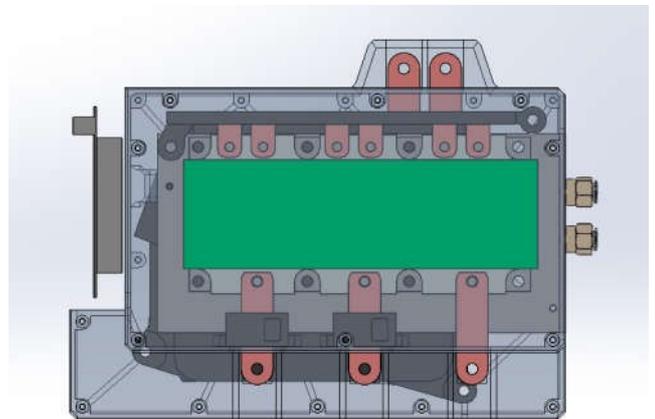
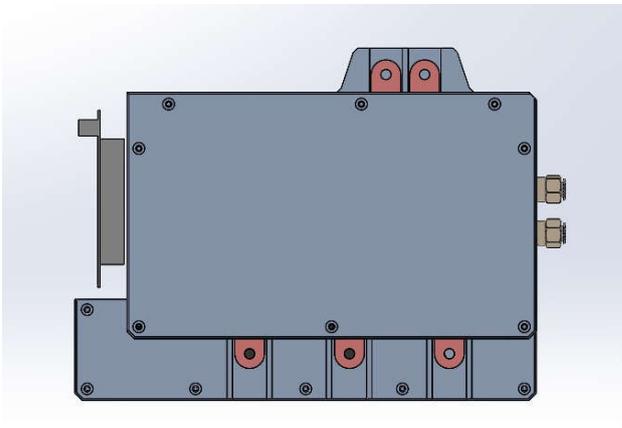
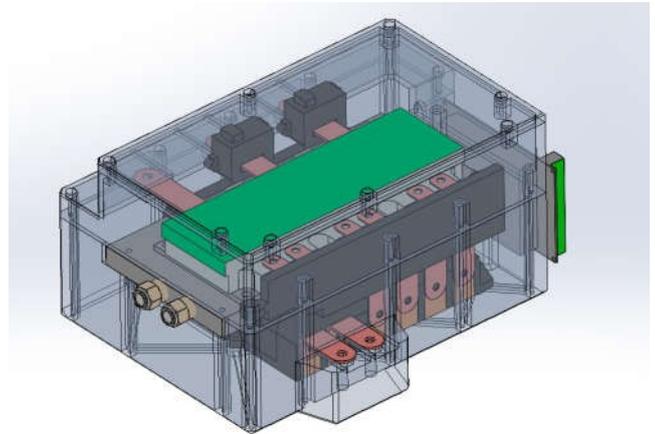
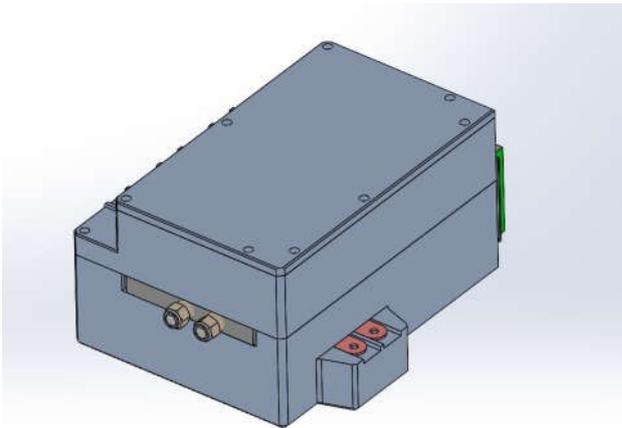
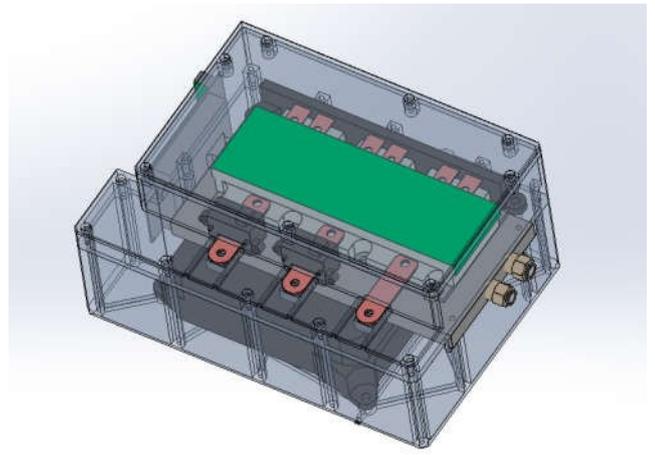
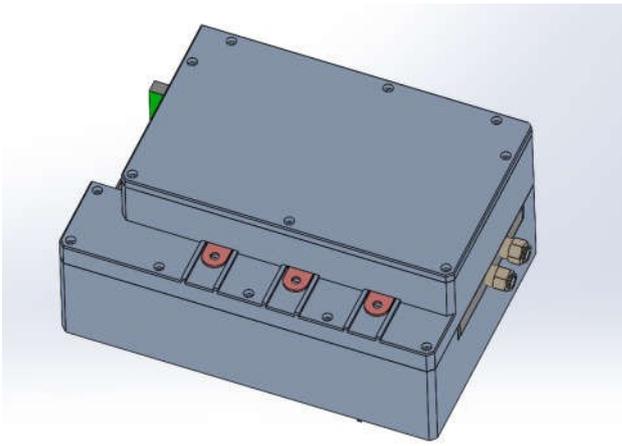


Рисунок 9 – 3Д модель макета устройства в различных видах.

Корпус макета состоит из трех частей: основания, промежуточного корпуса и крышки. На основании внутри закреплены конденсатор, силовой модуль, установленный на алюминиевом водоблоке системы охлаждения. Снаружи предусмотрено место крепления платы управления, на которое

впоследствии возможно будет установить различные варианты плат. Промежуточный корпус служит для крепления датчиков тока и вывода силовых медных шин фаз. Сверху корпус закрывается крышкой. Детали корпуса выполнены из пластика и изготавливаются методом 3Д печати.

На момент написания документа корпусные детали находятся в производстве. Макет частично собран для проведения дальнейших испытаний. Фотография частично собранного макета представлено на рисунке 10.

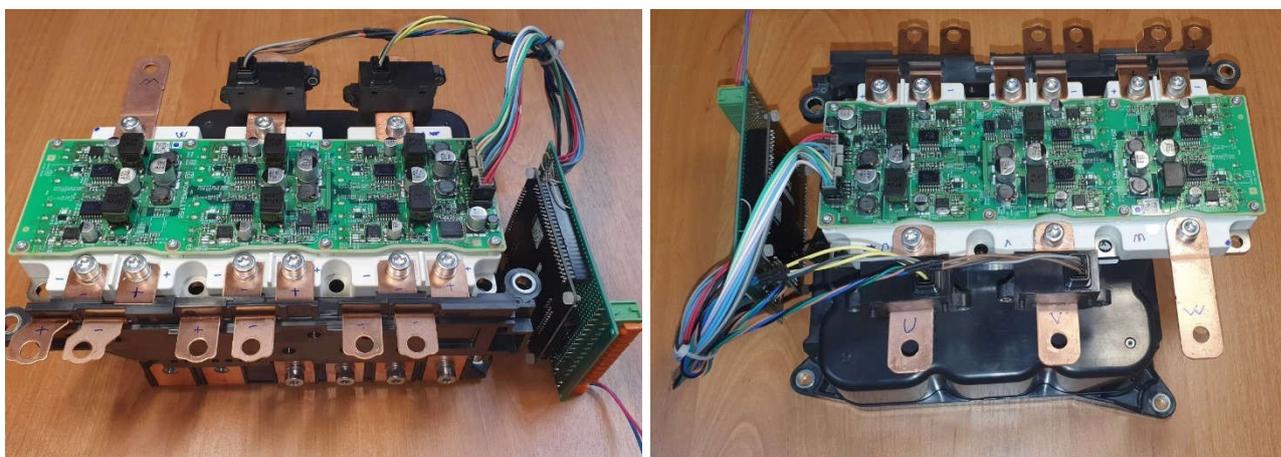


Рисунок 10 – Фотография частично собранного макета.

Для проведения дальнейших испытаний и исследований ожидается поставка трехфазного синхронного тягового электродвигателя. Основные характеристики:

Мощность 60 кВт.

Рабочее напряжение 400В.

Рабочий ток 150А.

### Заключение

В ходе системного проектирования, исследований и разработки по рассматриваемой тематике получены следующие основные результаты:

Проведен обзор и анализ актуальных алгоритмов управления синхронными двигателями постоянного тока.

Разработана общая структура устройства, рассмотрены вопросы унифицированных решений для широкого круга задач.

Выполнены анализ и оценка вариантов построения и рациональных технических решений.

Обоснована необходимость применения определенных технических решений с точки зрения достижения высоких показателей по критериям эффективности, надежности, стоимости.

Разработаны узлы и спроектирован макет устройства.

Успешно проведены частичные испытания макета.

Результаты лабораторных испытаний макета положительные, подтверждены основные расчетные показатели и характеристики.

Материал настоящего отчета носит, в основном, обзорный характер и не включает глубокого анализа отдельных технических решений. Конкретная реализация устройств и оптимизация технических и конструктивных решений может быть уточнена и адаптирована под конкретные требования заказчика.

Оценка экономических показателей не проводилась, т.к. стоимость изготовления устройства в значительной мере зависит от применяемой элементной базы, конструктивного исполнения и возможных специфических требований, например, климатико-механических воздействий, электромагнитных излучений и прочее.

## Приложение 1

### Информация о конкурсанте

Болецкий Евгений Борисович

Год рождения 1989

Г. Курск

Образование высшее, 2012г. Юго-Западный государственный университет, г. Курск, магистр техники и технологии по направлению «Информатика и вычислительная техника», к.т.н. 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Научные труды – 19 шт.

#### Опыт работ в различных сферах:

Разработка электронных устройств: генерации и формирования сигналов, в том числе ВЧ и СВЧ, спектрального анализа, управления процессами, объектами и элементами, видеонаблюдения, распознавания объектов и событий, мониторинга параметров и состояний, сбора данных, высокоскоростной обработки сигналов, силового привода, питания.

Разработка ПО для: микроконтроллеров различных производителей, сигнальных процессоров Texas Instruments, ПЛИС Xilinx и Altera, ПК., решения задач контроля, управления, математической и статистической обработки данных.

Разработка печатных плат различной степени сложности. Подготовка документации и сопровождение производства.

Конструирование корпусных элементов, систем охлаждения и экранирования, устройств в целом в среде Solidworks, Компас.

Анализ и оптимизация конструкции по прочностным и термическим показателям в среде Solid works simulation.

Ремонт бытовой и промышленной электроники: профессиональная фототехника, частотные преобразователи, серводрайверы.

Разработка алгоритмов, математических и имитационных моделей обработки сигналов и симуляции процессов в средах математического моделирования, в том числе в среде Matlab.

Хобби технической направленности: авиамоделизм.

Контактная информация:

---