

Аннотация

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД, ДВУХЗВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Объем: 57 страниц, 28 рисунков, 9 таблиц, 34 источника, 2 приложения и чертежи на 6 листах формата А1.

Название бакалаврской работы: «Испытательный стенд для исследования алгоритмов работы системы двигатель – генератор».

Объектом бакалаврской работы является испытательный стенд, разрабатываемый на кафедре «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета. Стенд позволит изучать работу асинхронной машины, используемой в качестве генератора электрической энергии в автономном или параллельном режиме.

Целью бакалаврской работы является разработка частотно-регулируемого привода со скалярным управлением для асинхронного генератора. Частотно-регулируемый привод состоит из двухфазного асинхронного двигателя и двухзвенного преобразователя частоты на основе неуправляемого мостового выпрямителя и автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией. В качестве полупроводниковых ключей инвертора применены биполярные транзисторы с изолированным затвором. Управление преобразователем реализовано на микроконтроллере семейства AVR.

Задачами бакалаврской работы являются выполнение структурной и принципиальной схемы преобразователя частоты, выбор его электронных компонентов, разработка алгоритма управления преобразователем частоты, изготовление и отладка прототипа преобразователя, проведение экспериментов для оценки его работы.

Дополнительно проведена оценка электрической, механической и экологической безопасности разрабатываемого устройства. Произведен экономический анализ.

Abstract

KEYWORDS: INDUCTION GENERATOR, VARIABLE FREQUENCY DRIVE, TWO-LEVEL INDIRECT FREQUENCY CONVERTER, PULSE WIDTH MODULATION

Length: 57 pages, 28 figures, 9 tables, 34 references, 2 appendices and graphic part on 6 A1 sheets.

The title of the bachelor's thesis is *Test stand for the study of motor-generator set work algorithms*.

The object of the bachelor's thesis is the test stand developed by the Industrial electronics department of Togliatti State University. Stand will give the opportunity to study the operation of the induction machine that is used as electrical power generator in grid-isolated or synchronous mode.

The aim of the bachelor's thesis is the development of U/f controlled variable frequency drive for the induction generator. Variable frequency drive consists of two-phase induction motor and two-level indirect frequency converter based on diode bridge rectifier and voltage source self-commutated inverter with pulse width modulation. Insulated-gate bipolar transistors are used as semiconductor switches. Frequency converter control was implemented with AVR family microcontroller.

The problems of the bachelor's thesis are drafting of block diagram and circuit diagram, electronic components choice, frequency converter control algorithm formation, making and checkout of the converter prototype, conducting experiments to evaluate the converter operation.

The special part of the bachelor's thesis gives details about evaluation of electrical, mechanical and ecological safety of the developed device. Economic analysis is carried out additionally.

Содержание

Перечень аббревиатур и сокращений	6
Введение.....	8
1 Состояние вопроса	9
1.1 Анализ существующих схем преобразователей частоты	9
1.2 Анализ рынка преобразователей частоты	11
2 Расчетная часть.....	16
2.1 Разработка функциональной схемы.....	16
2.2 Выбор компонентов ЧРЭ	19
2.2.1 Описание асинхронного двигателя	19
2.2.2 Выбор элементов АИН.....	21
2.2.3 Выбор элементов драйвера ключей	24
2.2.4 Выбор выпрямителя и фильтра	27
2.2.5 Выбор элементов схемы управления.....	27
2.2.6 Выбор датчика тока	29
2.2.7 Выбор датчика оборотов	30
2.2.8 Выбор элементов устройства плавного пуска	32
2.2.9 Выбор элементов компаратора.....	33
2.2.10 Выбор элементов блока индикации и устройства ввода	36
2.2.11 Выбор источника питания	37
3 Разработка алгоритма управления.....	39
3.1 Разработка программы	39
4 Разработка прототипа	44
4.1 Разработка платы драйвера	44
4.2 Сборка прототипа.....	46
5 Безопасность проекта.....	48
6 Экономический анализ	48
Заключение	51
Список используемой литературы	52
Приложение А	56

Приложение Б.....	61
-------------------	----

Перечень аббревиатур и сокращений

А

АИН – автономный инвертор напряжения

АИТ – автономный инвертор тока

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Б

БТИЗ – биполярные транзисторы с изолированным затвором

В

ВКР – выпускная квалификационная работа

Г

ГЭС – гидроэлектростанция

И

ИБП – импульсный блок питания

К

КЗ – короткое замыкание

КПД – коэффициент полезного действия

Н

НИР – научно-исследовательская работа

О

ОУ – операционный усилитель

П

ПО – программное обеспечение

ПЧ – преобразователь частоты

Т

ТС – таймер-счетчик

Ч

ЧРЭ – частотно-регулируемый электропривод

Ш

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ШИР – широтно-импульсное регулирование

Введение

В настоящее время все более востребованным становится применение асинхронных машин в качестве генератора в отраслях ветроэнергетики и гидроэнергетики (малые ГЭС), а также в мобильных автономных электроустановках. Растет потребность в квалифицированных молодых специалистах, разбирающихся в особенностях эксплуатации асинхронных машин в режиме генерации энергии. В связи с этим на кафедре «Промышленная электроника» возникла идея проведения научно-исследовательской работы по разработке учебно-испытательного стенда, предназначенного для проведения лабораторных и экспериментальных работ по изучению преобразования энергии в асинхронных электрических машинах, в частности:

- получения представления об условиях возникновения на выходе асинхронных генераторов переменного напряжения;
- выявления зависимости амплитуды, фазы и частоты генерируемого напряжения от частоты вращения ротора генератора;
- выяснения условий, необходимых для подключения напряжения генератора к общей электросети;
- изучения работы трехфазного генератора на симметричную и несимметричную нагрузку.

Данная бакалаврская работа посвящена одному из ключевых этапов НИР - разработке частотно-регулируемого электропривода, служащего для вращения вала асинхронного генератора. ЧРЭ включает в себя асинхронный двигатель и преобразователь частоты, управляющий скоростью вращения ротора двигателя.

1 Состояние вопроса

1.1 Анализ существующих схем преобразователей частоты

Согласно [1] преобразователи частоты можно разделить на два основных типа:

- а) ПЧ с непосредственным преобразованием;
- б) ПЧ со звеном постоянного тока.

ПЧ с непосредственным преобразованием не рассматриваются в данной ВКР, поскольку они не позволяют получать частоту выше входной, что необходимо по условию задания.

ПЧ со звеном постоянного тока состоит из выпрямителя, сглаживающего фильтра и автономного инвертора напряжения (АИН) или тока (АИТ) (рисунок 1).

«Схемы преобразователей частоты на основе АИТ являются более сложными, чем на основе АИН, и требуют применения дросселя в цепи постоянного тока с индуктивностью, превосходящей индуктивность фазных обмоток» [2, с.67]. Схемы с АИТ имеют узкое технологическое применение и не рассматриваются в данной ВКР.

В ПЧ со звеном постоянного тока происходит двойное преобразование электрической энергии. Это негативно влияет на КПД преобразователя, но позволяет получать частоту на выходе ПЧ как ниже, так и выше входной.

Регулирование выходного напряжения ПЧ может производиться следующими способами:

- а) с помощью управляемого выпрямителя;
- б) с помощью АИН с импульсным методом регулирования.

Использование управляемого выпрямителя имеет недостаток в необходимости введения второй системы управления, что усложняет схему ПЧ. Поэтому предпочтительнее применять неуправляемый выпрямитель, а регулирование выходного напряжения производить вторым способом.

Широко распространенными импульсными методами регулирования АИН являются ШИМ и ШИР. При ШИМ частота модуляции на порядки выше выходной частоты ПЧ.

По способу управления асинхронным двигателем ПЧ можно разделить на преобразователи со скалярным и векторным управлением.

Основной принцип скалярного управления заключается в поддержании неизменного отношения U/f напряжения статора к частоте магнитного поля статора при частотном регулировании. В таблице 1 приведены различные вариации алгоритмов скалярного управления, диапазон их регулирования и область применения.

Таблица 1 – Классификация алгоритмов скалярного управления

А	Разомкнутые системы без обратной связи по скорости		
	Алгоритм	Диапазон регулирования	Область применения
А1	Регулирование напряжения пропорционально частоте	5:1	Отсутствуют требования к качеству регулирования
А2	Регулирование напряжения пропорционально частоте с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора	10:1	Приводы с невысокими требованиями к качеству регулирования скорости
А3	Регулирование напряжения с учетом характера нагрузки на валу двигателя	5:1	Приводы насосов и вентиляторов
А4	Регулирование при частоте выше номинальной и	1:4	Высокоскоростные электроприводы >

Таблица 1 – Классификация алгоритмов скалярного управления

	постоянном напряжении		3000 об/мин
Б	Замкнутые системы регулирования с обратной связью по скорости	100:1	Массовые электроприводы с ограниченными требованиями по точности и диапазону регулирования
В	Частотно-токовые системы регулирования с обратной связью по скорости	100:1	Электроприводы с высокими требованиями к качеству регулирования

Векторный способ управления асинхронным двигателем подразумевает контроль над мгновенными значениями векторов обобщенных электромагнитных переменных – напряжения, тока, потокосцепления. При этом контролируется не только величина модуля вектора, но и его пространственное положение в данный момент времени.

Векторный способ предназначен для ЧРЭ с наиболее высокими требованиями к точности регулирования скорости и момента на валу двигателя. По причине высокой сложности вычислительных процессов данный способ требует наличия высокопроизводительного процессора. Векторный способ управления не рассматривается в данной ВКР.

1.2 Анализ рынка преобразователей частоты

Рынок преобразователей частоты в настоящее время представлен большим числом брендов и представляет широкий диапазон выбора по

мощности, точности и диапазону регулирования. Ниже представлены некоторые модели современных преобразователей частоты и их технические данные:

1) Siemens Sinamics G110 (рисунок 1)



Рисунок 1 – Преобразователь частоты Siemens серии Sinamics G110

Технические характеристики серии Sinamics G110 взяты с официального сайта компании Siemens и приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Технические характеристики серии Sinamics G110

Параметр	Технические характеристики
Напряжение сети, В	120 - 240, 1 фаза
Диапазон мощностей, кВт	0,12 – 3
Выходная частота, Гц	0 – 650
Коэффициент мощности	0,95
КПД	90-94% для приборов < 750 Вт 95% для приборов > 750 Вт

Таблица 2 - Технические характеристики серии Sinamics G110

Способность к перегрузкам	Ток перегрузки=1,5*ном.выходной ток(т.е. 150% перегрузки) в течение 60 с, затем 0,85*ном.выходной ток в течении 240 с, время цикла 300 с
Управление	Линейный, квадратичный, многоточечный (настраиваемый)
Частота импульсов	8 кГц (стандарт); 2 кГц - 16 кГц (в шагах 2-кГц)
Торможение	Торможение постоянным током
Тип защиты	IP 20
Рабочая температура	- 10°C + 40°C (до + 50°C с уменьшением мощности)
Функции защиты	<ol style="list-style-type: none"> 1. пониженному напряжению 2. перенапряжению 3. перегрузке 4. включению на землю 5. короткому замыканию 6. блокировке двигателя 7. перегреву двигателя 8. перегреву преобразователя

2) Веспер E3-8100 (рисунок 2)



Рисунок 2 – Преобразователь частоты Вестер серии E3-8100

Технические характеристики серии E3-8100 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Технические характеристики серии E3-8100

Параметр	Технические характеристики
Напряжение сети, В	220-240, 1 фаза 380-460, 3 фазы
Диапазон мощностей, кВт	0,2 – 7,5
Выходная частота, Гц	0,1 – 400
Управление	Синусоидальный ШИМ (управление U/f)
Торможение	Тормозной прерыватель, тормозной резистор
Тип защиты	IP 20
Рабочая температура	- 20°C + 60°C
Функции защиты	1. перегрузка двигателя 2. мгновенная перегрузка по току

Таблица 3 - Технические характеристики серии E3-8100

	<ol style="list-style-type: none">3. перегрузка4. перенапряжение5. пониженное напряжение6. кратковременное отключение питания7. перегрев радиаторов охлаждения8. уровень предотвращения срыва9. неисправность вентилятора10. неисправность заземления11. индикация заряда
--	---

3) Danfoss VLT Micro Drive (рисунок 3)



Рисунок 3 – Преобразователь частоты Danfoss серии VLT Micro Drive FC51

Технические характеристики серии VLT Micro Drive FC51 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики серии VLT Micro Drive FC51

Параметр	Технические характеристики
Напряжение сети, В	200-240, 1 фаза 200-240, 3 фазы 380-480, 3 фазы
Диапазон мощностей, кВт	0,18 – 22
Выходная частота, Гц	0 – 200 (WC+ mode) 0 – 400 (U/f mode)
Тип защиты	IP 20
Рабочая температура	- 20°C + 40°C
Функции защиты	1. перегрузка двигателя 2. короткое замыкание в обмотках двигателя 3. замыкание на землю 4. перегрев охладителей

2 Расчетная часть

2.1 Разработка функциональной схемы

Функциональная схема проектируемого ПЧ приведена на рисунке 4.

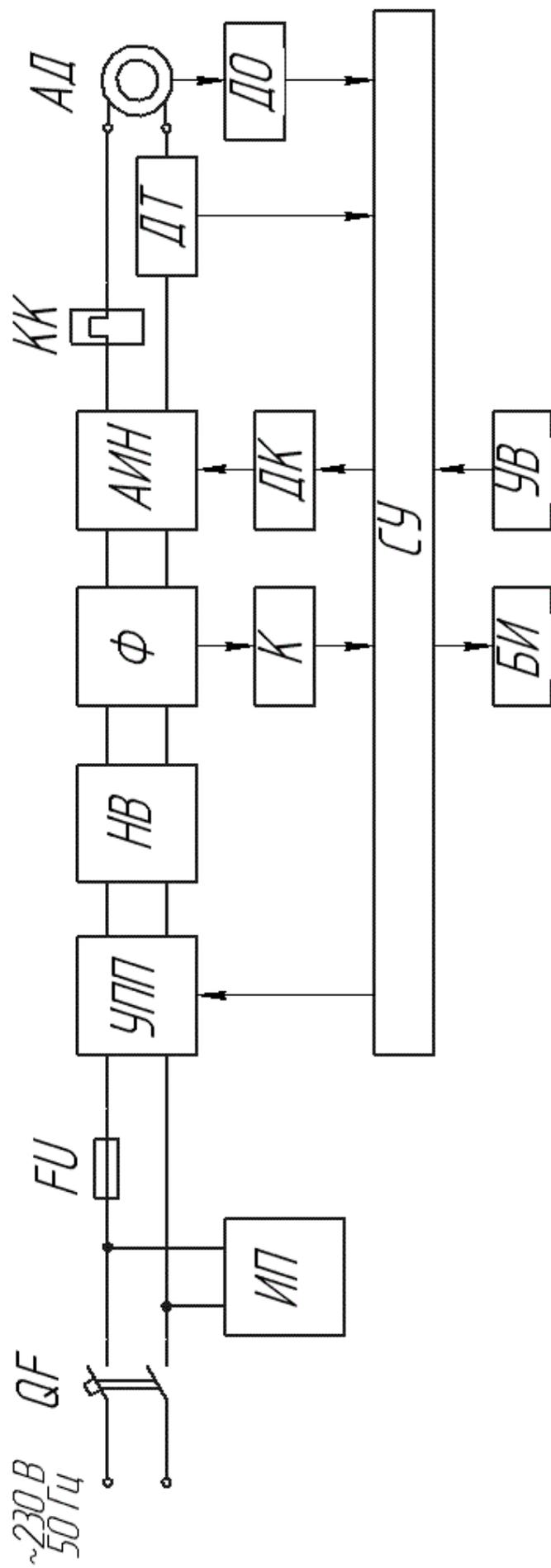


Рисунок 4 – Функциональная схема ПЧ

Автоматический выключатель QF и плавкий предохранитель FU служат для защиты коммутируемого оборудования от аварийных режимов (КЗ, перегрузок и др.). Неуправляемый выпрямитель НВ преобразует переменное напряжение сети в пульсирующий постоянный ток. Емкостной фильтр Ф сглаживает пульсации выпрямленного напряжения. Устройство плавного пуска УПП ограничивает зарядный ток электролитических конденсаторов фильтра. При превышении напряжения на фильтре некоторого заданного значения, равному приблизительно $2/3$ от амплитудного, компаратор К подает сигнал на схему управления СУ, при этом последняя включает реле, шунтирующее УПП, и зажигает светодиод блока индикации БИ, оповещающий о готовности к пуску ПЧ. При пуске преобразователя СУ начинает генерировать управляющие импульсы, которые подаются через драйвер ключей ДК на транзисторы автономного преобразователя напряжения АИН. ДК служат для согласования уровней управляющих сигналов СУ и входных сигналов транзисторов АИН и обеспечения необходимого импульсного тока для быстрого открытия и закрытия транзисторов. АИН преобразует постоянное напряжение в переменное прямоугольной формы, действующее значение и частота которого зависит от частоты и скважности управляющих сигналов СУ. Это напряжение подается непосредственно на асинхронный двигатель АД. Тепловое реле КК служит для защиты двигателя от перегрузки. Датчик тока ДТ осуществляет измерение мгновенного значения тока и передает информацию СУ. Блок ввода БВ служит для ручной установки частоты двигателя, пуска и сброса ПЧ. Блок индикации отображает параметры работы преобразователя и сигнализирует при возникновении аварийных режимов. Датчик оборотов ДО считает число оборотов ротора для компенсации скольжения. Источник питания ИП служит для питания стабилизированным постоянным напряжением схемы управления, датчиков, индикаторов, драйверов. Связь между ними на функциональной схеме не отображена.

2.2 Выбор компонентов ЧРЭ

2.2.1 Описание асинхронного двигателя

В качестве двигателя ЧРЭ применяется однофазный конденсаторный асинхронный двигатель АВЕ-071-4СУХЛ4 (рисунок 5). Характеристики двигателя приведены в таблице 5.

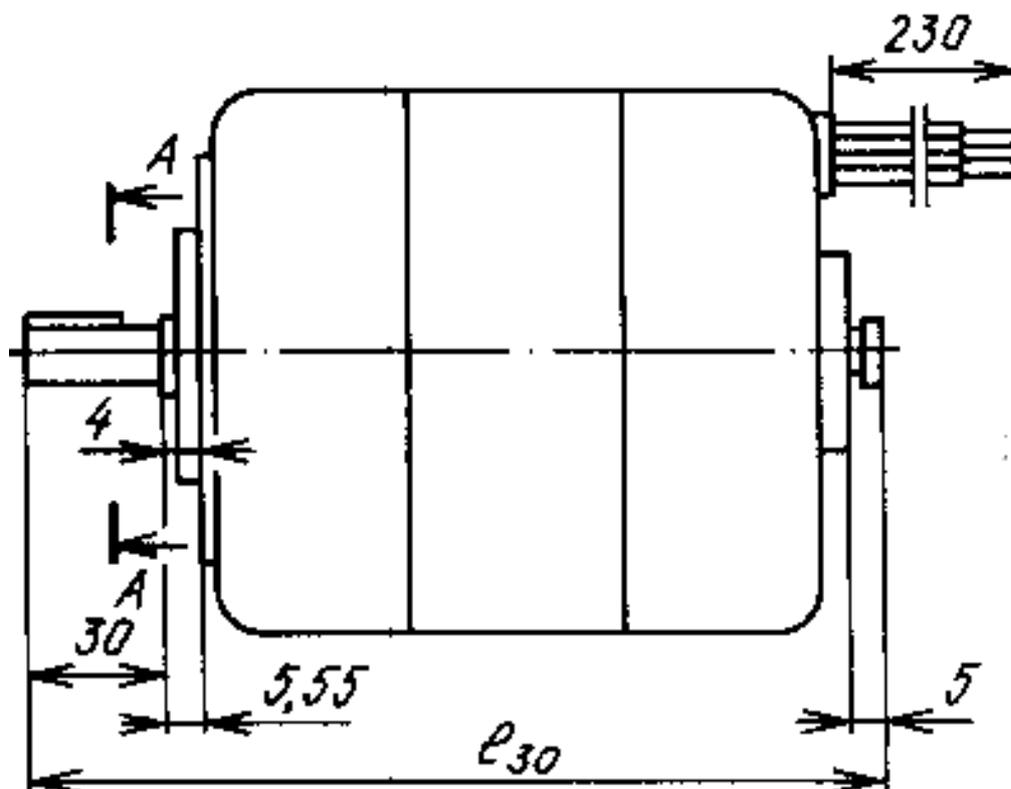


Рисунок 5 – Двигатель АВЕ-071-4СУХЛ4

Таблица 5 – Основные технические данные АВЕ-071-4СУХЛ4

Номинальная мощность, Вт	180
Номинальное напряжение, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Потребляемый ток, А, не более	1,6
Частота вращения, мин ⁻¹	1350
КПД, %	62

Таблица 5 – Основные технические данные АВЕ-071-4СУХЛ4

Сos φ	0,95
Кратность начального пускового тока, не более	3,5
Кратность начального пускового вращающего момента	0,55
Кратность максимального вращающего момента	1,6
Кратность минимального вращающего момента в процессе пуска	0,5
Ток холостого хода, А, не более	1,2
Потери холостого хода, Вт, не более	165
Напряжение короткого замыкания, В	220
Ток короткого замыкания, А	6,0
Потери короткого замыкания, Вт, не более	1000
Емкость рабочего конденсатора, мкФ	6±0,6
Напряжение рабочего конденсатора, В	500
Номинальный момент, Н·м	1,27

Схема подключения обмоток двигателя приведена на рисунке 6.

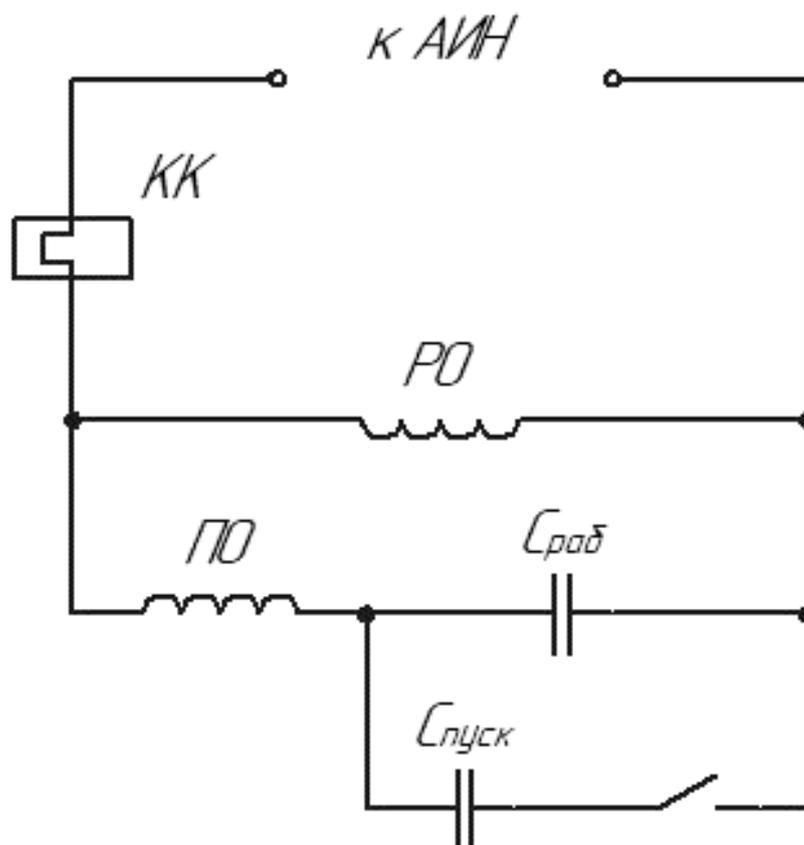


Рисунок 6 – Принципиальная схема подключения обмоток двигателя

Последовательно пусковой обмотке ПО подключается фазосдвигающая емкость $C_{РАБ}$, в качестве которой применяется конденсатор КБГ-МН 6 мкФ±10% 600 В. Параллельно рабочему конденсатору подключается пусковая емкость $C_{ПУСК}$. Пусковая емкость подключается на время пуска двигателя и служит для создания пускового момента равного номинальному. Пусковая емкость в 2-2,5 раза больше рабочей. В качестве пускового конденсатора применяется конденсатор МБГО-2 20 мкФ±10% 500 В. Реле КК – это тепловое реле РТ-10 с номинальным током 1,9 А.

2.2.2 Выбор элементов АИН

АИН собран по мостовой схеме (англ. Full-Bridge). Принципиальная схема АИН приведена на рисунке 7. В качестве транзисторных ключей VT1-VT4 применяются биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)

модели IRG4PH40UD. Выбор данных транзисторов обусловлен следующими факторами:

- большой запас по напряжению и току;
 - наличие встроенного антипараллельного диода для пропускания обратного тока активно-индуктивной нагрузки;
 - частота работы до 40 кГц;
 - наличие в элементной базе разработчика на момент проектирования.
- Техническая документация на IRG4PH40UD приведена в [3].

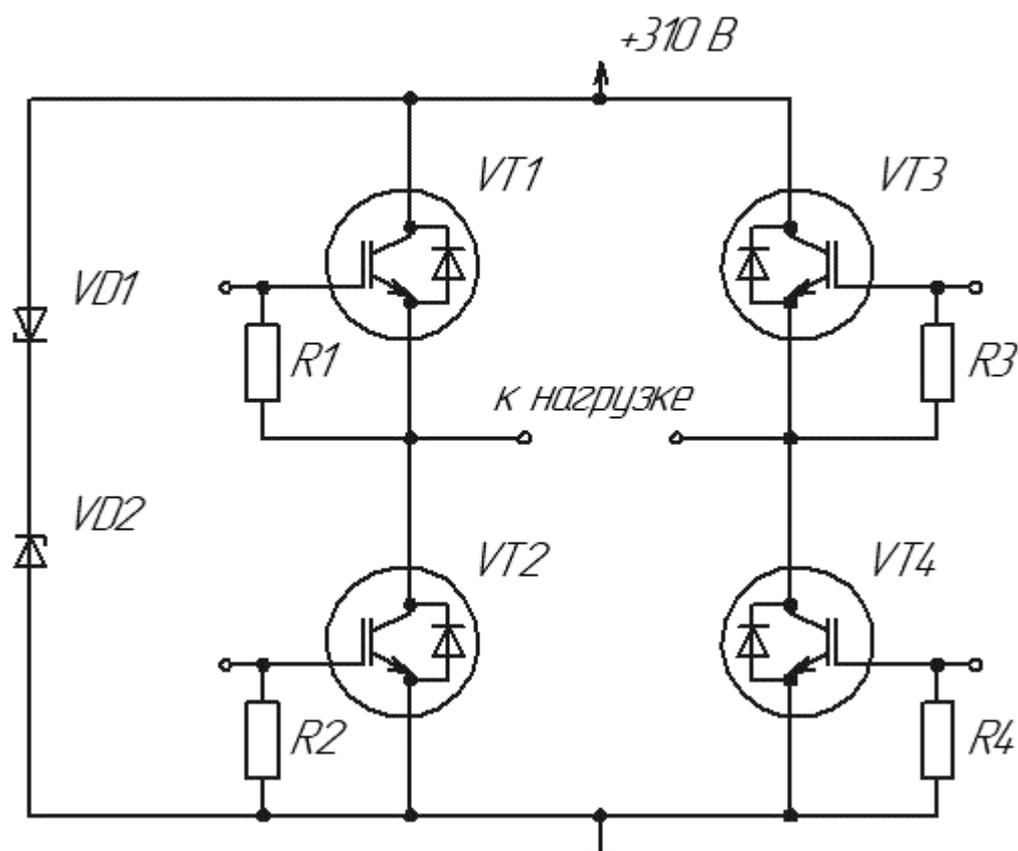


Рисунок 7 – Принципиальная схема АИН

Резисторы R1-R4 служат для защиты от произвольного отпирания транзисторов при сбое питания драйверов и наличии напряжения в силовой части АИН. Рекомендуемое значение сопротивления – от 10 до 100 кОм. Выбрал в качестве R1-R4 металлопленочные резисторы МЛТ-0,5-10 кОм±10%.

Ограничители VD1-VD2 защищают конденсаторы фильтра от возможных перенапряжений, возникающих при коммутации ключей или торможении двигателя. Анализ статьи [4] показал, что в качестве ограничителей могут применяться газовые разрядники, тиристоры SIDACtor, варисторы и TVS-диоды. Сравнение различных видов ограничителей приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение различных ограничителей напряжения

Параметр	Газовые разрядники	SIDACtor	Варисторы	TVS
Пиковый ток	высокий	средний	высокий	средний
Мин. Напряжение включения, В	75	8	6	6
Точность	низкая	высокая	низкая	Высокая
Эффективность ограничения перенапряжения	средняя	высокая	средняя	Высокая
Номинальная емкость, пФ	1,5	30	1400	100
Отношение пикового тока к габаритам	низкое	среднее	высокое	среднее
Время срабатывания	большое	среднее	большое	малое

Газовые разрядники и SIDACtor-тиристоры используются для защиты от выбросов напряжения высокой мощности (пиковые токи достигают несколько сотен или тысяч А), имеют большие габариты, низкое быстродействие и не находят применение в низковольтной маломощной аппаратуре. Применение

TVS-диодов или варисторов является оптимальным решением для проектируемого устройства.

Была рассмотрена серия TVS-диодов 1,5KE фирмы Vishay. Напряжение ограничения U_{BR} TVS-диода должно находиться в пределах:

$$U_{DC} < U_{BR} < U_{\Phi max}, \quad (1)$$

где $U_{DC} = 310 \text{ В}$ – напряжение шины постоянного тока,

$U_{\Phi max} = 450 \text{ В}$ – максимальное допустимое рабочее напряжение конденсаторов фильтра.

Рабочее напряжение U_{WM} диода, при котором происходит незначительное потребление мощности, должно быть близким к U_{DC} и немного превышать его.

Данным условиям соответствует TSV-диод 1.5KE400A, техническая документация на который приведена в [5].

2.2.3 Выбор элементов драйвера ключей

Для управления транзисторными ключами в мостовой схеме необходимы следующие условия:

- потенциал затвора должен быть на 10-15 В больше потенциала коллектора БТИЗ,
- для БТИЗ верхних плеч моста управляющее напряжение должно быть больше напряжения U_{DC} на 10-15 В,
- наличие высоковольтного каскада сдвига уровня для управления транзисторами верхних плеч моста;
- возможность генерации импульсов тока достаточной мощности для быстрого переключения БТИЗ.

Непосредственное управление транзисторами АИН через микроконтроллер схемы управления затруднено по причине недостаточности напряжения и тока выходных портов микроконтроллера, а также отсутствия в его структуре высоковольтной схемы сдвига уровня.

Для решения данной проблемы были применены полумостовые драйверы от компании International Rectifier модели IR2110 [6]. К особенностям данного драйвера относятся:

- малые габариты;
- низкая потребляемая мощность;
- совместимость с уровнями сигналов TTL/CMOS;
- наличие внутренней схемы задержки переключения для исключения сквозных токов через транзисторы;
- схемы защиты от падения управляющего напряжения для предотвращения работы транзисторов в линейном режиме.

Схема подключения IR2110 и вспомогательных элементов приведена на рисунке 8.

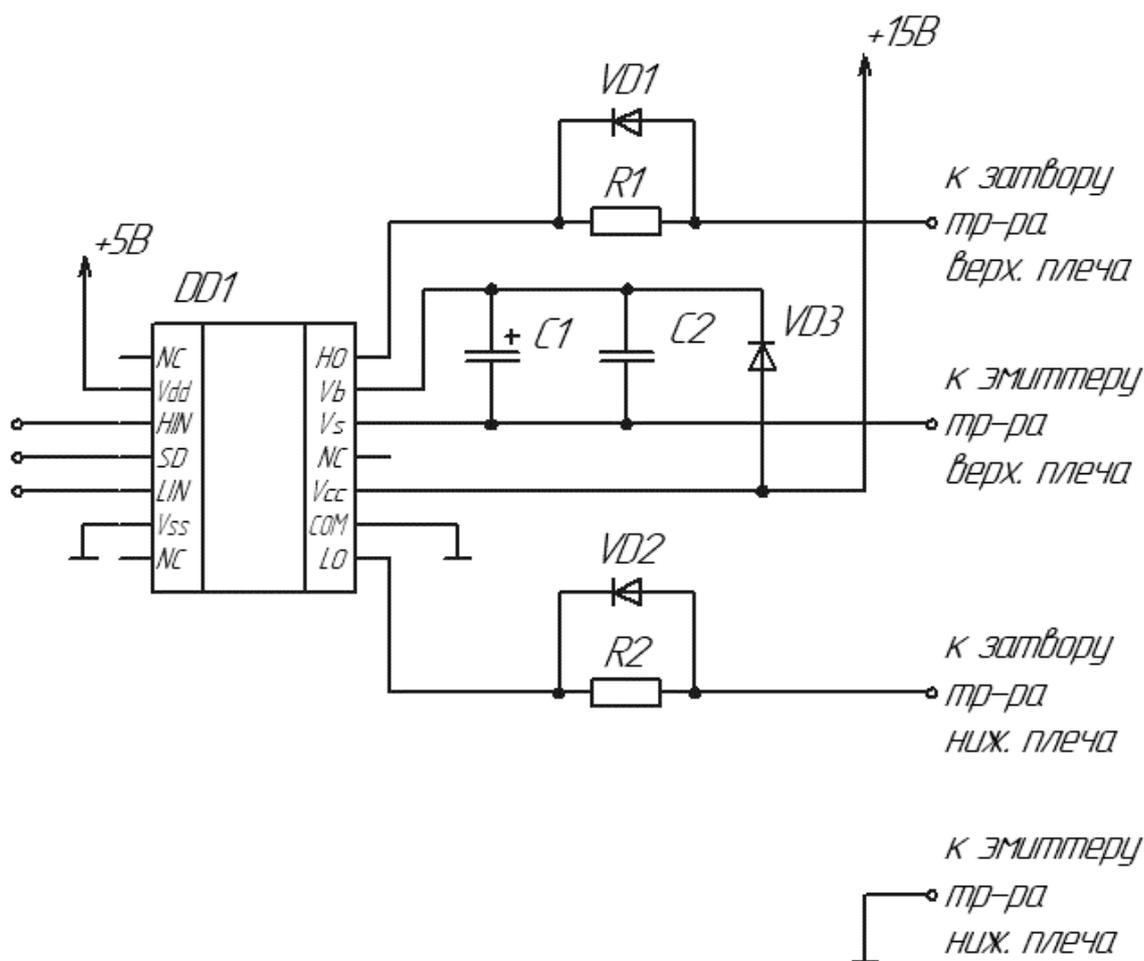


Рисунок 8 – Принципиальная схема подключения IR2110

Для питания логической части IR2110 подается стабилизированное напряжение величиной 5 В. Напряжение питания силовой части составляет 15 В. Драйвер использует схему с бутстрепным (от англ. bootstrap) конденсатором C1 для создания сдвига уровня. Емкость бутстрепного конденсатора можно определить по формуле, рекомендуемой производителем [7]:

$$C1 \geq 15 \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs leak}}{f}}{V_{cc} - V_f - V_{LS}}, \quad (2)$$

где Q_g – заряд затвора БТИЗ верхнего плеча,

$I_{qbs(max)}$ – максимальный ток утечки затвор-эмиттер БТИЗ,

$f = 5000$ Гц – частота ШИМ,

Q_{ls} – заряд, необходимый для сдвига уровня за один импульс (5 нКл для микросхем на 500/600 В и 20 нКл для микросхем на 1200 В),

$I_{Cbs leak}$ – ток утечки бутстрепного конденсатора,

V_{cc} – напряжение питания,

V_f – падение напряжение на диоде VD3 в прямом включении,

V_{LS} – падение напряжение на транзисторе нижнего плеча.

Диод VD3 должен быть высоковольтным и быстродействующим, иметь малый ток утечки и время обратного восстановления. Выбрал ultra-fast диод UF4007, техническая документация на который приведена в [8].

Ток утечки современных низковольтных электролитических конденсаторов не превышает обычно 10 мкА. Принял $I_{Cbs leak} = 10$ мкА.

Подставив значения из [3] и [8], а также величины, определенные выше, в формулу (2), получил:

$$C1 \geq 15 \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot 86 \cdot 10^{-9} + \frac{10^{-7}}{5 \cdot 10^3} + 5 \cdot 10^{-9} + \frac{10^{-5}}{5 \cdot 10^3}}{15 - 0,7 - 2,43} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

Рекомендуется умножить полученное значение в 2-3 раза. Принял $C1 = 1$ мкФ. Рабочее напряжение конденсатора должно быть выше напряжения $V_{cc} = 15$ В. Выбрал конденсатор К50-35 1 мкФ-50 В±20%. Керамический конденсатор

C2 служит для быстрого заряда БТИЗ в начальный момент времени. В качестве конденсатора C2 выбрал К10-17Б 0,1 мкФ-50 В±10%.

Резисторы R1 и R2 ограничивают ток затвора и предотвращают эффект «защелкивания» драйвера. Рекомендуемое значение сопротивления лежит в пределах десятков-сотен Ом. Максимальный импульсный ток драйвера IR2110 составляет 2 А. Рассчитал минимальное значение сопротивления затворных резисторов по формуле:

$$R_1 = R_2 = \frac{U_{cc}}{I_{Omax}} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ Ом} \quad (3)$$

Выбрал резистор МЛТ-1-10 Ом±10%.

Диоды VD1 и VD2 шунтируют затворные резисторы при запираии транзисторов, ускоряя разряд затворной емкости. В целях унификации элементов выбрал тот же диод, что и для VD3.

2.2.4 Выбор выпрямителя и фильтра

Неуправляемый выпрямитель проектируемого ПЧ представляет собой однофазный диодный мост. На ранних этапах проектирования в целях обеспечения запаса по току из имеющихся в наличии мощных диодных мостов была выбрана сборка КВРС2510. Техническая документация на КВРС2510 приведена в [9].

Фильтр представляет собой батарею из шести соединенных параллельно конденсаторов К50-27 емкостью 220 мкФ и рабочим напряжением 450 В. Также в целях фильтрации высокочастотных помех подключен пленочный конденсатор К73-17 емкостью 330 нФ.

2.2.5 Выбор элементов схемы управления

Схема управления реализована на платформе Arduino. Платы Arduino представляют собой законченные устройства с установленным микроконтроллером семейства AVR. Для проектируемого устройства была

выбрана плата Arduino Mega2560 с 8-битным контроллером ATmega2560 (рисунок 9).

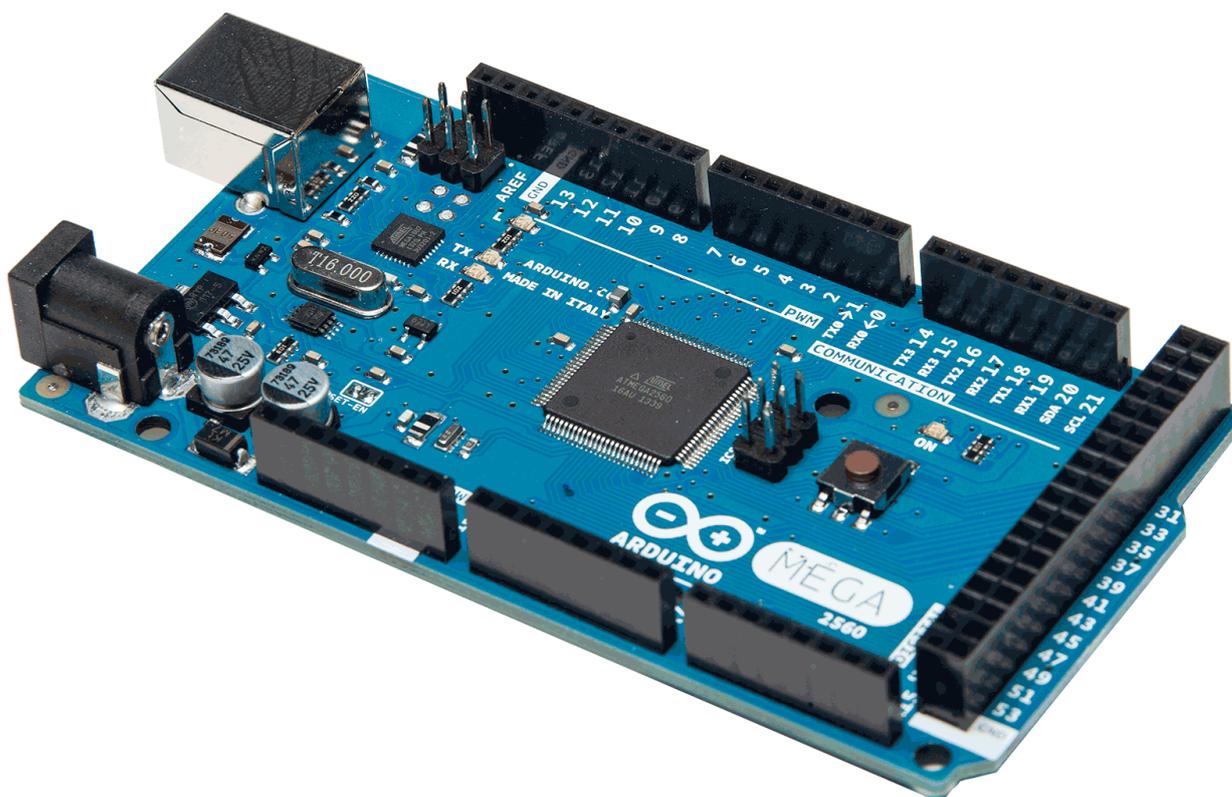


Рисунок 9 – Внешний вид Arduino Mega2560

К особенностям платы можно отнести:

- большое количество портов ввода-вывода;
- наличие шести таймеров-счетчиков, два из которых 16-разрядные, с помощью которых возможна реализация широтно-импульсной модуляции;
- интегрированный 10-разрядный АЦП и компаратор;
- Watch-dog таймер, служащий для перезагрузки микроконтроллера при заиклиивании;
- возможность программирования на языке С.

2.2.6 Выбор датчика тока

Ток, протекающий в обмотках двигателя, можно измерять с помощью токоизмерительных шунтов, трансформаторов тока и датчиков на эффекте Холла. Сравнение приведенных способов измерения тока обобщено в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение способов измерения тока

	Шунт	Трансформатор тока	Датчик Холла
Род тока	Любой	Переменный	Любой
Диапазон измерения	До 20 А	До 1 кА	До 1 кА
Точность	1%	5%	1%
Наличие гальванической развязки от токовой цепи	-	есть	есть
Потери	есть	есть	Пренебрежимо малы
Диапазон частоты измеряемого тока	До 100 кГц	До 400 Гц	Сотни кГц
Цена	Низкая	Высокая	Средняя
Наличие источника питания	Не требуется	Не требуется	Требуется

Трансформаторы тока имеют узкую полосу пропускания и не предназначены для измерения тока инвертора, содержащего высшие гармоники. Шунты вносят ощутимые потери и не имеют гальванической развязки. Наиболее рационально в данном случае использование датчика тока

на эффекте Холла, который гальванически развязывает измерительную схему от силовой цепи, практически не уменьшает КПД и способен измерять токи в наиболее широком диапазоне частот.

Рассмотрел серию датчиков на эффекте Холла ACS712 производства компании Allegro Microsystems. Одним из достоинств данных датчиков является наличие его в модульном исполнении (рисунок 10), что упрощает его подключение к Arduino.

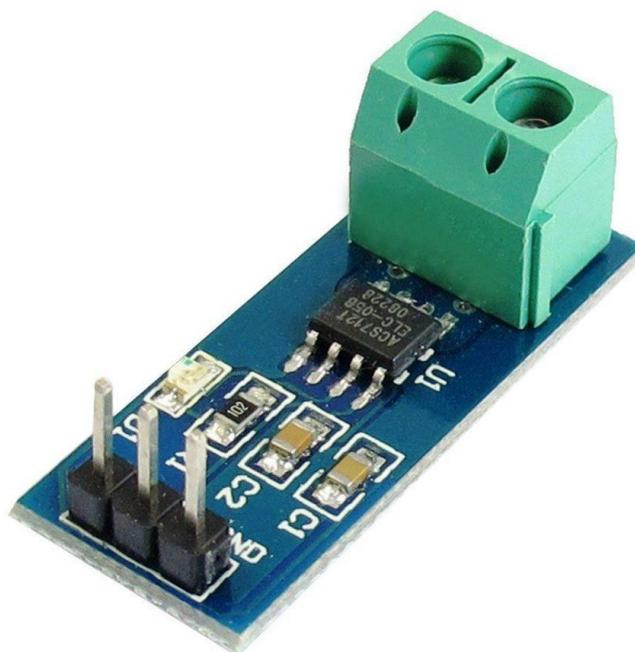


Рисунок 10 – Модуль на основе датчика тока ACS712

Выбрал датчик ACS712ELCTR-20A-T, техническая документация на который приведена в [10].

2.2.7 Выбор датчика оборотов

Датчик оборотов служит для точного определения скорости вращения ротора и компенсации скольжения. В качестве такого датчика может выступать абсолютный или инкрементальный энкодер, тахогенератор и датчик на эффекте Холла. Энкодеры и тахогенераторы обеспечивают высокую точность

измерения, но имеют высокую стоимость. Датчики Холла в настоящее время имеют невысокую стоимость и выпускаются в компактных корпусах, в которые интегрирован сам датчик и схема формирования выходного сигнала. Такие датчики можно непосредственно подключать к портам ввода-вывода микроконтроллера.

На рисунке 11 представлен цифровой датчик Холла SS49E, используемый в бакалаврской работе.

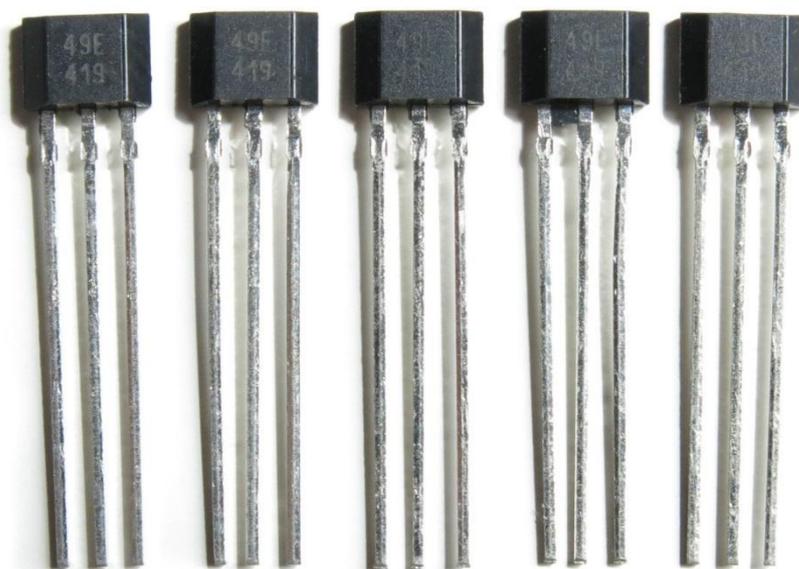


Рисунок 11 – Датчик Холла SS49E

Техническая документация на датчик приведена в [11].

2.2.8 Выбор элементов устройства плавного пуска

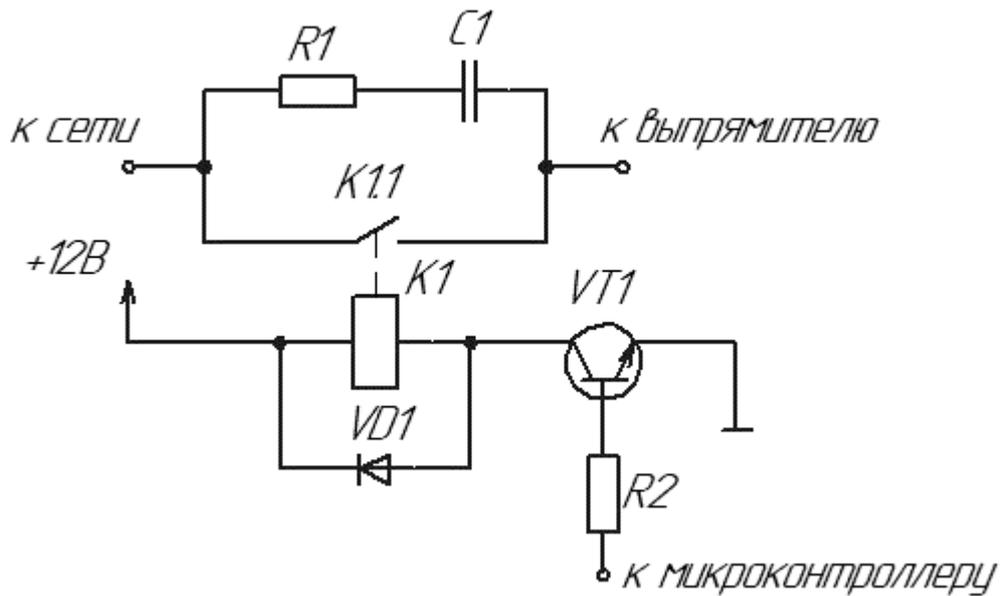


Рисунок 12 – Принципиальная схема устройства плавного пуска

Схема устройства плавного пуска представлена на рисунке 12. Цепь R1-C1 ограничивает начальный ток заряда конденсаторов фильтра, а при срабатывании компаратора, отслеживающего напряжение на фильтре, шунтируется реле K1. Поскольку тока порта микроконтроллера недостаточно для открытия реле, используется внешний транзистор VT1. Резистор R2 ограничивает базовый ток VT1. Диод VD1 защищает транзистор от индуктивных выбросов при коммутации катушки реле.

Принял $R1 = 22 \text{ Ом}$, а $C1 = 2 \text{ мкФ}$. Полное сопротивление цепи R1-C1

$$Z_{R1C1} = \sqrt{R1^2 + X_{C1}^2} = \sqrt{R1^2 + \frac{1}{2\pi f C1}^2} = \sqrt{22^2 + \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}^2} \quad (5)$$

$$\cong 1.6 \text{ кОм}$$

Величина тока, до которой ограничивает цепь R1-C1

$$I_{ogr} = \frac{U_m}{Z_{R1C1}} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{1600} \cong 200 \text{ мА} \quad (6)$$

Реле модели SRD-12VDC-SL-C. Техническая документация на реле приведена в [12]. В качестве транзистора VT1 можно применить любой маломощный n-p-n транзистор. Выбрал транзистор 2N2222A [13].

Согласно [12] сопротивление катушки постоянному току R_{DC} составляет 320 Ом. Пренебрегая падением напряжения на насыщенном транзисторе, определил ток через катушку по формуле

$$I_{K1} = \frac{E}{R_{DC}} = \frac{12}{320} = 37,5 \text{ мА}, \quad (7)$$

где E – напряжение питания реле.

Вычислил минимальное значение тока базы транзистора VT1:

$$I_{B1} = \frac{I_{K1}}{\beta} = \frac{37,5}{100} = 375 \text{ мкА}, \quad (8)$$

где β – коэффициент передачи тока базы транзистора 2N2222A [13].

Принял $I_{B1} = 1 \text{ мА}$. Тогда сопротивление резистора R2:

$$R2 = \frac{U_{OUT}}{I_{B1}} = \frac{5}{0,001} = 5 \text{ кОм} \quad (9)$$

Принял $R2 = 4,7 \text{ кОм}$.

Диод VD1 в целях унификации выбрал той же модели, что и для диодов драйвера.

2.2.9 Выбор элементов компаратора

Схема компаратора построена на основе универсального операционного усилителя LM358P [14] (рисунок 13).

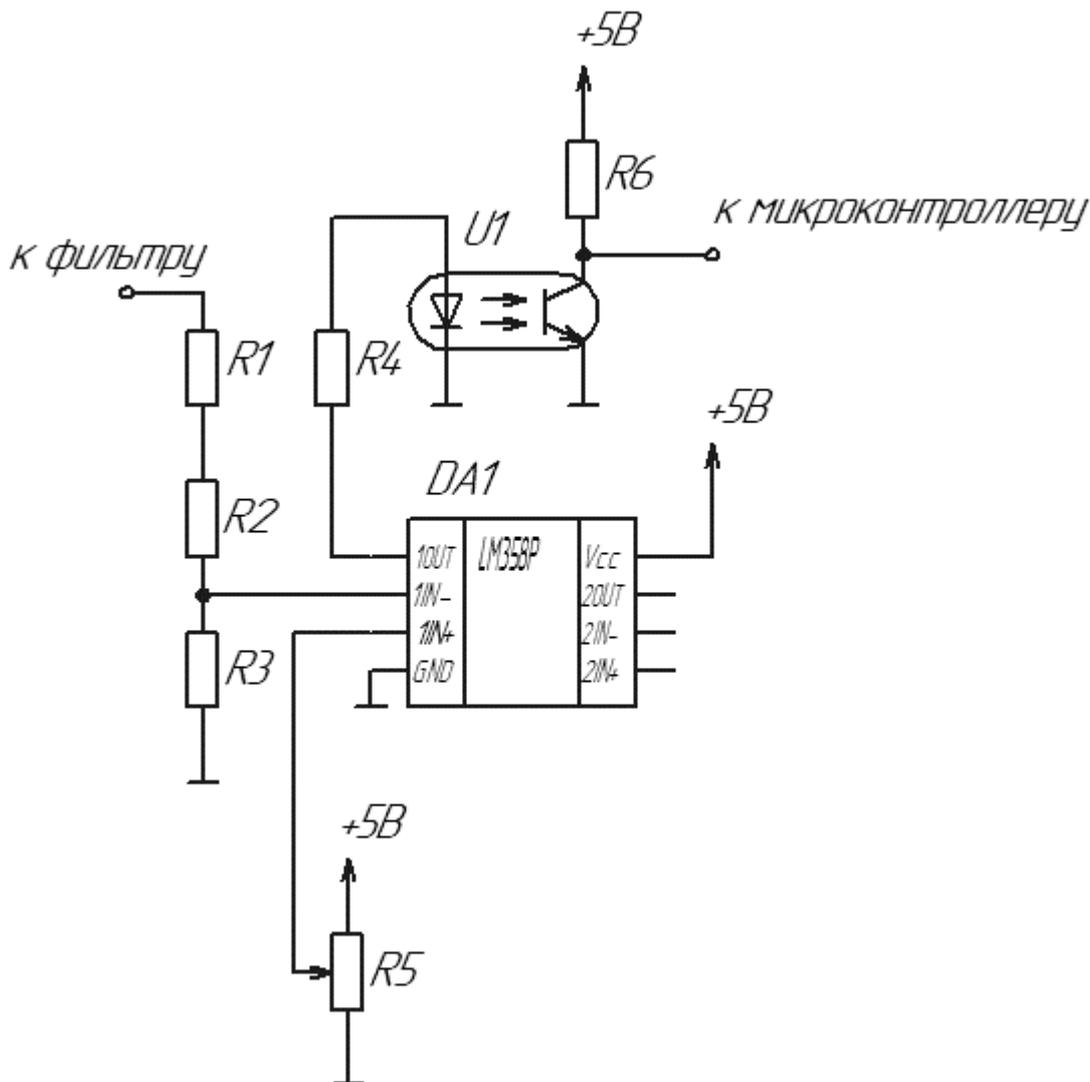


Рисунок 13 – Принципиальная схема компаратора

В начальный момент времени напряжение на инверсном входе ОУ DA1 меньше напряжения на неинверсном. Сигнал на выходе ОУ равен логическому «0». Напряжение на коллекторе транзистора оптопары U1 и, соответственно, на считывающем порте микроконтроллера равно логической «единице». При зарядке конденсаторов фильтра напряжение на нижнем плече делителя, образованном резисторами R1, R2, R3, растет. Когда напряжение инверсного входа превысит напряжение неинверсного входа, на выходе ОУ появляется высокий уровень сигнала, который зажигает светодиод транзисторной оптопары U1. В свою очередь открывается фототранзистор U1, сигнал переходит из 1 в 0. При этом микроконтроллер фиксирует срез сигнала и

включает шунтирующее реле устройства плавного пуска. Сопротивление резисторов $R1 = R2 = 470$ кОм, резистора $R3 = 5,6$ кОм. При напряжении на фильтре, равном $2/3$ от максимального, напряжение на $R3$ будет равно

$$U_{R3} = \frac{2 \cdot 230 \sqrt{2}}{3} \cdot \frac{R3}{R1 + R2 + R3} = 216 \cdot 0,006 \cong 1,3 \text{ В} \quad (10)$$

Таким образом, на неинверсном входе ОУ необходимо установить напряжение, равное 1,3 В. Для настройки служит переменный резистор $R5$ сопротивлением 10 кОм, средний вывод которого подсоединен к неинверсному входу ОУ, а крайние выводы – к источнику питания компаратора напряжением 5 В.

$U1$ служит для гальванической развязки компаратора и порта микроконтроллера. В качестве $U1$ применяется транзисторная оптопара PC817 [15], широко применяемая в импульсных преобразователях.

Рассчитал сопротивление резистора $R4$, ограничивающего ток светодиода:

$$R4 = \frac{U_{OPP}}{I_F} \cdot \frac{3}{0,005} = 600 \text{ Ом}, \quad (11)$$

где U_{OPP} – выходное напряжение ОУ,

I_F – ток светодиода оптопары $U1$.

Из стандартного ряда номиналов сопротивлений выбрал ближайшее меньшее значение, равное 560 Ом.

Резистор $R6$ ограничивает ток коллектора оптопары и рассчитывается по формуле:

$$R6 = \frac{E}{I_{Kmax}} \cdot \frac{5}{0,05} = 100 \text{ Ом}, \quad (12)$$

где E – напряжение питания схемы компаратора,

I_{Kmax} – максимальный ток коллектора транзистора оптопары $U1$.

2.2.10 Выбор элементов блока индикации и устройства ввода

Для отображения параметров работы частотно-регулируемого электропривода выбран символьный модуль LCD1604 на базе контроллера HD44780 с I2C модулем PCF85741 (рисунки 14 и 15).



Рисунок 14 – Модуль LCD1604

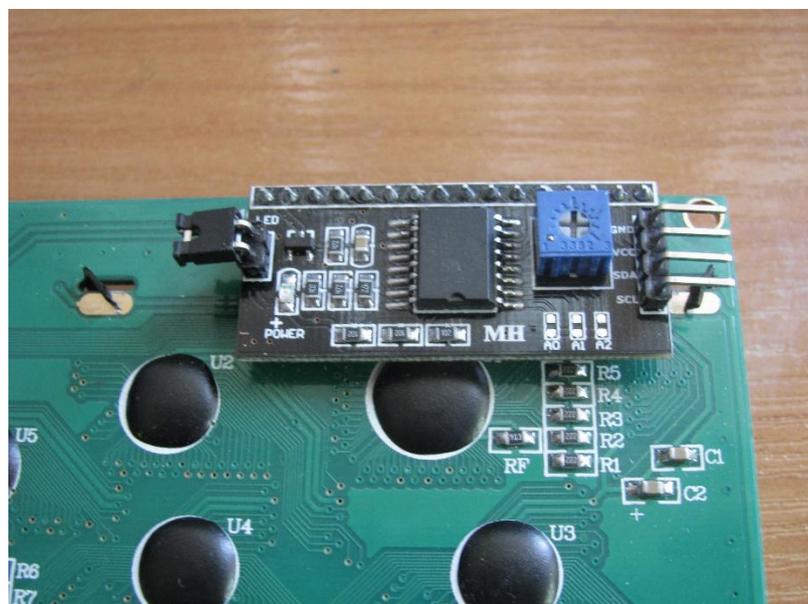


Рисунок 15 – Модуль I2C PCF85741

Для упрощения подключения модуля к Arduino в свободном доступе в сети Internet существуют библиотеки LiquidCrystal_I2C.

Для индикации готовности к пуску преобразователя и аварийных режимов его работы служат светодиоды зеленого и красного цветов.

Для регулирования скорости двигателя, пуска и остановки работы преобразователя служат миниатюрные кнопки с фиксацией и без модели PS850L (рисунок 16).



Рисунок 16 – Кнопки PS850L

2.2.11 Выбор источника питания

В схеме ПЧ необходимы следующие величины напряжения питания:

- 5 вольт для питания схемы управления, блока индикации, датчиков тока и оборотов, компаратора;
- 12 вольт для питания реле устройства плавного пуска и реле, отключающего пусковой конденсатор двигателя;
- 15 вольт для питания драйверов транзисторных ключей.

В наличии у разработчика проектируемого устройства имелся ИБП Meanwell DR-120-24 (рисунок 17), параметры которого приведены в таблице 8.

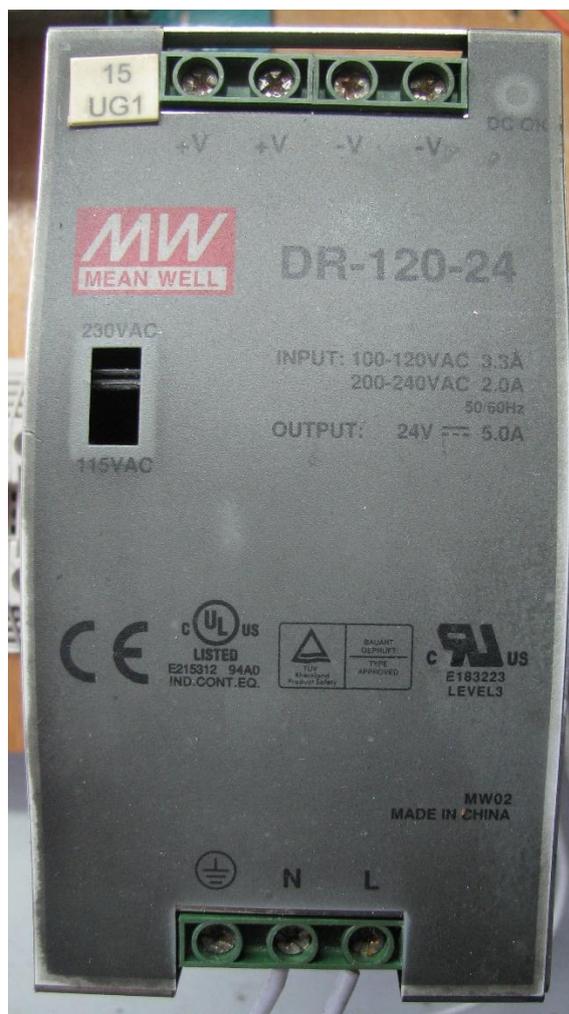


Рисунок 17 – Блок питания Meanwell DR-120-24

Таблица 8 – Технические характеристики Meanwell DR-120-24

Параметры входного напряжения	100-120 В, 3,3 А 200-240 В, 2 А 50/60 Гц
Параметры выходного напряжения	Постоянное, 24 В, 5 А
Мощность, Вт	120

При использовании микросхем линейных интегральных стабилизаторов серии LM78xx возможно получить требуемое напряжение из данного ИБП. Потребовались микросхемы LM7805, LM7812 и LM7815, обеспечивающие на выходе соответственно 5, 12 и 15 вольт. Схема подключения стабилизаторов приведена на рисунке 18.

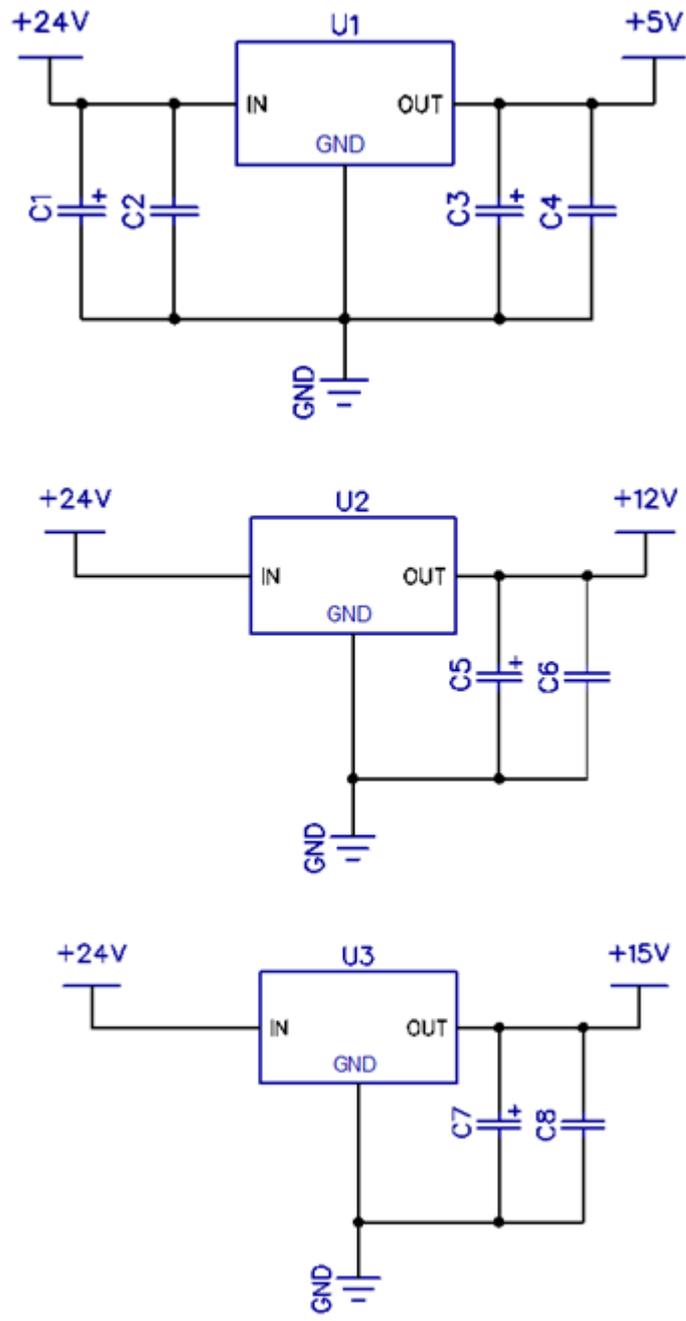


Рисунок 18 – Схемы подключения стабилизаторов LM78xx

3 Разработка алгоритма управления

3.1 Разработка программы

Исходные данные: тактовая частота микроконтроллера – 12 МГц, частота ШИМ – 5 кГц, частота напряжения статора – 10...100 Гц с шагом регулирования 1 Гц.

Код программы написан в среде разработки Arduino IDE на языке программирования C++.

Листинг программы приведен в приложении А.

Как уже было упомянуто выше, микроконтроллер ATmega2560 имеет в своем составе 6 таймеров-счетчиков (далее ТС), два из которых два (ТС1 и ТС3) 16-разрядные. Это означает, что ТС может досчитать до числа $2^{16} = 65536$, после чего сбрасывается в ноль. Реализация ШИМ основана на их использовании. ТС1 и ТС3 имеют по три синхронизированных канала, генерирующих ШИМ-сигнал на выводах ОСхА, ОСхВ, ОСхС, где х – номер таймера.

В данной работе реализуется однополярный ШИМ-сигнал [17, с.447] на двух выходах ОСхА и ОСхВ, со сдвигом фаз π .

Настройка таймера происходит путем установки или сброса битов регистров TCCRxA, TCCRxB и TIMSKx в соответствии с технической документацией на микроконтроллер [16].

ТС1 и ТС3 могут генерировать ШИМ-сигнал в нескольких режимах (рисунки 19-22):

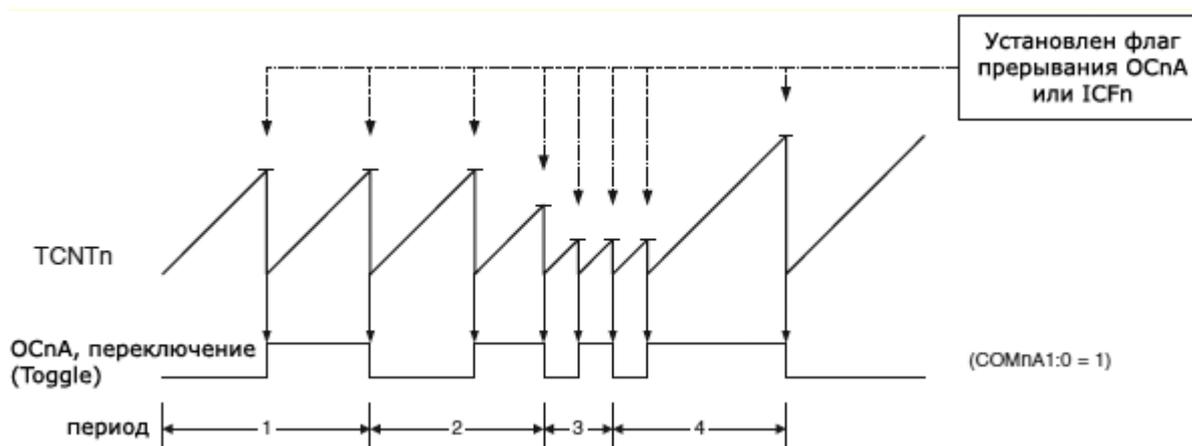


Рисунок 19 – Режим СТС

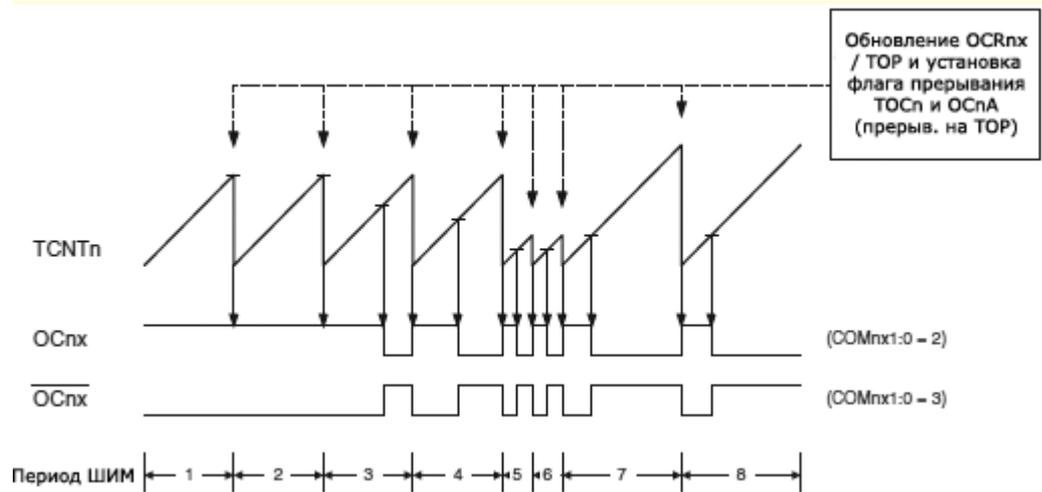


Рисунок 20 – Режим FastPWM

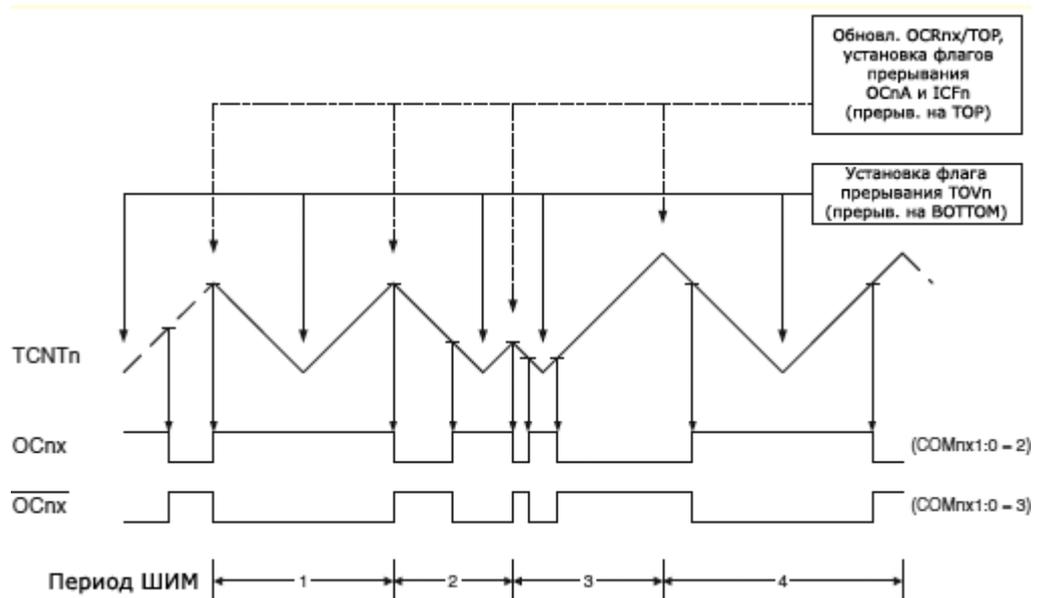


Рисунок 21 – Режим Phase Correct PWM

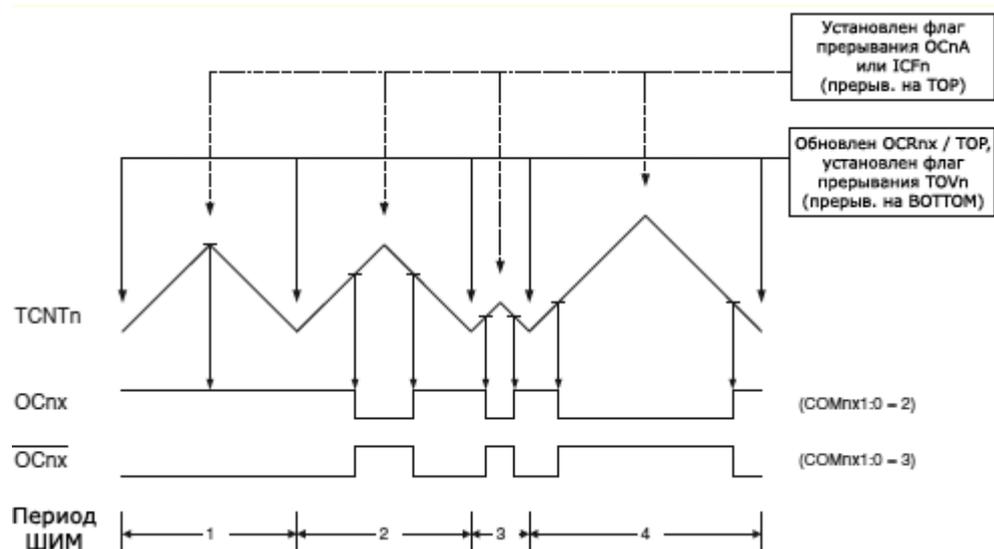


Рисунок 22 - Режим Phase and Frequency Correct PWM

1. Режим СТС (сброс при совпадении) – регистр счетчика TCNTx сбрасывается при совпадении с регистром OCRx или ICRx.

2. FastPWM – регистр счетчика TCNTx считает до определенного значения, сбрасывается в 0 и начинает счет заново.

3. Режим Phase Correct PWM – регистр счетчика TCNTx считает от 0 до определенного значения, а затем считает в обратном направлении. В данном режиме сохраняется корректной фаза.

4. Режим Phase and Frequency Correct PWM – принцип тот же, что и у Phase Correct PWM, но сохраняется корректной и фаза, и частота.

В разрабатываемом устройстве используется режим FastPWM. Для его инициализации необходимо настроить биты регистров управления.

Для формирования синусоидального ШИМ-сигнала необходимо использовать таблицу дискретных значений синусов от 0 до 2π [18]. Таблица синусов используется для вычисления напряжения, которое необходимо приложить к статорным обмоткам двигателя:

$$\begin{aligned} V_1 x &= V_m f k \cdot \sin \theta_1 k, \\ V_2 x &= V_m f k \cdot \sin \theta_2 k, \text{ где} \end{aligned} \quad (14)$$

$V_m f k$ – амплитуда напряжения статора, определяемая из принципа постоянства отношения напряжения статора к частоте,

$\theta_1 k$ и $\theta_2 k$ – мгновенные значения фаз

$$\begin{aligned} \theta_1 k &= \theta_1 k - 1 + f k \cdot T_s, \\ \theta_2 k &= \theta_2 k - 1 + f k \cdot T_s, \text{ где} \end{aligned} \quad (15)$$

$f k$ – частота напряжения статора,

T_s – период дискретизации алгоритма управления.

Вычисление требуемой амплитуды напряжения происходит в функции VFcontrol. Функция реализует принцип вычисления амплитуды напряжения по зависимости, отображенной на рисунке 23.

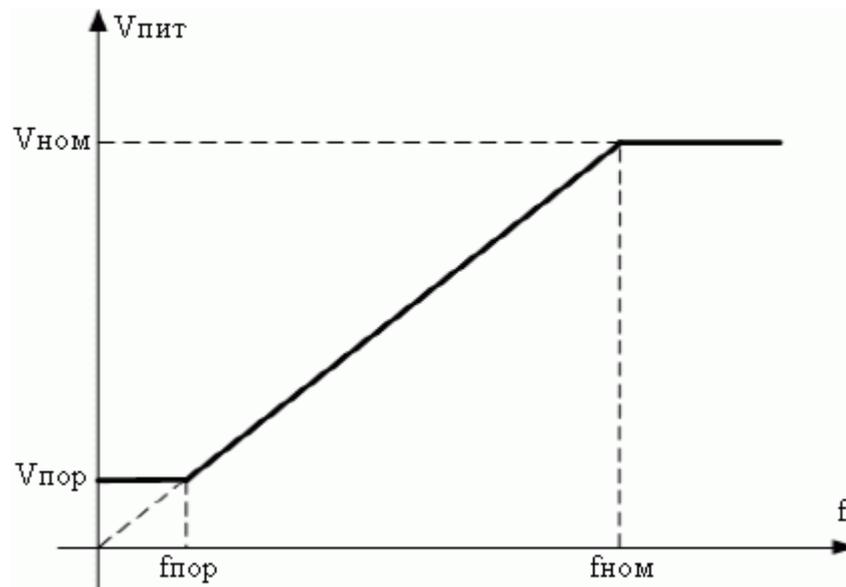


Рисунок 23 – Зависимость амплитуды от частоты напряжения статора

Номинальные значения $U_{ном}$ и $f_{ном}$ определяются из технической документации на двигатель. Для двигателя АВЕ-071-4С $U_{ном} = 310$ В, $f_{ном} = 50$ Гц. Пороговую частоту $f_{пор}$ принято определять, как 5% от номинальной.

Блок схема основной программы приведена на рисунке 24.

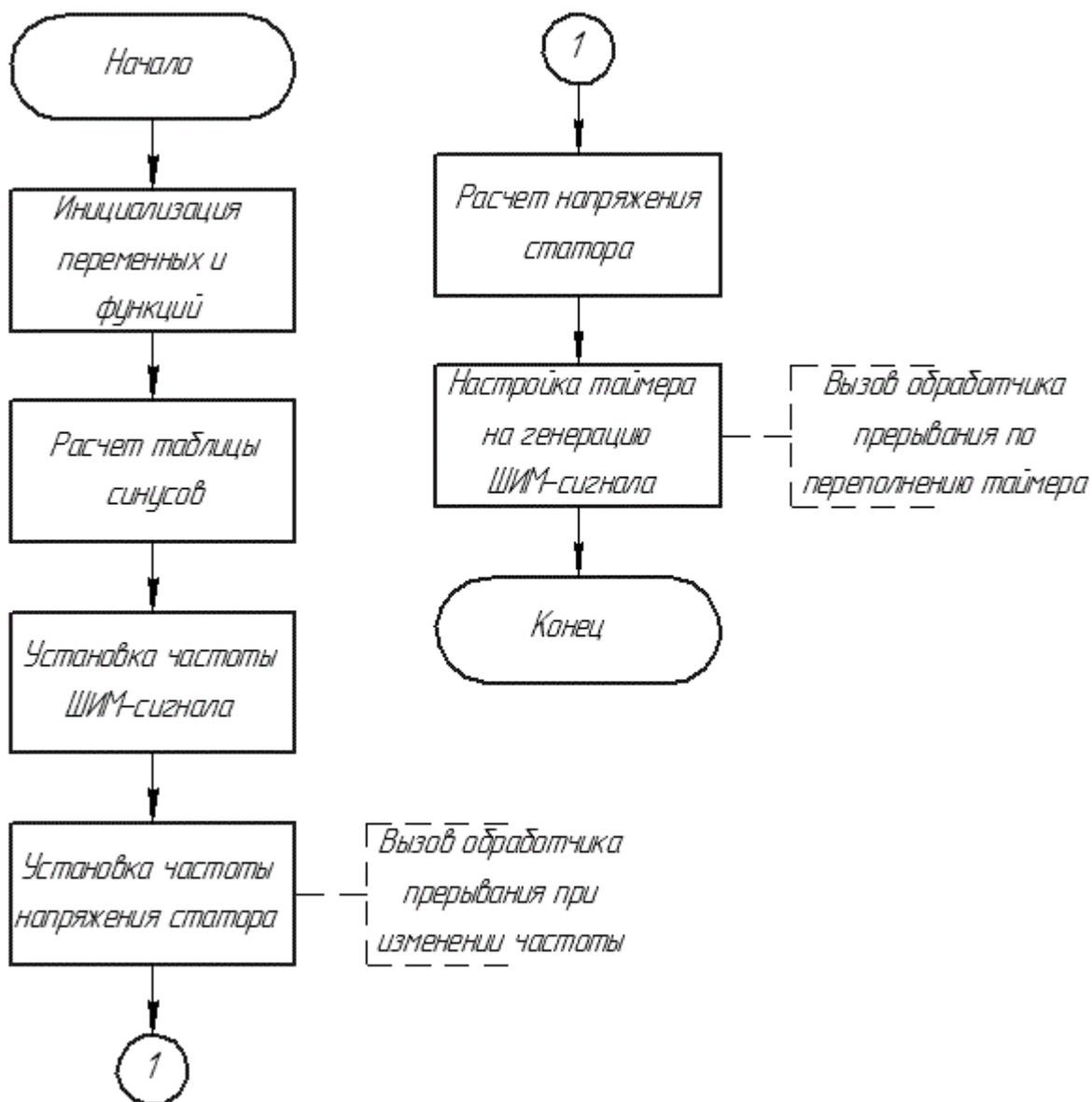


Рисунок 24 – Блок-схема основной программы

4 Разработка прототипа

4.1 Разработка платы драйвера

В качестве ПО для разработки платы драйвера использовалась программа DipTrace. Учитывая сравнительную простоту схемы, было решено разработать одностороннюю плату. Помимо драйвера на плате установлены стабилизаторы напряжения LM78xx, компаратор и элементы индикации. Чертеж печатной платы в соответствии с требованиями ГОСТ 2.417-91 изображен на рисунке 25.

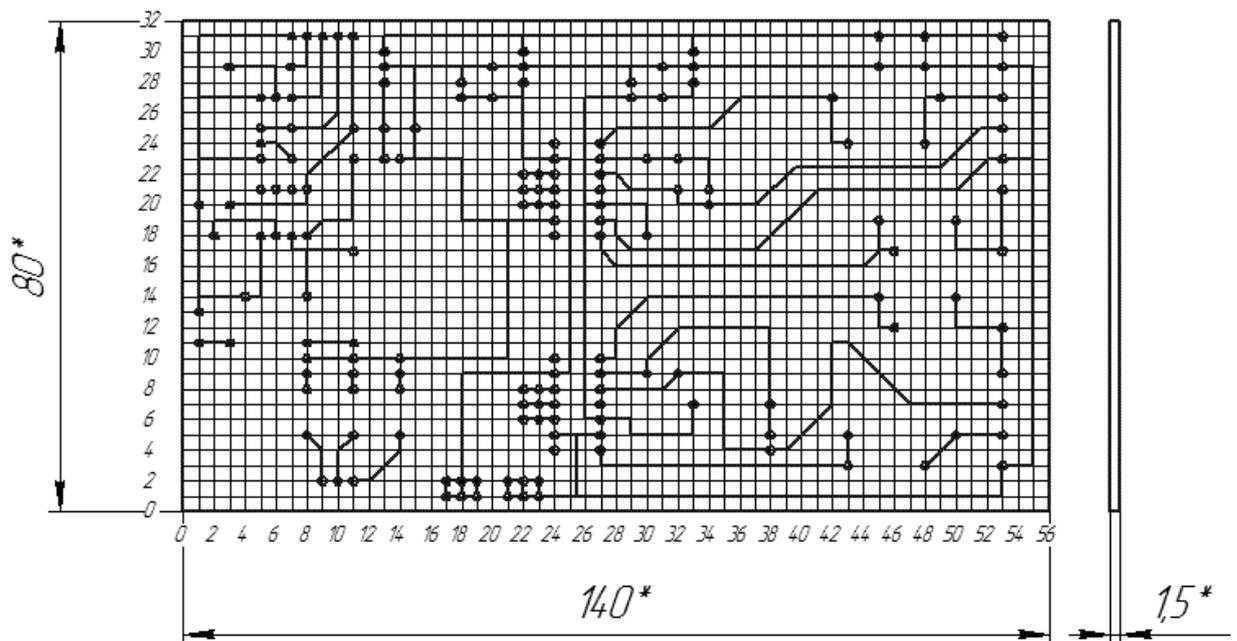


Рисунок 25 – Чертеж печатной платы

Плата изготовлена фоторезистивным методом. Использовался пленочный фоторезист ПФ-ВЩ-50. Далее плата с нанесенным на нее фоторезистивным слоем экспонировалась под ультрафиолетовым источником света в течение 10 минут, а затем проявлялась в 1% растворе кальцинированной соды. После проявки следовало вытравливание проводящих дорожек в 40% растворе хлорного железа. Пайка навесных элементов осуществлялась припоем Kaisi 60/40 0,3 mm и флюсом ЛТИ-120. Результат представлен на рисунке 26.

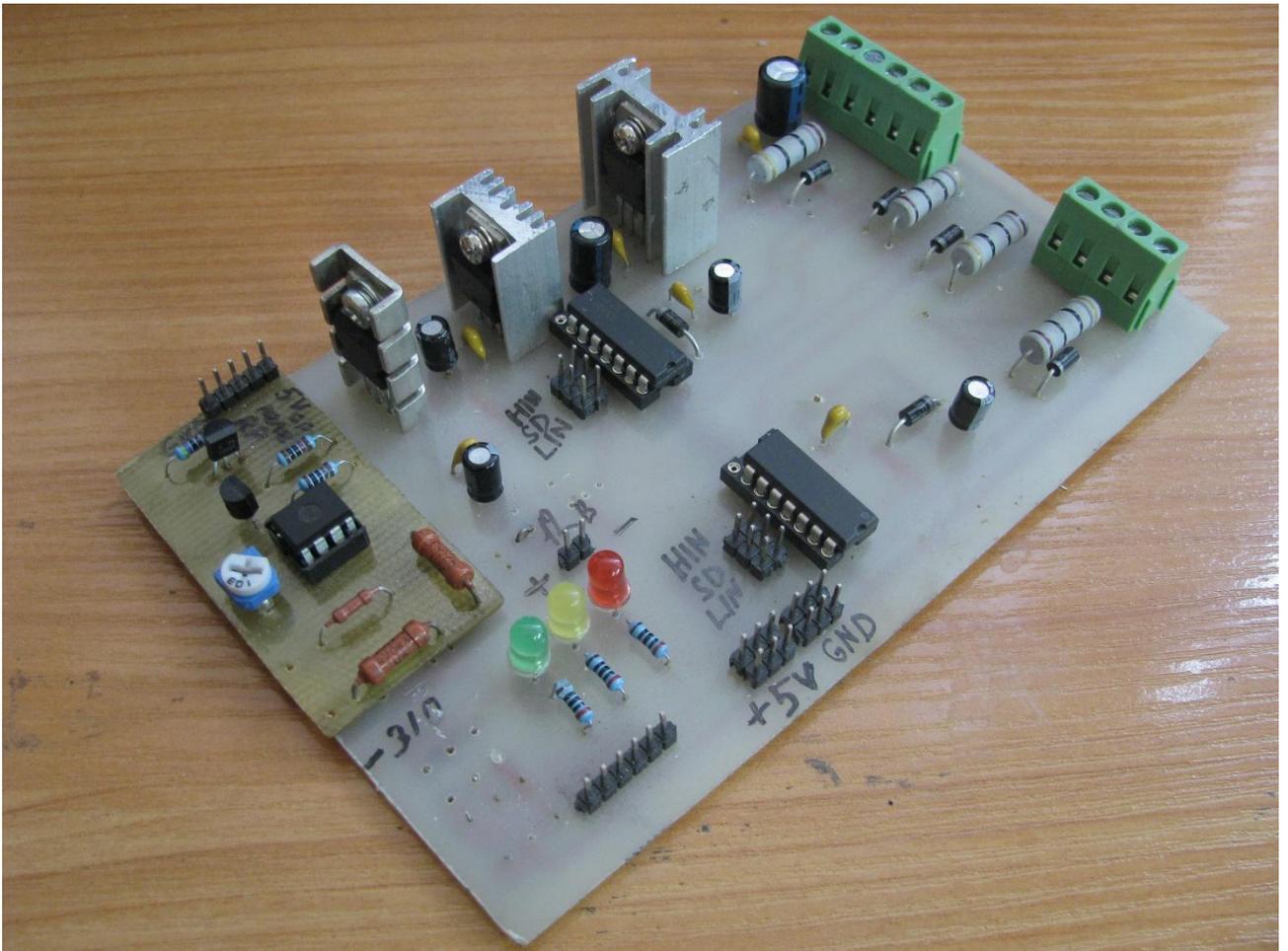


Рисунок 26 – Плата драйвера

4.2 Сборка прототипа

Силовая часть прототипа преобразователя (АИН, УПП и выпрямитель) собрана на единой платформе, представляющей из себя алюминиевый радиатор. Для изоляции транзисторов и радиатора служат слюдяные прокладки. Конденсаторы фильтра припаяны на плату, на которой вырезаны две широкие проводящие дорожки. К ним также припаяны ограничительные диоды и разряжающий резистор ПЭВ-25 сопротивлением 22 кОм. Соединение функциональных элементов преобразователя между собой выполнено с помощью многожильных проводов.

Собранный прототип преобразователя частоты представлен на рисунке 27.

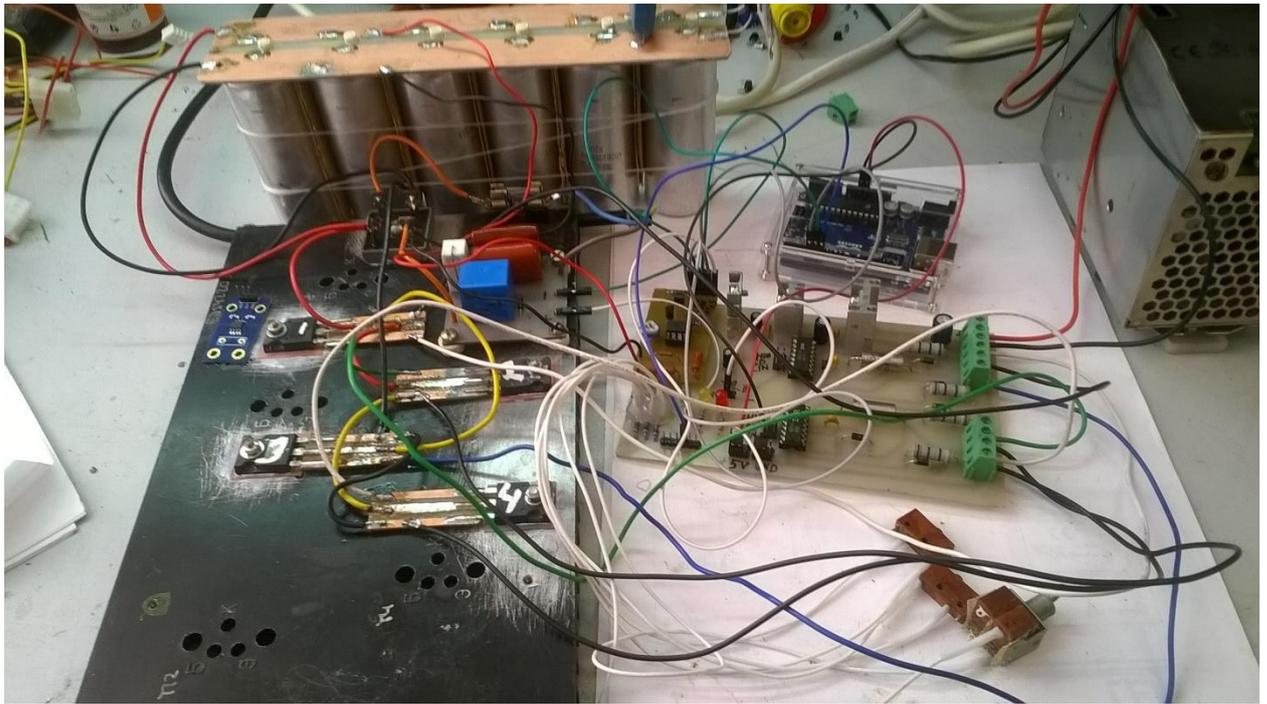


Рисунок 27 – Сборка прототипа

Осциллограмма токов пусковой и рабочей обмоток двигателя при частоте напряжения статора 50 Гц представлена на рисунке 28.

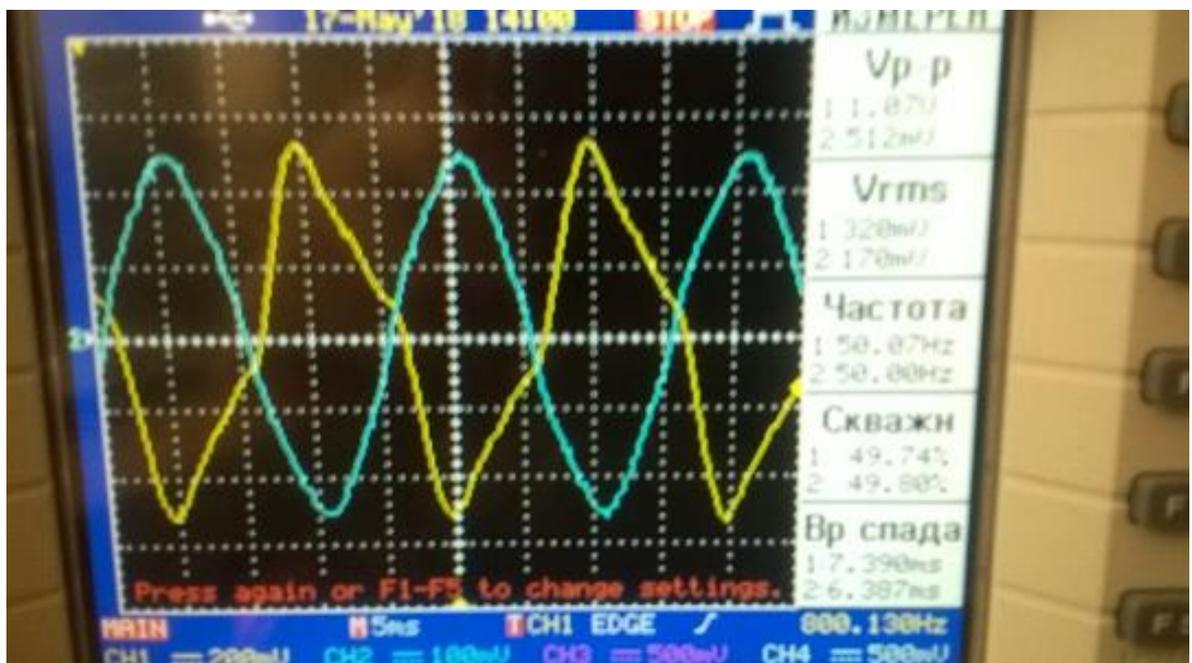


Рисунок 28 – Осциллограмма токов обмоток двигателя при частоте 50 Гц

5 Безопасность проекта

Так как проектируемое устройство относится к преобразователям частоты, оно должно соответствовать требованиям безопасности в соответствии с разделом 3 ГОСТ 24607-88.

Эксплуатация асинхронного двигателя выполняется в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ).

Требования безопасности при изготовлении печатной платы преобразователя должны соответствовать ГОСТ Р 53432-2009.

Программирование микроконтроллера преобразователя осуществляется с использованием персонального компьютера. Работа с персональным компьютером должна производиться в соответствии с требованиями следующих нормативных актов:

- ТК РФ;
- Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 N 302н;
- Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 N 426-ФЗ;
- СаНПиН;
- ТОИ Р-45-084-01.

При пайке и лужении элементов преобразователя необходимо соблюдать требования Постановления Минтруда РФ от 17.07.2003 N 55.

Работа с ручным инструментом при сборке преобразователя должна производиться в соответствии с требованиями Приказа Минтруда России от 17.08.2015 N 552н.

6 Экономический анализ

Подсчитана стоимость элементов и расходных материалов, используемых при изготовлении прототипа преобразователя частоты. Стоимость взята на основе данных интернет-магазинов Платан, Импульс, Чип и Дип и AliExpress с

учетом наиболее выгодных предложений. В смету не входит стоимость асинхронного двигателя, теплового реле, радиаторов и электролитических конденсаторов К50-27, а также стоимость применяемых при монтаже инструментов. Смета приведена в таблице 9.

Таблица 9 – Смета расходов на элементы и расходные материалы

№	Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость, руб.
1	Arduino Mega 2560	1	2270,00
2	Блок питания MeanWell DR-120-24	1	2710,00
3	Модуль датчика тока ACS712ELCTR-20A	1	128,87
4	LCD дисплей 16x4	1	250,61
5	Модуль I ² C интерфейса для дисплея	1	46,63
6	Транзистор IRG4PH40UD	4	760,00
7	Микросхема IR2110	2	180,00
8	Припой Kaisi 60/40, 0,3 мм, 150 г	1	381,02
9	Флюс ЛТИ-120 0,1 л	1	100,00
10	Фоторезистивная пленка ПФ-ВЦ-50 200x150 мм	1	120,00
11	Стеклотекстолит односторонний 100x150x1,5 мм	1	100,00
12	Хлорное железо безводное, 250 г	1	390,00
13	Сода кальцинированная, 150 г	1	110,00
14	Провода соединительные DuPont в ассортименте	120	128,87
15	Провод НВ 1.00	5	60,00
16	Резисторы постоянные в ассортименте	15	195,60
17	Конденсаторы неполярные в ассортименте	10	210,00
18	Разъем К-128-2Р	5	25,84
19	Диод UF4007	7	63,00
20	Стабилизаторы серии LM78xx	3	120,00
21	Конденсаторы электролитические в ассортименте	6	80,00

Таблица 9 – Смета расходов на элементы и расходные материалы

22	Кнопки PS850L	3	75,00
23	Диоды ограничительные 1.5KE400A	2	38,00
24	Диодный мост KBPC2510	1	98,00
25	Датчик Холла SS49E	1	130,00
26	Светодиоды разных цветов	3	6,00
27	Автоматический выключатель KEAZ OptiDin BM63-2	1	612,00
28	Предохранитель 6x30 10 А	1	8,00
29	Операционный усилитель LM358P	1	9,00
30	Оптопара PC817	1	12,00
31	Резистор подстроечный 10 кОм	1	4,00
Итого:			9422,44

Заключение

В данной бакалаврской работе был спроектирован прототип частотно-регулируемого привода для испытательного стенда по изучению работы асинхронных машин в генераторном режиме. Рассмотрены основные известные схемотехнические решения. Произведен анализ рынка. Выполнен расчет и обоснованный выбор элементов. Разработан алгоритм управления преобразователем частоты. Изготовлена плата драйвера транзисторных ключей. Выполнена сборка прототипа и проведены испытания его работы.

Список используемой литературы

- 1 Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- 2 Кучинский, В.Г. Управляемые преобразователи частоты для регулируемых приводов / В.Г. Кучинский, Е.Н. Попков, В.М. Чайка // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. - 2013. - № 5. - С. 67-72.
- 3 IRG4PH40UD. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph40ud.pdf>, свободный.
- 4 Гавриков, В. Полупроводниковая защита: обзор основных серий TVS-диодов от Littelfuse. [Электронный ресурс] / Новости Электроники. – 2014. - №12. - режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/ne/2014/12/5-poluprovodnikovaya-zashhita-obzor-osnovnyih-seriy-tvs-diodov-ot-littelfuse>, свободный.
- 5 1.5KE400A. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.vishay.com/docs/88301/15ke.pdf>, свободный.
- 6 IR2110. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <https://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e>, свободный.
- 7 Колпаков, А. Характеристики и особенности применения драйверов MOSFET и IGBT. [Электронный ресурс] / Компоненты и технологии. – 2003. - №3. - режим доступа: https://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2003_03_22.pdf, свободный.
- 8 UF4007. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/88755/uf4001.pdf>, свободный.
- 9 KBPC2510. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/34038/WTE/KBPC2510.html>, свободный.

- 10 ACS712ELCTR-20A-T. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>, свободный.
- 11 SS49E. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/473135/SECELECTRONICS/SS49E.html>, свободный.
- 12 SRD-12VDC-SL-C. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.datasheetcafe.com/wp-content/uploads/2015/10/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf>, свободный.
- 13 2N2222A. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.farnell.com/datasheets/78775.pdf>, свободный.
- 14 LM358P. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22771/STMICROELECTRONICS/LM358P.html>, свободный.
- 15 PC817. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/43368/SHARP/PC817.html>, свободный.
- 16 ATmega2560. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf, свободный.
- 17 Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с., ил.
- 18 Каверин, С.В. Амплитудно-частотное управление асинхронным двигателем / С.В. Каверин, И.А. Каверина // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики. Тольятти: Издательство Волжского университета - 2012. С. 185 – 192
- 19 Богдан, А.В. ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ / А.В. Богдан, Я.А. Ильченко, А.Н. Соболев, М.В. Ерохов // Научный журнал КубГАУ. – 2014. - №97(03). – С.1-11.

- 20 Встовский, А.Л. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ / А.Л. Встовский, К.С. Федий, М.Г. Архипцев, Е.А. Спиринов // Известия Томского политехнического университета – 2014. – Т.324. - №4. - С.133 – 137.
- 21 Shalchi Alishah, R. Design of New Single-phase Multilevel Voltage Source Inverter [Text] / R. Shalchi Alishah, D. Nazarpour, S. Hossein Hosseini, M. Sabahi // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 5. - 2014. - No. 1. - PP. 45-55. ISSN: 2088-869
- 22 Prathap Reddy, B. Novel Single Phase Full Bridge Inverter Formed by Floating Capacitors [Text] / B. Prathap Reddy, K. Sreekanth Reddy, B. Samba Siva Reddy // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 7. - 2016. - No. 1. - PP. 193-201. ISSN: 2088-8694
- 23 Konstantinou, G. A Hybrid Modular Multilevel Converter with Partial Embedded Energy Storage [Text] / G. Konstantinou, J. Pou, D. J. Pagano, S. Ceballos // ResearchGate. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311243264_A_Hybrid_Modular_Multilevel_Converter_with_Partial_Embedded_Energy_Storage
- 24 Srinivasan, K. Power Quality Analysis of Vienna Rectifier for BLDC Motor Drive Application [Text] / K. Srinivasan, S. Vijayan, S. Paramasivam, K. Sundaramoorthi // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 7. - 2016. - No. 1. - PP. 7-16. ISSN: 2088-8694
- 25 Saber, K. FPGA-Based Implementation Direct Torque Control of Induction Motor [Text] / Saber, K. Soufien, G. Abdellatif, M. Mohamed Faouzi, M. // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 5. - 2015. - No. 3. - PP. 293-304. ISSN: 2088-8694
- 26 Гусев, В.Г. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.: ил.
- 27 Memon M.A., R. THD Minimization from H-Bridge Cascaded Multilevel Inverter Using Particle Swarm Optimization Technique / M.A. Memon, Sh. Memon, Sh. Khan

// Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. Vol. 36. - 2017. - No. 1. - pp. 33-38(6).

28 Idir, A., Kidouche, M. Real-Time Simulation of V/F Scalar Controlled Induction Motor using RT-Lab Platform for Educational purpose // Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics, 2013. Pp. 189 – 192.

29 Akroum, H., Kidouche, M., Aibeche, A. Scalar Control of Induction Motor Drives Using dSPACE DS1104 // Proceedings of the 2013 International Conference on Systems, Control and Informatics, 2013. Pp. 322 – 327.

30 Управление асинхронным электродвигателем переменного тока по принципу постоянства V/f и обычного ШИМ-управления [Электронный ресурс]: статья. - режим доступа: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/app/micros/avr/AVR494.htm>, свободный.

31 Денисов, В.А. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ / В.А. Денисов, М.Н. Третьякова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. - №1. - С.19 – 24.

32 Шонин, О.Б. НАБЛЮДАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА В СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ / О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. - №2(31). – С.15-19.

33 Романенко, Н.Г. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ / Н.Г. Романенко // Интерактивная наука. – 2017. – №10(20). – С.33-36.

34 Семёнов, А.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ МАТЛАВ / А.С. Семёнов // Вестник СВФУ. – 2014. – Т.11. - №1. - С.51 – 59.

Приложение А

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define LookupEntries (512)

static int microMHz = 16; // clock frequency in MHz
static int freq, amp = 1024;// Sinusoidal frequency
static long int period; // Period of PWM in clock cycles. 1600 gives 10KHz.
static unsigned int lookUp[LookupEntries];
static char theTCCR1A = 0b10000010; //variable for TCCR1A
static unsigned long int phaseinc, switchFreq;
static double phaseincMult;

int setFreq(int freq); //set in Hertz
int setSwitchFreq(int sfreq); //set in Hertz
int setAmp(float _amp); //set in % (0 - 100)
void makeLookUp(void);
void registerInit(void);

void setup(){
    makeLookUp();
    setSwitchFreq(10000);
    setFreq(50);
    setAmp(100);
```

```

registerInit();
}

void loop(){

static int ampVal, freqVal, analogVal;

analogVal = analogRead(A0);
if(analogVal > freqVal*1.01 || analogVal < freqVal*0.99){
    freqVal = analogVal;
    setFreq(map(freqVal, 0, 1023, 5, 300));
}

delay(20);

}

ISR(TIMER1_OVF_vect){
    static unsigned long int phase, lastphase;
    static char delay1, trig = LOW;

    phase += phaseinc;

    if(delay1 == 1){
        theTCCR1A ^= 0b10100000;// Toggle connect and disconnect of compare output
        A and B.
    }
}

```

```

TCCR1A = theTCCR1A;
delay1 = 0;
}
else if((phase>>31 != lastphase>>31) && !(phase>>31)){
    delay1++;
    trig = !trig;
    digitalWrite(13,trig);
}

lastphase = phase;
OCR1A = OCR1B = ((lookUp[phase >> 23]*period) >> 12)*amp >> 10;
}

```

```

int setFreq(int _freq){
    if(_freq < 0 || _freq > 1000){ // returns -1 if the frequency value is invalid
        return 0;
    } else {
        freq = _freq;
        phaseinc = (unsigned long int) phaseincMult*_freq;
        return 1;
    }
}

```

```

int setSwitchFreq(int sfreq){
    double temp;

    if(sfreq <= 0 || sfreq > 20000){
        return 0;
    }
}

```

```

} else {
    switchFreq = sfreq;
    period = microMHz*1e6/sfreq;
    //sindevisions*decimalbits/1MHz =
    //1024*2^23/1e6 = 8,589.934592
    phaseincMult = (double) period*8589.934592/microMHz;
    phaseinc = (unsigned long int) phaseincMult*freq;
    ICR1 = period;
}
}

void makeLookUp(void){
    double temp;

    cli(); //disable global interupts while lookup table is made
    TCCR1A = 0b00000010; //disconnect compare A and B while lookup table is
generated

    for(int i = 0; i < LookupEntries; i++){ // Generating the look up table.
        temp = sin(i*M_PI/LookupEntries)*4096;
        lookUp[i] = (int)(temp+0.5);    // Round to integer.
    }

    TCCR1A = theTCCR1A; // reconnect compare outputs
    sei(); //re-enable interupts now that table has been made
}

void registerInit(void){

```

```

// Register initilisation, see datasheet for more detail.
TCCR1A = theTCCR1A; // 0b10000010;
/*10 clear on match, set at BOTTOM for compA.
00 compB disconnected initially, toggled later to clear on match, set at BOTTOM.
00
10 WGM1 1:0 for waveform 15.
*/
TCCR1B = 0b00011001;
/*000
11 WGM1 3:2 for waveform 15.
001 no prescale on the counter.
*/
TIMSK1 = 0b00000001;
/*0000000
1 TOV1 Flag interrupt enable.
*/
sei(); // Enable global interrupts.
// Set outputs pins.
DDRB = 0b00000110; // Set PB1 and PB2 as outputs.
pinMode(13, OUTPUT); // Set trigger pin to output
}

```

Приложение Б