

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Усть-Катаве

Кафедра Электромеханика

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, ФГУП «УИВЗ»  
Инженер-Электроник  
И. Камезорин  
Семенин И.В. 25.05. 2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,  
к.ф.м.н., доцент  
В.И. Сафонов  
20 июня 2016 г.

Модернизация электропривода главного движения  
обрабатывающего центра IP-500

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ-140400.2016.086.000 ПЗ ВКР

Консультанты  
Безопасность жизнедеятельности,  
к.т.н., доцент  
В.Г. Некрутов  
25.05. 2016 г.

Руководитель работы,  
доцент  
В. Д. Константинов  
10.06.16 2016 г.

Автор работы  
студент группы У-К-523  
А.В. Гусев  
25.05. 2016 г.

Нормоконтролер, инженер  
Ю.В. Константинов  
25.05. 2016 г.

Усть-Катав 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Усть-Катаве

Кафедра                              Электромеханика  
Направление                     140400 Электроэнергетика и электротехника

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
Сафонов В.И. В.И. Сафонов  
1 февраля 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
на выпускную квалификационную работу студента  
Гусева Александра Валерьевича  
Группа У-К-523

1 Тема работы

Модернизация электропривода главного движения обрабатывающего центра  
ИР-500

утверждена приказом по филиалу от 15.04.2016 № 661

2 Срок сдачи студентом законченной работы 1 июня 2016 г.

3 Исходные данные к работе

3.1 Материалы производственной практики

3.2 Справочно-техническая литература

3.3 Инструкции к оборудованию

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Аннотация

Оглавление

Введение

1 Сравнение отечественных и передовых зарубежных технологий и решений.

Преобразователи частоты и комплектные электроприводы серии ЭПВ. Преобразователь частоты ProfiMaster. Серия преобразователей частоты VDF-C от Delta Electronics. Выводы.

2 Основной раздел. Обрабатывающий центр IP-500. Общие сведения, технические характеристики. Постановка задачи. Определение мощности электродвигателя. Проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности привода. Динамический расчет привода. Выводы.

3 Специальный раздел. Выбор варианта СУЭП с частотным регулированием. Синтез структурной схемы частотного регулятора скорости. Разработка функциональной схемы. Выбор хост-контроллера. Выбор вспомогательных микропроцессорных средств. Выбор датчиков скорости, тока, температуры и напряжения. Выбор частотного преобразователя. Разработка принципиальной схемы. Выбор защитной аппаратуры. Исследование переходных процессов. Разработка системы диагностики и защиты. Выводы.

4 Организационно-экономический раздел. Исходные данные для расчета экономического эффекта от модернизации. Расчет затрат на проведение модернизации. Расчет экономического эффекта от проведения модернизации. Выводы.

5 Безопасность жизнедеятельности. Общие сведения. Анализ опасных и вредных производственных факторов. Расчет защитного заземления. Экологическая безопасность. Выводы.

Заключение

Библиографический список



Приложения

5 Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, плакатов в листах формата А1)


<u>5.1 Центр обрабатывающий ИР-500. Схема кинематическая принципиальная.</u>	<u>1,0 л</u>
<u>5.2 Система управления электроприводом. Схема электрическая структурная</u>	<u>1,0 л</u>
<u>5.3 Система управления электроприводом. Схема электрическая функциональная</u>	<u>1,0 л</u>
<u>5.4 Блок управления электроприводом. Схема электрическая принципиальная</u>	<u>1,0 л</u>
<u>5.5 Блок микропроцессорный. Схема электрическая принципиальная</u>	<u>1,0 л</u>
<u>5.6 Система диагностики неисправностей электропривода. Схема совмещенная структурная</u>	<u>1,0 л</u>


Всего 6 чертежей

6 Консультанты по работе, с указанием относящихся к ним разделов работы

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
Безопасность жизнедеятельности	В.Г. Некрутов		

7 Дата выдачи задания 1.02. 2016 г.

Руководитель, доцент  В. Д. Константинов  
(подпись)

Задание принял к исполнению  А.В. Гусев  
(подпись студента)

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Сравнение отечественных и передовых зарубежных технологий и решений	1.02.16 - 15.02.16	BKed
Основной раздел	15.02.16 - 01.03.16	BKed
Специальный раздел	02.03.16 - 29.03.16	BKed
Организационно-экономический раздел	30.03.16 - 10.04.16	BKed
Безопасность жизнедеятельности	10.04.16 - 21.04.16	BKed
Выполнение графической части	22.04.16 - 23.05.16	BKed
Направление на рецензию	25.05.2016.	BKed

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /В.И. Сафонов/

Руководитель работы \_\_\_\_\_ / В. Д. Константинов /

Студент \_\_\_\_\_ /А.В. Гусев /

## АННОТАЦИЯ

Гусев А.В. Модернизация электропривода главного движения обрабатывающего центра ИР-500. – Усть – Катав: ЮУрГУ, Электромеханика; 2016, 102 с., 32 илл., библиогр. список – 19 наим., 6 листов чертежей ф. А1.

После анализа существующего электропривода обрабатывающего центра ИР-500 с использованием двигателя постоянного тока предложен вариант модернизации, который заключается в замене существующего привода на асинхронный с векторным управлением.

Рассмотрены модели современных частотных преобразователей и комплектных электроприводов. В качестве варианта замены выбран частотный преобразователь серии ЭПВ. Разработана оригинальная принципиальная схема, на современной микропроцессорной элементной базе.

Быстродействие системы управления составляет не более 0,1 с, величина перерегулирования — не более 3,5 %.

Модернизация электропривода обрабатывающего центра ИР-500 позволит расширить функциональные возможности станка, повысить качество обработки, повысить энергоэффективность, снизить затраты на ремонт и обслуживание.

Проект модернизации является экономически целесообразным, так как ожидаемый годовой экономический эффект положителен и составляет 882 209,02 руб./год.

140400.2016.086.000 ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб	Гусев		<i>А.В. Гусев</i>	25.05.16
Провер	Константинов		<i>В. Константинов</i>	25.05.16
Реценз	Семенкин		<i>А. Семенкин</i>	25.05.16
Н. Контр.	Константинов		<i>В. Константинов</i>	25.05.16
Утверд	Сафонов		<i>В. Сафонов</i>	20.06

Лит	Лист	Листов
Д	4	102
Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Усть-Катав Кафедра Электромеханика		

Модернизация электропривода главного движения обрабатывающего центра ИР-500

Лит Д Лист 4 Листов 102  
Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г. Усть-Катав  
Кафедра Электромеханика

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИ	
1.1 Преобразователи частоты и электроприводы серии ЭПВ.....	7
1.2 Преобразователь частоты ProfiMaster .....	11
1.3 Серия преобразователей частоты VDF-C от Delta Electronics.....	12
Выводы по разделу один.....	13
2 ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ	
2.1 Обрабатывающий центр IP-500. Общие сведения, характеристики...	17
2.2 Постановка задачи.....	24
2.3 Определение мощности электродвигателя.....	26
2.4 Проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности привода.....	27
2.5 Динамический расчет привода.....	28
Выводы по разделу два.....	29
3 СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	
3.1 Выбор варианта СУЭП с частотным регулированием.....	30
3.2 Синтез структурной схемы частотного регулятора скорости.....	33
3.3 Разработка функциональной схемы.....	37
3.4 Выбор хост-контроллера.....	39
3.5 Выбор вспомогательных микропроцессорных средств.....	43
3.6 Выбор датчиков скорости, тока, температуры и напряжения.....	45
3.7 Выбор частотного преобразователя.....	52
3.8 Разработка принципиальной схемы.....	55
3.9 Выбор защитной аппаратуры.....	69
3.10 Исследование переходных процессов .....	70
3.11 Разработка системы диагностики и защиты.....	75
Выводы по разделу три.....	78
4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
4.1 Исходные данные для расчета экономического эффекта от модернизации.....	79
4.2 Расчет затрат на проведение модернизации.....	82
4.3 Расчет экономического эффекта от проведения модернизации.....	84
Выводы по разделу четыре.....	92
5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ	
5.1 Общие сведения.....	93
5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	93
5.3 Расчет защитного заземления.....	94
5.4 Экологическая безопасность.....	99
Выводы по разделу пять.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	101

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях жёсткой конкуренции и постоянно повышающихся технических требований к изготавливаемой продукции, в отечественной промышленности чётко прослеживается тенденция по обновлению станочного оборудования с ЧПУ. Для старого оборудования проводится комплекс работ по модернизации. Модернизация станков с ЧПУ может включать в себя и, как правило, включает оснащение модернизируемого оборудования новейшими системами ЧПУ, приводами, шпиндельными узлами, гидравликой. Затраты такой модернизации составляют около 50% от стоимости нового станка, при обеспечении тех же функциональных и технологических возможностей. При этом, модернизированное оборудование отвечает требованиям технологии на ближайшие 10 – 12 лет.

Основные направления модернизации станков с ЧПУ:

- а) доведение технических параметров до соответствия на ближайшие 10 лет требованиям современной технологии обработки;
- б) создание типовых проектов модернизации станков;
- в) оснащение станков современными комплектными системами управления (КСУ) и другими узлами;
- г) оценка состояния металлорежущего оборудования;
- д) увеличение количества управляемых координат
- е) замена, в случае необходимости, механических узлов.

В настоящий момент обязательным пунктом в работах по модернизации присутствует замена системы ЧПУ, приводов, электродвигателей и других устройств электроавтоматики. В комплексе, перечисленный набор принято называть комплектными системами управления (КСУ) металлорежущим оборудованием. Разработанные КСУ предназначены для использования при модернизации существующих станков. Кроме того, разработанные КСУ могут быть применены для управления вновь разрабатываемыми станками, в том числе и с новыми принципами конструирования и использования нетрадиционных принципов компоновки.

Разработанные КСУ предназначены для установки на фрезерные, сверлильно-расточные, токарные, токарно-фрезерно-сверлильные, в том числе с револьверными головками, электроэрозионные и другие виды станков с ЧПУ. В настоящее время в большинстве регулируемых приводов применяются двигатели постоянного тока с питанием от тиристорного преобразователя частоты. Замыкание обратной связью позволяет обеспечить точное поддержание скорости при переменной нагрузке, что желательно или необходимо для получения требуемого качества технологических процессов. Однако двигатели постоянного тока сложны в эксплуатации и обслуживании, из-за наличия коллектора их затруднительно применять в запыленных помещениях и взрыво-небезопасной среде.

Регулируемые привода с асинхронными двигателями позволяют снизить эксплуатационные затраты, повысить перегрузочную способность, надежность и снизить требования к среде эксплуатации.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6



# 1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ

## 1.1 Преобразователи частоты и комплектные электроприводы серии ЭПВ

Представлены новые совместные работы ООО "ЭЛПРИ" (г. Чебоксары) и НИЛ "Вектор" Ивановского государственного энергетического университета в области частотного и адаптивно-векторного управления электроприводом переменного тока.

Преобразователи и комплектные электроприводы серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных, "интеллектуальных" устройств управления низковольтными (до 440 В) электродвигателями переменного тока, асинхронными и синхронными, мощностью от 1 до 400 кВт, предназначенных для регулируемого привода механизмов и технологических процессов с самыми различными требованиями к параметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточных станков и следящих систем.

Системы управления всех преобразователей серии выполнены на основе универсального микроконтроллерного ядра, образованного двумя 16-и разрядными микроконтроллерами. В сравнении с предыдущей разработкой НИЛ "Вектор" [1], выпускаемой ООО "ЭЛПРИ" с 1999 года под маркой АПЧ, электроприводы новой серии отличаются:

а) существенно более широкой областью использования, включающей объекты, требующие применения быстродействующего широкодиапазонного электропривода переменного тока, электропривода с высоким качеством двухстороннего обмена энергией с питающей сетью, а также высококачественного бездатчикового электропривода;

б) улучшенными показателями регулирования скорости (быстродействием, диапазоном);

в) улучшенными массо-габаритными и энергетическими характеристиками; более высокими показателями надежности, достигнутыми за счет повышения степени интеграции и показателей надежности отдельных компонентов;

г) широким набором входных и выходных сигналов;

д) существенно расширенными функциями интерфейса и повышением производительности интерфейсных каналов;

е) введением развитых функций программирования пользователем для решения разнообразных технологических задач;

ж) введением новых и повышением качества уже существующих режимов работы, функциональных возможностей и интеллектуальных свойств;

з) наличием удешевленного бескорпусного исполнения для встраивания в шкафы управления.

Среди новых режимов и возможностей [2] отметим следующие: режим адаптации к изменению активных сопротивлений двигателя, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к температурным изменениям сопротивлений статора и ротора; автоматическая настройка электропривода на заданные

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

динамические характеристики (время регулирования, полоса пропускания контура скорости, вид переходного процесса). Возможность последующей точной подстройки в ручном режиме с помощью тестовых входных сигналов и настроечных рекомендаций.

Расширение числа параметров привода, определяемых в результате процедуры автонастройки и повышение ее точности [3]. В результате выполнения автонастройки асинхронного электропривода определяются активные сопротивления статора и ротора, индуктивности рассеяния и взаимная, момент инерции, по которым производится расчет базовых значений всех параметров и коэффициентов системы управления электроприводом при заданных показателях качества регулирования; расширение числа параметров привода, определяемых в результате процедуры автонастройки и повышение ее точности. В результате выполнения автонастройки асинхронного электропривода определяются активные сопротивления статора и ротора, индуктивности рассеяния и взаимная, момент инерции, по которым производится расчет базовых значений всех параметров и коэффициентов системы управления электроприводом при заданных показателях качества регулирования.

Программно реализованная структура системы управления позволяет работать в замкнутом контуре регулирования скорости или момента. Минимальный полный цикл расчета контура скорости 100 мкс, контура момента — 50 мкс;

Алгоритм автоматической фазировки датчика скорости/положения исключает необходимость переключений при согласовании выходных сигналов с направлением вращения.

Использование описания процессов в пространстве состояний позволяет:

а) учитывать и количественно оценивать степень влияния каждого из управляемых экономических процессов на изменение исследуемого параметра; адекватно описывать колебания, происходящие в системе, вызванные структурными особенностями протекающего процесса, т.е. описывать структурную сложность системы; определять свойство адаптивности, т.е. определять возможность системы к поглощению возмущений без резко выраженных последствий в динамике функционирования.

б) наличие двух встроенных коммуникационных портов (RS-232/485 и CAN) при поддержке стандартных протоколов связи (MODBUS и CAN-Open) позволяет встраивать электроприводы в локальные информационно-управляющие сети, АСУ ТП и другие сложные системы, не требуя при этом затрат времени на освоение специфичных средств коммуникаций;

в) четыре независимых набора параметров могут активизироваться аппаратно или программно для различных применений и при изменениях внешних условий работы объекта управления;

г) программируемая частота модуляции (220 кГц) позволяет для любых применений находить оптимальное соотношение между шумами, вибрациями двигателя и дополнительными потерями в системе "преобразователь — двигатель";

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

д) широкий набор аналоговых и цифровых входов/выходов с возможностью их перепрограммирования и наращивания путем подключения дополнительных модулей;

е) пульт ручного управления выполняется встроенным в корпус преобразователя или съемным (для установки на дверце шкафа или пульта оператора);

ж) различные исполнения интерфейсной платы обеспечивают подключение датчиков скорости/положения с различными типами сигналов: импульсных, синусно-косинусных, резольверов

В качестве дополнительных опций могут подключаться:

а) режим адаптации к изменению параметров механической части привода, обеспечивающий инвариантность характеристик привода к изменению момента инерции и момента нагрузки;

б) компенсация динамических неидеальностей силовых ключей преобразователей энергии (задержек включения и выключения), обеспечивающая минимизацию влияния этих эффектов на характеристики электропривода, в особенности на малых скоростях и при высоких частотах модуляции;

в) режим повышенного энергосбережения, обеспечивающий минимизацию потребляемой приводом энергии при случайном характере изменения нагрузки;

г) режим торможения постоянным током, обеспечивающий фиксацию вала на нулевой скорости и эффективное торможение без отвода энергии в звено постоянного напряжения;

д) режим "самоподхвата" привода на заранее неизвестной скорости, реализующий автоматический поиск уровня скорости и плавное вхождение в работу при включении привода с вращающимся валом двигателя. Режим актуален, в частности, в электроприводах с большими моментами инерции при повторном включении в работу после кратковременного пропадания напряжения питания;

е) режим программирования и настройки электропривода с помощью персонального компьютера; режим позиционирования вала; возможность обновления программного обеспечения преобразователей самим пользователем без демонтажа оборудования;

ж) программные макросы, предназначенные для встраивания электропривода в специфические технологические процессы (управление многонасосной станцией, станции управления лифтами, управление механизмами с упругой механикой, управление натяжением намоточных механизмов, многосвязный, многодвигательный электропривод с согласованием по скорости, моменту или угловому положению и другие применения по спецификации заказчика);

з) режим предельной перегрузочной способности привода, позволяющий существенно повысить перегрузочную способность преобразователя по току в пределах того же типоразмера.

Серия ЭПВ включает в себя:

а) бездатчиковый асинхронный электропривод мощностью 3400 кВт, предназначенный для механизмов с диапазоном регулирования скорости до 50:1,

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

не предъявляющих повышенных требований к быстродействию и точности регулирования скорости (насосы, вентиляторы, подъемно-транспортные средства и другие общепромышленные механизмы);

б) преобразователи частоты мощностью 155 кВт с адаптивно-векторным управлением для высокоэффективных широкодиапазонных асинхронных и синхронных электроприводов, предназначенных для механизмов с повышенными требованиями к статическим и динамическим характеристикам (приводы главного движения и подачи металлорежущих станков с диапазоном регулирования скорости от 1000 до 100000 и полосой пропускания контура скорости до 100 Гц и более);

в) векторный асинхронный и синхронный электропривод без датчика на валу двигателя, обеспечивающий высокие динамические характеристики в диапазоне регулирования скорости 100:1. Предназначены для механизмов, предъявляющих повышенные требования к динамике, у которых вследствие технологических особенностей установка датчика на вал двигателя не предусматривается (экструдеры, дробилки и другие механизмы химической и горнорудной промышленности, тяговые электроприводы транспортных средств);

г) рекуперативный выпрямитель мощностью 1555 кВт с векторной системой управления, предназначенный для применения в преобразователях со звеном постоянного напряжения, реализующих функцию свободного двунаправленного обмена энергией между питающей сетью и нагрузкой с высокими энергетическими характеристиками и показателями электромагнитной совместимости. Характеризуется синусоидальным сетевым током и регулируемым коэффициентом мощности, который может устанавливаться равным единице, а также "опережающим" или "отстающим". Область применения — электропривод механизмов, значительное время работающих в тормозных режимах: подъемно-транспортные механизмы (краны, лифты и т.д.), станки, работающие в режимах частых циклов разгон/торможение, механизмы с большими моментами инерции.

В технической документации электроприводов серии ЭПВ приводятся и гарантируются такие важные для их применения характеристики, как диапазон регулирования и полоса пропускания частот контура скорости. Электроприводы комплектуются асинхронными и синхронными двигателями российских производителей, положительно зарекомендовавших себя на внутреннем и внешнем рынке.

Являясь чисто российской разработкой, преобразователи серии ЭПВ надежно работают в условиях существенных отклонений параметров качества питающего напряжения (форма, колебания, перекосы, импульсные помехи и прочее), не требуя при этом обязательной установки дополнительных дорогостоящих фильтров.

Однако там где эти фильтры действительно необходимы по условиям электромагнитной совместимости оборудования, например при большой длине соединительного кабеля между преобразователем и двигателем, электроприводы комплектуются фильтрами, специально разработанными НИЛ "Вектор" совместно

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

с ООО "ЭЛПРИ" для работы с преобразователями серий ЭПВ и АПЧ. Подбор фильтров осуществляется в зависимости от частоты модуляции, типа, длины и способа укладки кабеля при проектировании конкретных объектов.

## 1.2 Преобразователь частоты ProfiMaster

Специалистами НТЦ «Приводная Техника» совместно с разработчиками всемирно известной компании LS Industrial Systems, занимающейся системами промышленной автоматизации, был разработан новый модельный ряд преобразователей ProfiMaster (тип G540) для управления асинхронными электродвигателями, работающими в составе различного технологического оборудования, мощностью от 0,4 кВт до 22 кВт.

В классе маломощных компактных преобразователей частоты эта модель успешно соперничает с продукцией многих мировых лидеров. Её основные качества — простота в сочетании с высокой функциональностью, небольшие габариты и надёжность.

Особое внимание при разработке было уделено адаптации нового семейства приводов к российским условиям эксплуатации.

Кроме традиционной русификации дисплея были существенно доработаны защитные функции, и теперь общее количество защит достигло 36.

Особенности:

- а) векторное управление без датчика: номинальный момент на частоте 0,5 Гц;
- б) улучшенные защиты: защиты активны во время работы, а не только при старте;
- в) биполярное задание: с помощью биполярного аналогового сигнала можно задавать скорость и направление вращения.
- г) встроенный ПИД-регулятор обеспечивает поддержание технологического параметра по обратной связи;
- д) встроенный тормозной модуль обеспечивает эффективное торможение двигателя совместно с внешним резистором-гасителем;
- е) второй набор параметров для работы с двумя различными двигателями;
- ж) встроенный RS-485 интерфейс для работы преобразователя в информационных промышленных сетях;
- з) русификация: русифицированный пульт управления и документация на русском языке.

Основные функции

- а) диапазон мощностей 1~220В 0,4...1,5кВт; 3~380В 0,4...22 кВт;
- б) метод управления: U/F, U/F + компенсация скольжения, векторное управление без датчика;
- в) частота ШИМ: 1...15 кГц;
- г) класс защиты: IP20;
- д) RS-485, ModBus-RTU, ПИД-регулирование;
- е) высокий момент: 150% на 0,5 Гц;
- ж) 8 задаваемых фиксированных частот;

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

- з) 3 вырезаемые резонансные частоты;
- и) 2 аналоговых входа (задание 0..20 мА, 0..10 В, ±10 В) 8 многофункциональных программируемых входов;
- к) 2 многофункциональных программируемых выхода;
- л) 1 аналоговый выход (+10 В);
- м) пуск с подхватом вращающегося двигателя;
- н) ручное/автоматическое форсирование момента;
- о) программное обеспечение для мониторинга и управления.

### 1.3 Серия преобразователей частоты VFD-C от Delta Electronics

Delta Electronics - ведущий мировой производитель приводной техники, начинает выпуск новой высокорентабельной серии частотных преобразователей - VFD-C2000. Это частотно-регулируемые приводы с классическим векторным управлением (FOC), сочетающие в себе такие конкурентные преимущества, как высокую функциональность и характеристики управления с низкой стоимостью обслуживания и увеличенным сроком эксплуатации.

Серия VFD-C использует FOC-векторное управление в качестве базовой технологии управления двигателем, за счет чего достигаются беспрецедентно высокие характеристики привода, такие как пусковой момент, точность поддержания скорости и момента в широком диапазоне регулирования. Серия характеризуется наличием удобного операторского интерфейса, разнообразием плат расширения ввода/вывода и коммуникационных модулей, широким диапазоном мощностей, комплексной защитой, адаптацией к жестким окружающим условиям, увеличенным сроком службы, конкурентной ценой, простотой обслуживания, самодиагностикой и низкой частотой сбоев.

Отметим ряд особенностей, которые характерны для приводов серии VFD-C:

- а) усовершенствованное по отклику и управлению моментом бездатчиковое векторное управление (SVC);
- б) серия VFD-C2000 удовлетворяет стандартам безопасной остановки (EN954-1, EN60204-1 и IEC61508), предотвращая травмирование персонала от случайного запуска;
- в) оптимальный выбор для прецизионного управления скоростью и положением;
- г) стабильное управление скоростью на низких частотах, до 200% момента на нулевой скорости в режиме FOC+PG;
- д) при резких изменениях нагрузки VFD-C2000 обеспечит адекватное изменение момента, чтобы свести колебания скорости к минимуму, предотвращая, тем самым, вибрацию;
- е) помимо традиционного ПИ-регулятора в контуре скорости, в VFD-C используется PDFF-управление, которое устраняет перерегулирование и увеличение отклика системы;
- ж) Встроенный ПЛК позволяет адаптировать VFD-C для широкого круга задач

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

распределенного и автономного управления без применения внешних приборов (таймеров, счетчиков, реле, контроллеров и др.);

з) VFD-C2000 серия предлагает функцию 2-в-1 для прецизионного управления скоростью, моментом и положением как асинхронных, так и синхронных двигателей с постоянными магнитами;

и) модульный дизайн изделия в совокупности с большим количеством плат и модулей расширения позволяет изменять аппаратную конфигурацию системы под конкретное приложение и упрощает обслуживание оборудования.

Выводы по разделу один

Для сравнения представленных преобразователей частоты составим таблицу 1.1, в которую внесем их особенности и характеристики.

Таблица 1.1 — Сравнение векторных электроприводов

Сравнительная характеристика	серия ЭПВ	ProfiMaster	VDF-C от Delta Electronics
Технические характеристики	диапазон мощностей: 3...45 кВт; выходная частота: 0 - 400 Гц; Диапазон регулирования скорости 1:10000	диапазон мощностей: 3~380В 0,4...22 кВт; выходная частота: 0 - 400 Гц точность: 0,1 %	диапазон мощностей: 0,75...355 кВт; частота: 600,00 Гц, Точность поддержания частоты: ±0.01%
Адаптированность промышленной сети	Адаптирован к российским условиям	к Адаптирован к российским условиям	к Соответствие международным стандартам CE/UL/CUL.

Набор входных и выходных сигналов	и 4 изолированных аналоговых входа программируемых изолированных логических входов; 2 канала ЦАП; 2 изолированных ШИМ / ЧМ-выхода; разрядность 8 бит;	2 аналоговых входа (задание 0..20 мА, 0..10 В, ±10 В); 2 многофункциональных программируемых выхода; 1 аналоговый выход (+10 В);
-----------------------------------	---	--

Продолжение таблицы 1.1

Сравнительная характеристика	серия ЭПВ	ProfiMaster	VDF-C от Delta Electronics
Способ регулирования	U/F-регулирование, векторное регулирование скорости, компенсация скольжения	U/F-регулирование, векторное регулирование скорости, компенсация скольжения	FOC-векторное управление, бездатчиковое векторное управление (SVC)
Перегрузка	в течение 10 с - 200% при частоте выходного напряжения ниже 40 Гц	150 % от номинального тока в течение 1 мин.	от 110% номинального тока (1 мин), 130% номинального тока (3с)
Интеллектуальные режимы	режим адаптации к изменению параметров механической части привода, компенсация динамических неидеальностей силовых ключей, режим повышенного энергосбережения, режим "самоподхвата" привода на заранее неизвестной скорости, программные макросы, режим предельной перегрузочной способности привода.	Прямой/обратный пуск, Аварийный останов, Режим JOG, многоскоростное управление частотой многоскоростное управление разгоном/торможением (Высокое, среднее, низкое), торможение постоянным током, набор параметров для 2-го двигателя, Выбор частоты, проводное управления, сигнализация состояния преобразователя, блокировка ПИД, байпасный режим, удержание заданной частоты	Управление моментом, Пропуск частот, Переключение режимов управления скоростью/моме н-том, Переключение набора уставок разгон/торможение, S-кривая разгона/торможения, Автотестирование Компенсация скольжения и момента, Толчковый режим, Торможение при большом скольжении, PID регулирование (со спящим режимом).



Продолжение таблицы 1.1

Сравнительная характеристика	серия ЭПВ	ProfiMaster	VDF-C от Delta Electronics
Настройка	Автоматическое определение параметров подключенного двигателя и настройка регулятора управления двигателем.	ручное/автоматическое форсирование момента	4 точки V/F кривой, 2 вида зависимости мощности
Защитные функции	максимально-токовая защита от пропадания питания цепей управления; защита от программного обеспечения; защита недопустимого превышения понижения напряжения питающей сети; защита от аварии узла сброса энергии; защита от несоответствия скорости заданной ; температурная защита преобразователя и двигателя (при наличии встроенного датчика температуры); время-токовая защита двигателя.	Перенапряжение, пониженное напряжение, перегрузка, замыкание на землю, сбой преобразователя, перегрев двигателя, ток утечки на выходе, электронная защита от перегрузки, Внешние сбои, ошибка связи, потеря задания, сбой опций и др.	Защита мотора, защита от перегрузки, защита от перенапряжения, защита от перегрева, предотвращение остановок, повторный запуск после отключения сети, защита от утечки на корпус

Окончание таблицы 1.1

Сравнительная характеристика	серия ЭПВ	ProfiMaster	VDF-C от Delta Electronics
Интерфейсы	RS-232/485 и CAN при поддержке стандартных протоколов связи (MODBUS и CAN-Open) позволяет встраивать электроприводы локальные информационно-управляющие сети, АСУ ТП	RS-485, RTU, регулирование; многофункциональных программруемых входов; в многофункциональн ых программруемых выхода; 1 аналоговый выход (+10 В);	ModBus- ПИД- 8 net интерфейс, модули расширения для DeviceNet, 2 CANopen(DS40 2), PROFIBUS- DP, MODBUS TCP, EtherNet/IP;

Несмотря на явное преимущество зарубежных преобразователей серии VFD-CP2000, выраженное в более широком диапазоне регулирования, большем количестве функций, интерфейсов и возможностей, применение данной модели не является целесообразным, так как отсутствует сертификация Ростеста. Это означает, что характеристики в условиях российской промышленной сети могут быть ухудшены в процессе эксплуатации. Также, снижается надежность таких преобразователей, что в сумме с высокими затратами на ремонт и эксплуатацию ставит под сомнение выбор зарубежной модели.

Отечественные преобразователи серий ЭПВ и ProfiMaster обладают идентичным рядом функциональных возможностей, а главное, адаптированы к особенностям российской промышленной сети.

Сравнивая указанные варианты приходим к выбору преобразователей серии ЭПВ по следующим причинам:

- а) более широкий выбор мощностей
- б) возможность автоматической настройки регулятора по измеренным параметрам подключенного двигателя;
- в) расширенный набор возможностей программирования;
- г) режим «самоподхвата» и режим «плохой» сети;
- д) более высокая перегрузочная способность.

## 2 ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

### 2.1 Обрабатывающий центр ИР-500. Общие сведения, технические характеристики

Многоцелевой (многооперационный) станок — это станок для комплексной обработки заготовок с числовым программным управлением и автоматической сменой инструментов. Кроме многоцелевых, существуют и другие станки с ЧПУ с автоматической сменой режущих инструментов, которые не называют многооперационными.

Многооперационные станки отличаются особо высокой концентрацией обработки. На них производят черновую, получистовую и чистовую обработку сложных корпусных заготовок, содержащих десятки обрабатываемых поверхностей, выполняют самые разнообразные технологические переходы: фрезерование плоскостей, уступов, канавок, окон, колодцев; сверление, зенкерование, развертывание, растачивание гладких и ступенчатых отверстий; растачивание отверстий инструментами с тонким регулированием на размер; обработку наружных и внутренних поверхностей и др. Для осуществления этих операций на станке необходимо иметь большой запас металлорежущих инструментов. У станков с ЧПУ и автоматической сменой инструментов запас инструментов создается обычно в револьверных головках. Среди них фрезерные и сверлильные станки, предназначенные для изготовления главным образом таких корпусных и плоскостных деталей, для обработки которых достаточно иметь 5—10 различных инструментов. Многооперационные станки имеют инструментальные магазины с запасом в 15-30, а при необходимости в 50—100 и более инструментов.

Еще одна важная особенность большинства многооперационных станков — наличие поворотного стола или делительного приспособления с периодическим или непрерывным (по программе) делением. Это обязательное условие для обработки заготовки с нескольких сторон без переустановки. МС новых конструкций оснащают дополнительными столами и устройствами для автоматической смены заготовок. Заготовки предварительно закрепляют на столе-спутнике, и вместе с ним они попадают с дополнительного стола на основной. Установку заготовки в спутник и снятие обработанной детали производят во время работы станка. Таким образом, вспомогательное время, затрачиваемое на загрузку — разгрузку станка, сводится к минимуму.

Многооперационные станки имеют чаще всего контурную или универсальную систему управления, позволяющую обрабатывать разнообразные криволинейные поверхности, фрезеровать отверстия и т.д. МС отличаются широким диапазоном бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя (заготовки) и подач, высокими (8—12 м/мин) скоростями быстрых (вспомогательных) ходов, особо высокой жесткостью и надежностью.

В связи с высокой стоимостью многооперационных станков их используют для обработки наиболее технологически сложных заготовок.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

В этих случаях один многоцелевой станок может заменить три — пять станков с ЧПУ или пять — десять универсальных станков. ИР-500 многооперационный горизонтальный обрабатывающий центр - сверлильно-фрезерно-расточной станок с числовым программным управлением (ЧПУ), автоматической сменой инструмента (АСИ) и сменой обрабатываемых деталей предназначен для высокопроизводительной обработки корпусных деталей массой до 700 кг из конструкционных материалов от легких сплавов до высокопрочных сталей.

Общий вид и расположение основных узлов показано на рисунке 2.1

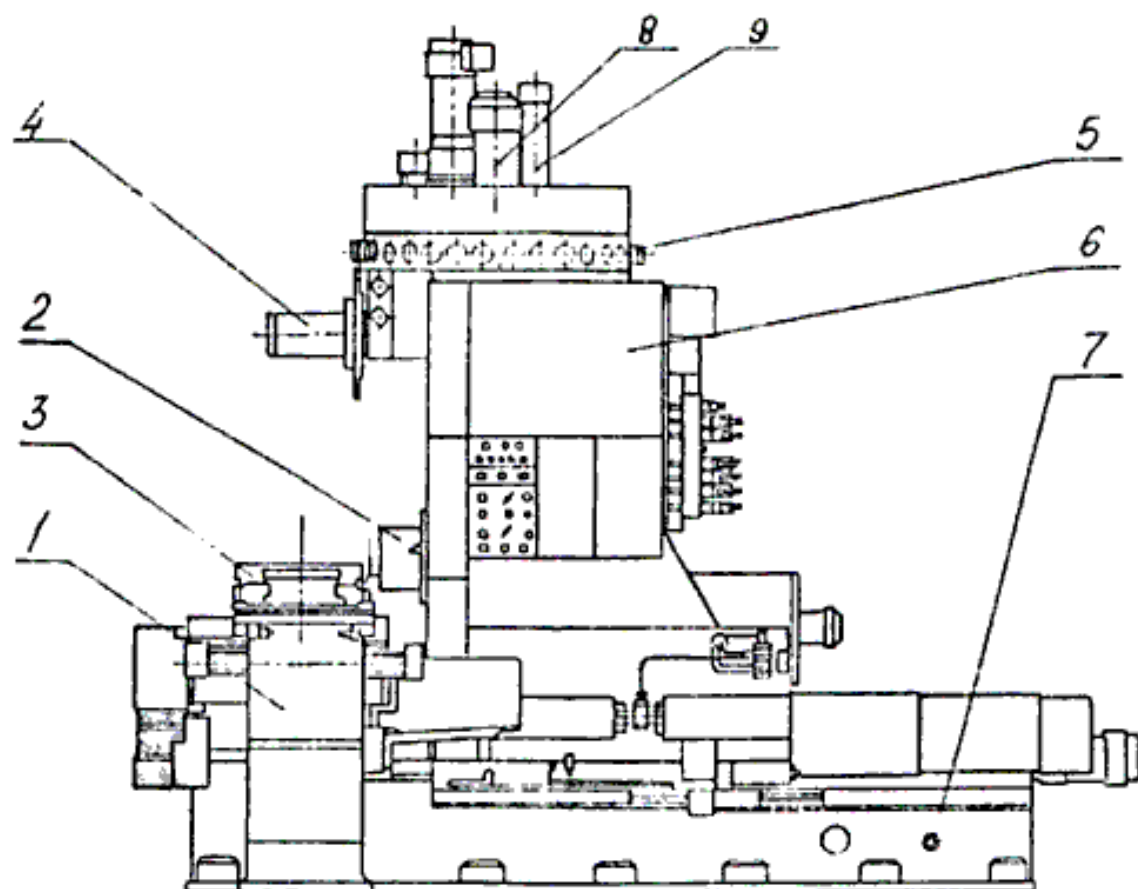


Рисунок 2.1 — Общий вид многоцелевого обрабатывающего центра ИР-500:  
 1 - Устройство автоматической смены столов-спутников ;  
 2- Шпиндельная бабка; 3 — Стол ; 4 - Манипулятор (автооператор);  
 5 - Инструментальный магазин ; 6 - Стойка — 500МФ4.301.001; 8 — Станина.

Широкий диапазон частоты вращения шпинделя и скоростей подач позволяет производить сверление, зенкерование, развертывание, растачивание точных отверстий, связанных координатами, фрезерование по контуру с линейной и круговой интерполяцией, нарезание резьбы метчиками.

Наличие поворотного стола, устанавливаемого с высокой точностью ( $\pm 5$  с через  $5^\circ$ ), расширяет технологические возможности станка, позволяет обрабатывать соосные отверстия консольным инструментом.

						140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			18

Повышенная степень точности станка (класс П) обеспечивает обработку отверстий по 7, 8 квалитетам точности с шероховатостью поверхности Ra 2,5 мкм.

Высокая степень автоматизации вспомогательных функций станка включает автоматическую смену инструмента и обрабатываемых деталей, позволяет встраивать его в автоматическую линию с управлением от ЭВМ.

Все узлы станка смонтированы на жесткой Т-образной станине, которая является общим основанием. Лобовая бес консольная шпиндельная бабка расположена внутри порталной стойки.

Устройство автоматической смены инструмента с инструментальным магазином барабанного типа монтируется на верхнем торце стойки. Все базовые детали имеют обребренную конструкцию и обеспечивают максимальную жесткость и виброустойчивость при высокопроизводительной обработке, гарантируют длительное сохранение точности.

Жесткий шпиндель с диаметром под передним подшипником 105 мм и конусом № 50 изготовлен из цементированной стали с высокой поверхностной твердостью (HRC 62). Шпиндель монтируется в отдельном корпусе на прецизионных роликовых и упорно-радиальном шариковом подшипниках, что обеспечивает оптимальную точность, жесткость и виброустойчивость.

Гидромеханическое устройство зажима инструмента в шпинделе гарантирует надежность и быстрдействие крепления режущего инструмента с усилием 1250 кг.

Привод шпинделя станка осуществляется двухступенчатой коробкой скоростей от электродвигателя постоянного тока мощностью 14 кВт. В диапазоне 21 — 174 об/мин на шпинделе обеспечивается постоянный момент, а в диапазоне 182...3000 об/мин — постоянная мощность. Автоматическая ориентация шпинделя с управлением от ЧПУ и механической фиксацией расширяет технологические возможности станка, позволяет производить целую серию технологических циклов, в которых необходимо отвести резец от рабочей поверхности, не повреждая изделие.

Перемещение подвижных узлов по осям X, Y, Z осуществляется от высокомоментных электродвигателей с постоянными магнитами, которые через упругие муфты высокой жесткости непосредственно соединены с прецизионными шариковыми винтовыми парами, обладающими нагрузочной способностью, жесткостью и долговечностью.

Силовое удержание узлов при резании осуществляется следящим приводом, что исключает необходимость применения зажимных устройств. Совершенные электроприводы подачи обеспечивают постоянное (до 0,2 с) время разгона и торможения, а, следовательно, и минимальное время обработки запрограммированных перемещений.

Позиционирование осуществляется одновременно по трем координатным осям X, Y, Z. В подвижных узлах станка применена система комбинированных направляющих, состоящих из прецизионных роликовых опор качения, установленных с предварительным натягом, и антифрикционного полимерного материала, обладающего низким коэффициентом трения и высокой

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

демпфирующей способностью, что гарантирует высокую точность позиционирования, устойчивость станка при резании на максимальных режимах обработки. Направляющие изготовлены из высококачественной закаленной стали и отшлифованы с высокой точностью и чистотой поверхности.

Телескопическая защита, установленная на всех координатных перемещениях, надежно защищает направляющие и шариковые винтовые пары от попадания стружки и смазочно-охлаждающей жидкости и обеспечивает длительное сохранение точности станка. Непосредственно шариковые винты и накладные направляющие снабжены специальными средствами для защиты их от попадания стружки и грязи.

Встроенный поворотный индексируемый стол перемещается по отдельной станине, которая крепится на общем основании (станине станка).

Поворотный стол имеет 72 позиции через  $5^\circ$ . Установка стола происходит в автоматическом режиме.

Применение в качестве индексирующего элемента специальной муфты с торцовыми зубьями в сочетании с гидравлическим устройством зажима стола гарантирует точность поворота и надежность фиксации.

Для установки и крепления деталей на поверхности плиты-спутника имеется сетка для резьбовых отверстий.

Устройство автоматической смены инструментов, расположенное вне рабочей зоны, состоит из вращающегося инструментального магазина барабанного типа с кодированными гнездами емкостью на 30 инструментов и манипулятора.

Выбор инструмента в любой последовательности с последующей гидромеханической фиксацией инструментального магазина осуществляется во время механической обработки.

Цикл смены инструмента происходит в следующем порядке:

Магазин поворачивается для поиска инструмента

1) манипулятор делает движение вверх, захватывает инструмент за оправку и, выдвигаясь вдоль оси, вытаскивает оправку из гнезда, затем перемещается вниз и назад вдоль оси;

2) шпиндельная бабка движется вверх в позицию смены инструмента, автооператор в конце хода захватывает отработавший инструмент;

3) происходит смена инструмента, для этого оператор совершает ход вперед, поворот на  $180^\circ$ , ход назад;

4) шпиндельная бабка опускается в рабочую позицию, а автооператор переносит отработавший инструмент в свое гнездо магазина;

5) автооператор опускается, чтобы не мешать повороту магазина при поиске следующего инструмента;

Так как основная часть перечисленных действий происходит во время обработки, то непосредственно на смену инструмента в шпинделе затрачивается 6 с. Кинематическая схема станка показана на рисунке 2.2.

Магазин получает вращение от высоко моментного электродвигателя М4 ( $N=2,8$  кВт,  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>) с возбуждением от постоянных магнитов через зубчатую пару.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

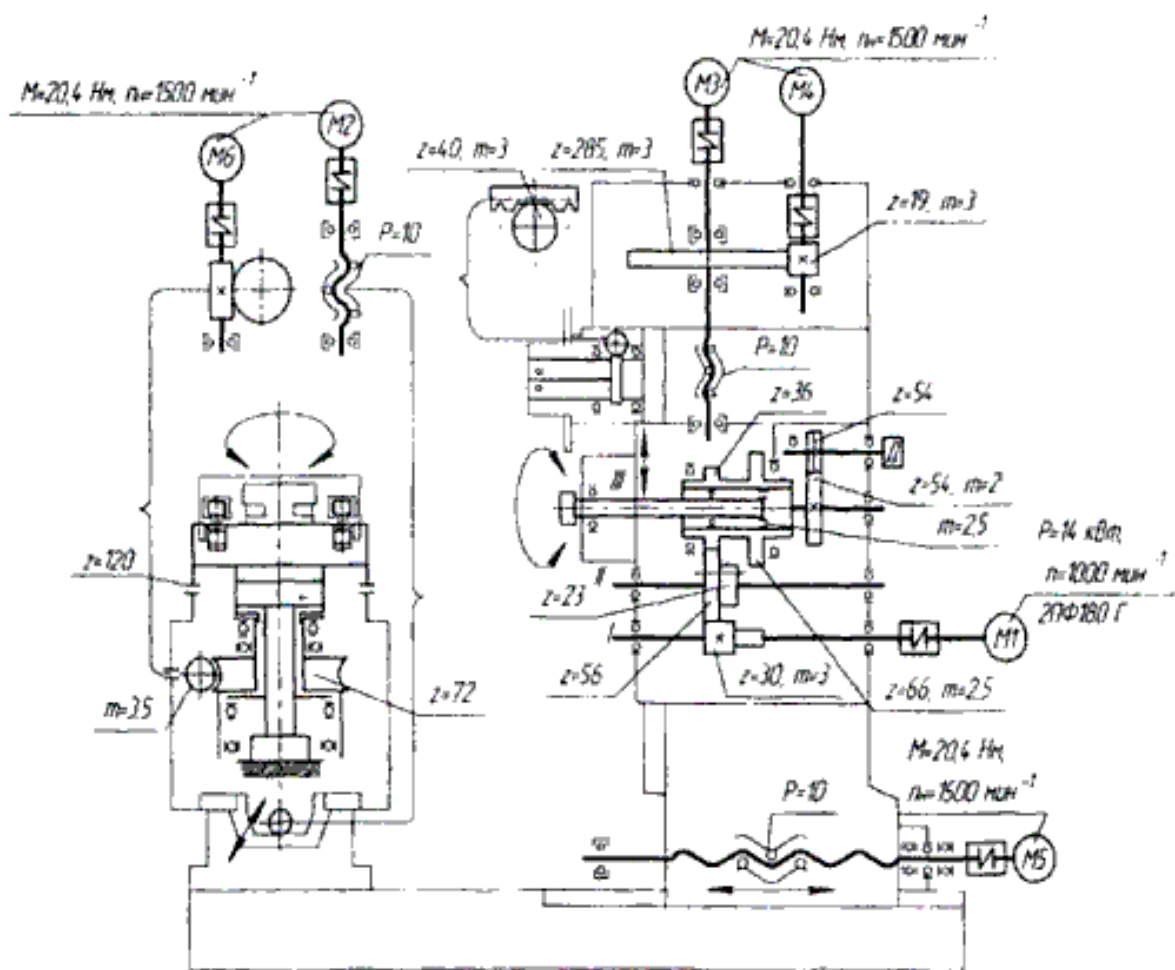


Рисунок 2.2 — Кинематическая схема станка модели IP500

Номера гнезд магазина закодированы; в корпусе магазина установлены упоры, воздействующие на конечные выключатели, осуществляющие отсчет поворота при поиске необходимого гнезда.

Двух захватный автооператор имеет механизмы поворота, вертикального перемещения и выдвижения, работающие от гидросистемы станка (соответствующие гидроцилиндры на схеме не показаны). Поворот происходит от реечной передачи  $m=3$  мм. Контроль крайних положений сборочных единиц и управление циклом автоматической смены инструментов осуществляется бесконтактными конечными выключателями.

Устройство смены стола-спутника. Автоматическая смена плит-спутников обеспечивает работу станков в автоматическом режиме, исключая из технологического цикла обработки время на установку и снятие деталей.

Накопитель столов-спутников. Отдельно стоящее гидромеханическое поворотное (на  $180^\circ$ ) устройство, установленное у станка справа, служит для загрузки-разгрузки, ориентации и фиксации плиты-спутника на поворотном столе станка.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

140400.2016.086.000 ПЗ

Лист

21

Работа гидравлических механизмов на станке обеспечивается аксиально-поршневым насосом переменной производительности с автоматическим регулированием расхода масла ( $Q_{\max}=46$  л/мин,  $P_{\max} = 60$  кг/см<sup>2</sup>), что гарантирует быстрое действие исполнительных органов (автоматической смены инструментов) и уменьшает нагрев рабочей жидкости.

Управление гидроцилиндрами всех рабочих органов вспомогательных движений производится при помощи блочной гидроаппаратуры.

В гидросистеме станка встроен гидроаккумулятор с эластичным мешком, что обеспечивает уравнивание шпиндельной бабки. Масло гидросистемы охлаждается в теплообменнике с воздушным охлаждением.

Пневмосистема станка предназначена для обдува воздухом конусов, шпинделя и инструмента, базовых платков поворотного стола и базовых поверхностей столов-спутников при их автоматической смене. Работа пневмосистемы осуществляется автоматически с управлением от системы ЧПУ переключением воздухораспределителей.

Смазка всех трущихся деталей станка и подшипников шпинделя — автоматическая централизованная дозированная от отдельной установки; шестерен и подшипников главного привода — непрерывная циркуляционная от отдельного насоса, расположенного в гидростанции.

В станке предусмотрены подача жидкой и распыленной смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания и сток в отдельно стоящий бак по сигналу с ЧПУ. Зона резания имеет ограждение для защиты оператора и окружающей среды от разбрызгивания эмульсии.

Устройство автоматической уборки стружки исключает затраты рабочего времени на уборку стружки вручную и облегчает условия труда рабочего-станочника.

Главное движение — вращение шпинделя с закрепленным в нем инструментом. Вращение шпинделя обеспечивается электродвигателем М1 постоянного тока типа 2ПФ-80Г мощностью 14 кВт (номинальная частота вращения 1000 об/мин, номинальное напряжение 220 В). Изменение частоты вращения шпинделя обеспечивается регулированием двигателя и двухступенчатой коробкой скоростей. Для переключения механических диапазонов служит подвижный блок зубчатых колес 23 — 56, который может входить в зацепление с шестернями  $z = 33$  или  $z = 66$ , закрепленными на общей ступице и связанными со шпинделем зубчатой муфтой, размещенной в отверстии ступицы. Подвижный блок может занимать два положения, соответствующие первому и второму диапазону. Блок перемещается гидроцилиндром и вилкой (на схеме не показаны). При включении первого механического диапазона возможно получение частоты вращения шпинделя в пределах 21,2 — 1000 об/мин при большом постоянном крутящем моменте 700 Нм. Второй диапазон обеспечивает частоту вращения шпинделя 1000 - 3150 об/мин при постоянной мощности 14 кВт. Изменение направления вращения достигается реверсированием электродвигателя.

Технические характеристики станка приведены в таблице 2.1

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22



Таблица 2.1 — Характеристики станка ИР-500

Наименование параметра	Значение
Основные параметры станка	
Класс точности по ГОСТ 8-82	П
Размеры рабочей поверхности стола (длина x ширина), мм	500 x 500
Перемещение поперечное стола (ось X), мм	800
Перемещение вертикальное шпиндельной бабки (ось Y), мм	500
Перемещение продольное стойки (ось Z), мм	500
Вращение индексированного поворотного стола (ось B), град	5° 72 поз.
Наибольший диаметр сверления в стали, мм	40
Наибольший диаметр растачиваемого отверстия, мм	160
Наибольший диаметр торцевой фрезы, мм	160
Точность позиционирования по осям X/ Y, мм	0.018/ 0.015
Точность позиционирования по осям Z, мм	0.022
Рабочая подача по осям X, Y, Z, мм/мин	1..2000
Скорость быстрых установочных перемещений по осям X, Y, Z, м/мин	8..10
Наибольшее допустимое усилие подачи стола и стойки по осям X, Z, Н	8000
Наибольшее допустимое усилие подачи шпиндельной бабки (вертикальное) по оси Y, Н	4000
Расстояние от оси шпинделя до стола, мм	50..550
Модель устройства ЧПУ	2C45-65
Количество управляемых координат	3
Количество одновременно управляемых координат при линейной/ круговой интерполяции	3/3
Рабочий стол	
Максимальная нагрузка на стол (по центру), кг	700
Количество резьбовых отверстий на поверхности стола	25
Диаметр резьбовых отверстий на поверхности стола, мм	M20
Усилие зажима поворотного стола, кН	40
Шпиндель	
Частота вращения шпинделя, об/мин	21.2..3000
Количество скоростей шпинделя	89
Наибольший крутящий момент, Нм	700
Конус шпинделя для крепления инструмента 7:24	50
Магазин инструмента	
Количество инструмента в магазине	30
Время смены инструмента, с	6
Время смены инструмента от стружки к стружке, с	16,2..21,2
Максимальный диаметр рядом стоящего инструмента, мм	125
Максимальный диаметр свободно стоящего инструмента, мм	160
Максимальная длина инструмента от торца шпинделя, мм	300
Масса инструментальной оправки с инструментом, кг	20

## Окончание таблицы 2.1

Наименование параметра	Значение
Устройство смены столов-спутников	
Время смены столов-спутников, с	45
Электрооборудование и привод	
Количество электродвигателей на станке	12
Электродвигатель постоянного тока привода главного движения, кВт	14
Электродвигатели привода подач (X, Y, Z, B) и магазина, кВт	2,8
Электродвигатель насоса гидростанции, кВт	5,5
Электродвигатель вентилятора гидростанции, кВт	0,12
Электродвигатель вентилятора шпинделя, кВт	0,12
Электродвигатель насоса смазки шпиндельной бабки, кВт	1,1
Электродвигатель насоса смазки направляющих, кВт	0,02
Электронасос охлаждающей жидкости Мощность, кВт	0,12
Суммарная мощность всех электродвигателей на станке, кВт	35
Габариты и масса станка	
Габариты станка (длина ширина), мм	4450 x 4655

## 2.2 Постановка задачи

В ходе анализа существующего электропривода обрабатывающего центра ИР-500 было принято решение о модернизации главного привода с заменой двигателя постоянного тока на обычный асинхронный двигатель переменного тока с частотным регулированием.

Областью применения данного решения является:

- модернизация промышленных приводов постоянного тока широкого назначения;
- замена приводов постоянного тока на асинхронные двигатели с частотным регулированием.

Преимуществами решения являются:

- повышение надежности привода главного движения обрабатывающего центра за счет применения надежных асинхронных двигателей;
- снижение стоимости привода;
- экономия электроэнергии.

Особенности:

- предлагаемая методика модернизации привода обрабатывающего центра не требует создания уникальных образцов нового оборудования, а использует только серийно выпускаемые компоненты;

- применение цифровых, программируемых частотных приводов позволяет расширить функциональность технологического оборудования и снизить затраты на перенастройку станка.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

В качестве частотного привода используется оборудование с алгоритмом векторного управления и датчиком обратной связи. В качестве двигателя используется серийно выпускаемый асинхронный привод, оборудованный независимым охлаждением.

Модернизация заключается в замене дорогостоящих двигателей постоянного тока на доступные и широко распространенные асинхронные двигатели переменного тока, работающие под управлением частотных преобразователей. Опытная эксплуатация станка показала полное соответствие асинхронного двигателя, оборудованного частотным преобразователем требованиям, предъявляемым к регулируемому приводу главного движения. Модернизация привода главного движения проводится с учетом следующих требований:

- а) органы управления станком не должны измениться;
- б) время простоя станка в период пуско-наладочных работ должно быть минимальным;
- в) замена привода постоянного тока на частотный преобразователь должен осуществляться с минимальными монтажными работами.

В результате представлено универсальное и в то же время эффективное решение, позволяющее в рекордно короткие сроки осуществлять восстановление работоспособности станочного оборудования путем замены вышедших из строя приводов постоянного тока на частотные привода переменного тока. Причем стоимость всей работы, включая материалы, конкурирует с приобретением соответствующего двигателя постоянного тока. Использование в станочном оборудовании асинхронных двигателей управляемых частотными преобразователями в качестве регулируемого привода имеет ряд важных преимуществ:

а) асинхронный двигатель существенно надежней двигателя постоянного тока, так как он не имеет щеточного аппарата, его корпус имеет степень защиты IP-55, что позволяет свести к минимуму его техническое обслуживание. А простота конструкции асинхронного двигателя позволяет проводить техническое обслуживание в любой ремонтной службе предприятия;

б) асинхронные двигатели являются самыми распространенными электрическими машинами, что позволяет в случае необходимости, оперативно его заменить.

в) стоимость асинхронного двигателя в пять раз меньше соответствующего двигателя постоянного тока.

г) преобразователь частоты является полностью программируемым устройством, поэтому в процессе пуско-наладочных работ нет необходимости использовать дополнительное измерительное оборудование, что позволяет существенно сократить сроки модернизации приводов станочного оборудования.

Преобразователь частоты не требует периодической подстройки параметров рабочего режима, в связи с отсутствием аналоговых подстроечных элементов. Преобразователь частоты имеет функции, позволяющие оптимально настроить работу асинхронного двигателя, тем самым повышается КПД привода, что приводит к снижению энергопотребления.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

### 2.3 Определение мощности электродвигателя

Для выбора мощности двигателя задаемся рабочим моментом нагрузки  $M_n$ , моментом инерции нагрузки  $J_n$ , рабочими скоростями, требуемым временем разгона  $t_p$  и торможения  $t_t$  [4].

Рабочий момент определяет силовую работу привода на постоянной скорости (установившийся режим). Инерция нагрузки, величина рабочей скорости и требуемое время разгона-торможения определяют динамику привода.

Значение рабочего момента и рабочей скорости позволяет сделать предварительный выбор привода по мощности:  $M_{ном} > M_n$ .

Момент двигателя определяется следующей формулой:

$$M_{ном} = \frac{9554 P_{ном}}{N_{ном}}, \quad (2.1)$$

где  $M_{ном}$  – номинальный момент двигателя, Нм;

$P_{ном}$  – мощность двигателя, кВт;

$N_{ном}$  – номинальные обороты двигателя, об/мин.

Момент нагрузки, приведенный к валу двигателя с учетом редукции:

$$M_{ном.н} = \frac{M_n}{\eta \cdot i}, \quad (2.2)$$

где  $M_{ном.н}$  – момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, Нм;

$M_n$  – момент нагрузки,  $M_n=45,3$  Нм;

$i$  – коэффициент редукции (принимается значение без редуктора)  $i=1$ ;

$\eta$  – КПД редуктора,  $\eta = 1$ .

$$M_{ном.н} = \frac{45,3}{1 \cdot 1} = 45,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

На основе заданного момента и необходимого числа оборотов выбираем мощность двигателя:

$$P_{ном} = \frac{M_{ном.н} \cdot N_{ном}}{9554} = \frac{45,3 \cdot 2910}{9554} = 14,2 \text{ кВт}. \quad (2.3)$$

Момент инерции, приведенный к валу двигателя с учетом редукции:

$$J_{ном.н} = \frac{J_n}{i^2}, \quad (2.4)$$

где  $J_{ном.н}$  – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя, кгм<sup>2</sup>;

$J_n$  – момент инерции нагрузки,  $J_n=0,56$  кгм<sup>2</sup>.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Таким образом:

$$J_{\text{ном.н}} = \frac{0,56}{1^2} = 0,56 \text{ кгм}^2 .$$

По полученному значению мощности выбираем асинхронный двигатель марки 4AM160S2 с синхронной частотой вращения 3000 об/мин.

Характеристики двигателя представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Характеристики асинхронного двигателя 4AM160S2

Параметр	Значение
Мощность, кВт	15
Номинальная частота вращения, об/мин	2910
КПД, %	88
Коэффициент мощности	0,91
Максимальный момент $M_{\text{макс}}$ , Нм	132,9
Пусковой момент $M_{\text{п}}$ , Нм	78,79
Номинальный момент, $M_{\text{ном}}$ , Нм	49
Пусковой ток $I_{\text{п}}$ , А	276,3

#### 2.4 Проверка выбранного двигателя по перегрузочной способности привода

В режимах разгона и торможения нагрузку приводе создают динамический момент нагрузки  $M_{\text{дин}}$  и статический момент  $M_{\text{ст}}$ , действующий в период разгона. Таким образом, в некоторых случаях статическим моментом в период разгона можно пренебречь (небольшой момент трения) [5], а в некоторых случаях его необходимо учитывать (где этот момент достаточно существенный).

Динамический момент нагрузки в период разгона определяется формулой:

$$M_{\text{дин}} = \frac{2\pi \cdot J_{\text{ном.н}} \cdot \Delta n}{60 \cdot t_c} \quad (2.5)$$

где  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент нагрузки, Нм;

$t_c$  – время изменения скорости, сек;

$\Delta n$  – диапазон изменения скорости, об/мин.

$J_{\text{ном.н}}$  – момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя,  $\text{кгм}^2$ .

$$M_{\text{дин}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,56 \cdot 2910}{60 \cdot 2,5} = 68,2 \text{ Нм.}$$

Момент двигателя на участке разбега:

$$M_p = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}} = 45,3 + 68,2 = 113,5 \text{ Нм.} \quad (2.6)$$

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Момент двигателя на участке торможения:

$$M_T = M_{ст} + M_{дин} = 45,3 - 68,2 = -22,9 \text{ Нм.} \quad (2.7)$$

Эффективный момент нагрузки рассчитываем с учетом, что время установившегося режима равно  $t_1 = 300$  с (среднее время обработки поверхности), а момент установившегося режима принимается равным моменту статическому:

$$M_{эф} = \sqrt{\frac{M_p^2 t_p + M_{уст1}^2 t_1 + M_T^2 t_T}{t_p + t_1 + t_T}} \quad (2.8)$$

Подставив значения в формулу (2.7), получим:

$$M_{эф} = \frac{\sqrt{68,2^2 \cdot 2,5 + 45,3^2 \cdot 300 + 22,9^2 \cdot 2,5}}{2,5 + 300 + 2,5} = 47,14 \text{ Нм}$$

Определяем номинальный момент двигателя по формуле (2.1):

$$M_{ном.дв} = \frac{9554 P_{ном}}{N_{ном}} = \frac{9554 \cdot 15}{2910} = 49,25 \text{ Нм.}$$

Производим уточненный выбор двигателя по условию:

$$M_{н.дв} \geq M_{эф}$$

В нашем случае  $49,25 \geq 47,14$  Нм.

Условие выполняется, то есть двигатель соответствует требованиям по перегрузке и условиям пуска.

## 2.5 Динамический расчет привода

Производим динамический расчет выбранного электрического привода.

Расчет времени разгона привода:

$$t_{раз} = \frac{J_{инвн} \cdot (N_{max} - N_{мин})}{9,55(K \cdot M_n - M_{ст})} \quad (2.9)$$

Получим:

$$t_{раз} = \frac{0,56 \cdot (2910 - 0)}{9,55(1,3 \cdot 49,25 - 45,3)} = 0,4 \text{ с}$$

Время разгона удовлетворяет заданию:  $t_{раз} < t_{зад} + 0,4 \text{ сек} < 2,5 \text{ сек}$ .

Рассчитываем привод для режима торможения с тормозным резистором:

Заданное время торможения  $t_T = 2,5$  сек, тогда тормозной момент для замедления привода за  $t_T = 2,5$  сек:

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

$$M_T = \frac{J_{\text{мом.и}} \cdot (N_{\text{max}} - N_{\text{min}})}{9,55 \cdot t_T} = \frac{0,56 \cdot 2910}{9,55 \cdot 2,5} = 68,25 \text{ Нм.} \quad (2.10)$$

Пиковая тормозная мощность, обеспечивающая необходимый тормозной момент:

$$P_{\text{пик.т}} = \frac{M_T \cdot N_{\text{max}}}{9,55} = \frac{68,25 \cdot 2910}{9,55} = 20796 \text{ Вт} = 21 \text{ кВт.} \quad (2.11)$$

Пиковая тормозная мощность тормозного резистора должна быть:  $P_{\text{пик.т.р.}} \geq 21$  кВт. При этом, допустимое сопротивление тормозного резистора:

$$R_{\text{т.р}} = \frac{380 \text{ В}}{I_n} = \frac{380}{40} = 9,5 \text{ Ом,} \quad (2.12)$$

где  $I_n$  = номинальный ток инвертора.

Выводы по разделу два

В ходе работы над разделом с целью выявления возможностей модернизации были рассмотрены характеристики, особенности работы и кинематическая схема обрабатывающего центра ИР-500. Были поставлены цели модернизации и определены задачи, необходимые для решения вопроса замены установленного привода на частотно-регулируемый.

Преимуществом модернизированного привода являются:

а) асинхронный двигатель существенно надежней двигателя постоянного тока, так как он не имеет щеточного аппарата, его корпус имеет степень защиты IP-55, что позволяет свести к минимуму его техническое обслуживание. А простота конструкции асинхронного двигателя позволяет проводить техническое обслуживание в любой ремонтной службе предприятия;

б) асинхронные двигатели являются самыми распространенными электрическими машинами, что позволяет в случае необходимости, оперативно его заменить.

в) стоимость асинхронного двигателя в пять раз меньше соответствующего двигателя постоянного тока.

г) преобразователь частоты является полностью программируемым устройством, поэтому в процессе пуско-наладочных работ нет необходимости использовать дополнительное измерительное оборудование, что позволяет существенно сократить сроки модернизации приводов станочного оборудования. Таким образом, работы по модернизации являются целесообразными и позволяют расширить функциональные возможности обрабатывающего центра, повысить показатели энергоэффективности, снизить затраты на ремонт и эксплуатацию привода, обеспечить контроль, диагностику, настройку и программирование различных режимов работы станка.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

### 3 СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

#### 3.1 Выбор варианта СУЭП с частотным регулированием

В зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу, применяют разнообразные СУЭП, от простейших разомкнутых до очень сложных, реализация которых возможна только с применением специализированных вычислительных устройств на базе средств микропроцессорной техники.

Системы частотного управления асинхронных электроприводов делят на скалярные и векторные. При скалярном управлении совместно регулируют частоту и величину напряжения или тока статорных обмоток асинхронного двигателя. Соответственно различают частотное управление при питании двигателя от инвертора напряжения и частотно-токовое управление – при питании статорных обмоток АД от инвертора тока.

Достоинство систем скалярного управления – простота реализации как разомкнутых, так и замкнутых СУЭП. недостаток – трудность формирования желаемых законов изменения угловой скорости и момента в переходных режимах.

В системах векторного управления воздействуют непосредственно на вращающий момент двигателя путем изменения амплитудных значений токов и потокосцеплений, а также угловых сдвигов между ними. Питание электродвигателя при этом может осуществляться, как и в системах скалярного управления, от инвертора напряжения или инвертора тока.

Векторное управление требует измерения величины и пространственного положения вектора потокосцепления статора или ротора, непосредственно, с помощью соответствующих датчиков, или косвенно - с использованием математической модели АД.

Системы с косвенным векторным управлением являются более простыми по технической реализации, но уступают системам с прямым векторным управлением по статическим и динамическим показателям.

Рассмотрим вначале несколько примеров систем скалярного частотного управления [6].

Учитывая, что при частотном регулировании механические характеристики АД  $\Omega = f(M)$  на рабочих участках жесткие (двигатель обладает достаточным саморегулированием), широко применяют СУЭП без обратной связи по скорости. Один из распространенных вариантов таких систем приведен на рисунке 3.1

Электродвигатель М получает питание от трехфазной сети переменного тока через управляемый выпрямитель УВ, L–С сглаживающий фильтр и автономный инвертор напряжения АИН, которые в совокупности образуют преобразователь частоты ПЧ с явно выраженным звеном постоянного тока.

Для поддержания нормального намагничивания двигателя и перегрузочной способности во всем диапазоне скоростей необходимо одновременно с изменением выходной частоты АИН по определенному закону изменять выходное напряжение УВ.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30



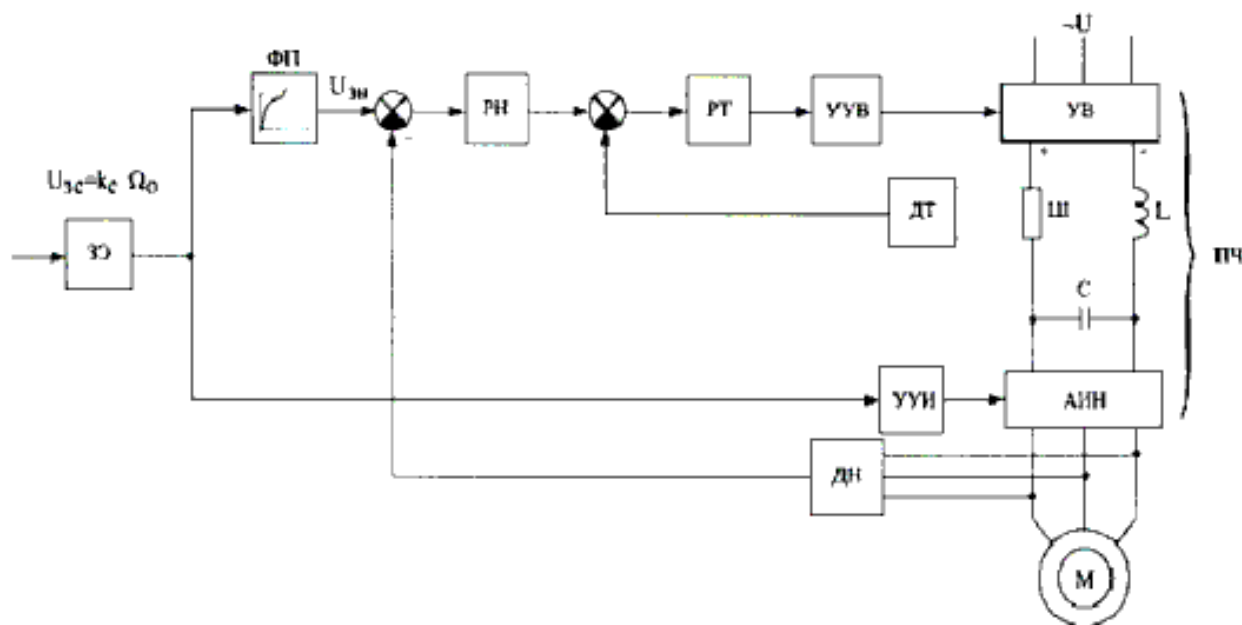


Рисунок 3.1 — Функциональная схема системы частотного регулирования АД с функциональным преобразователем

Для достижения этого напряжение с задающего элемента ЗЭ поступает непосредственно на вход устройства управления инвертором УУИ, а на вход регулятора напряжения РН через нелинейный функциональный преобразователь ФП с требуемой зависимостью задающего напряжения  $U_{zc}$  от скорости  $\Omega$ .

Стабилизация напряжения на двигателе осуществляется двухконтурной системой подчиненного регулирования с внутренним контуром регулирования выпрямленного тока (регулятор тока РТ) и внешним контуром регулирования напряжения. Сигналы обратной связи по току и напряжению формируются соответствующими датчиками тока ДТ и напряжения ДН. Выходной сигнал РТ поступает на устройство управления выпрямителем УУВ, выполненное по принципу импульсно-фазового регулирования.

Регуляторы тока и напряжения выполняются на операционных усилителях, как и в СУЭП постоянного тока.

В рассматриваемой системе наибольшей электромагнитной инерционностью обладает сглаживающий фильтр, что позволяет пренебречь электромагнитными переходными процессами в АД. С учетом этого, выбор оптимальных параметров регуляторов тока и напряжения осуществляется так же, как и в двухконтурных СУЭП постоянного тока. Для повышения точности регулирования в статике обычно оба регулятора выполняют пропорционально-интегральными.

Функциональная схема СУЭП приведена на рисунке 3.2.

Отрицательная обратная связь по скорости повышает жесткость механических характеристик привода и как следствие точность поддержания заданной скорости на промежуточных характеристиках. Обратная связь по ЭДС статора обеспечивает простыми средствами стабилизацию магнитного потока двигателя в широком диапазоне изменения скорости.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

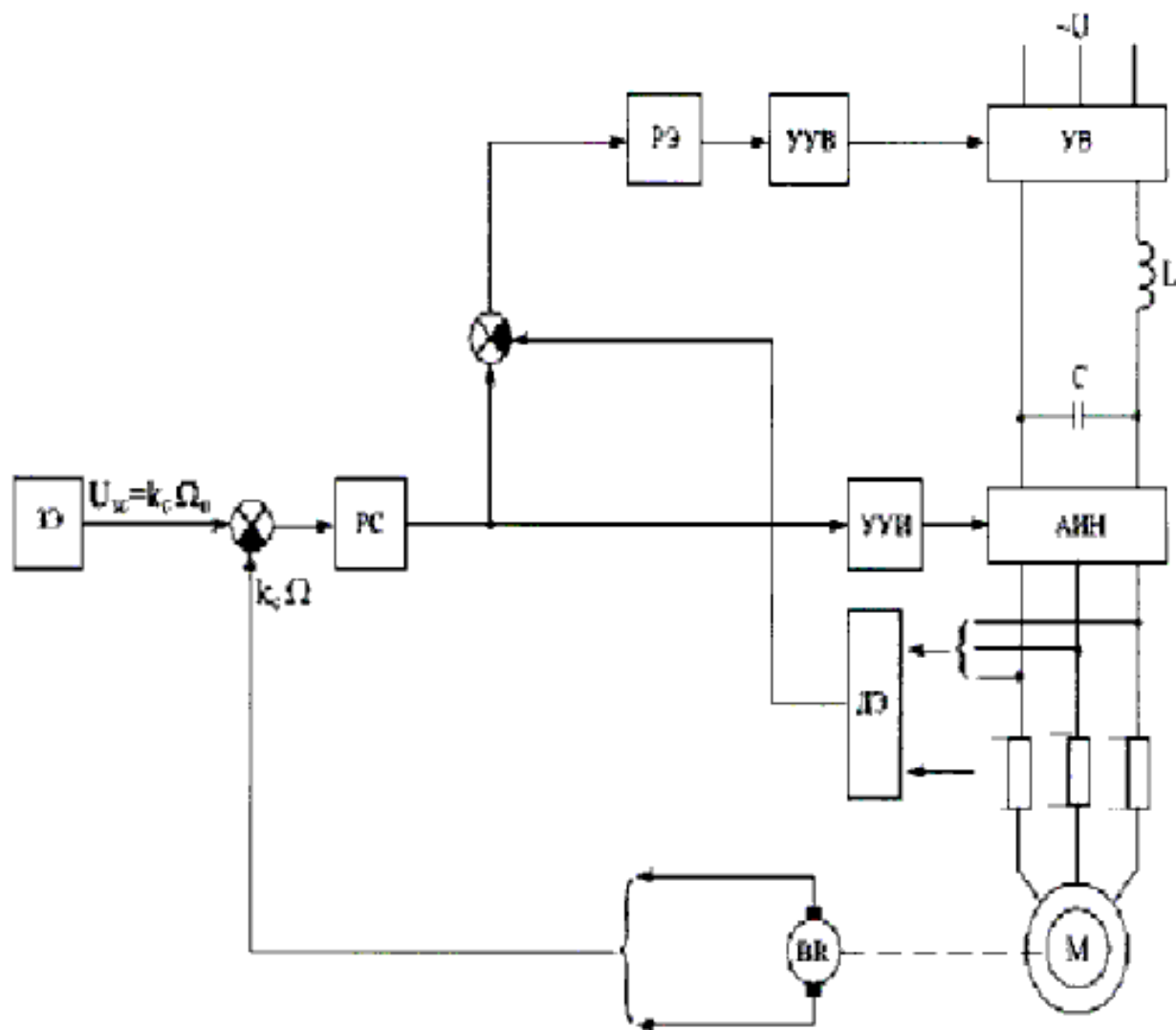


Рисунок 3.2 — Функциональная схема системы частотного регулирования с обратными связями по скорости и ЭДС статора

Система двухконтурная с подчиненным регулированием. Выходной сигнал регулятора скорости РС поступает на устройство управления инвертором УУИ и одновременно является задающим для регулятора ЭДС РЭ, на второй вход которого поступает сигнал от датчика ЭДС ДЭ. Сигнал, пропорциональный ЭДС статора, получают вычитанием из напряжения на зажимах статора падения напряжения на активных сопротивлениях статорных обмоток. ДЭ включает в себя трансформатор напряжения, выпрямитель, усилитель с гальванической развязкой в канале измерения токов, сумматор и фильтр.

Оптимизация контуров регулирования скорости и ЭДС может быть выполнена, как и в предыдущей системе, по аналогии с двухконтурным СУЭП постоянного тока. Функциональная схема СУЭП приведена на рисунке 3.3.

Электродвигатель М получает питание от преобразователя частоты ПЧ с автономным инвертором тока АИТ. Управляемый выпрямитель УВ с контуром регулирования тока образует при этом источник тока. Управление двигателем производится путем задания тока статора и частоты АИТ.

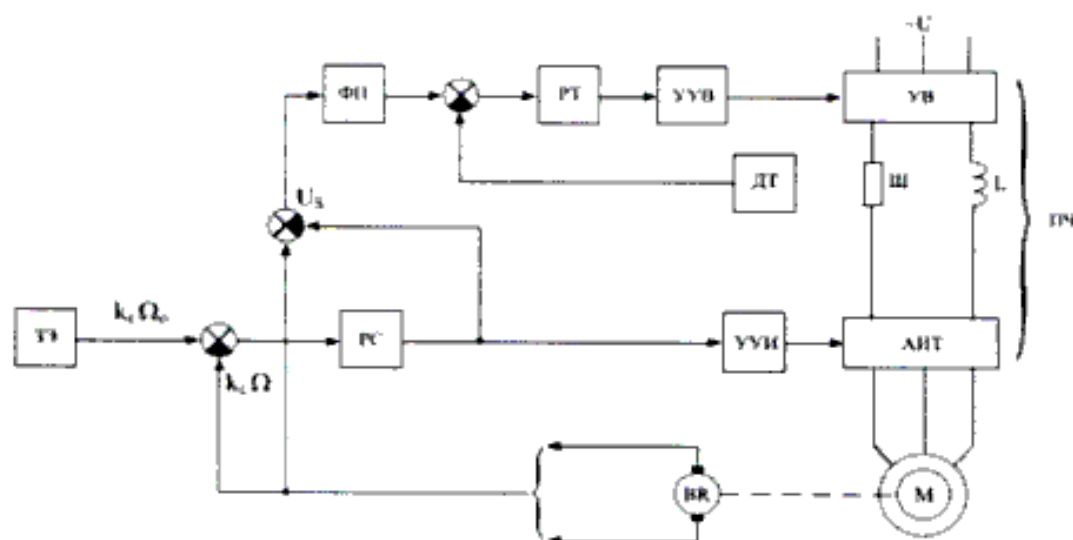


Рисунок 3.3 — Система частотно-токового управления асинхронным приводом

Система управления двухконтурная. Контур регулирования скорости, включающий регулятор скорости PC, датчик скорости BR (тахогенератор постоянного тока) и устройство управления инвертором УУИ, обеспечивает требуемую жесткость механических характеристик привода.

Внутренний контур регулирования тока обеспечивает стабилизацию тока на входе инвертора, а значит и двигателя М.

Для стабилизации магнитного потока статора величина тока двигателя должна изменяться по определенному закону в зависимости от скольжения (3.1)

$$s = \frac{(\Omega_c - \Omega)}{(\Omega_c)}; I_1 = f(s). \quad (3.1)$$

где  $I_1$  — ток статора;

$\Omega$  - угловая скорость магнитного поля, создаваемого статорными обмотками двигателя.

Для реализации этой зависимости в цепь регулирования тока введен нелинейный функциональный преобразователь ФП, на вход которого поступает разностный сигнал  $U_s$  между выходными сигналами регулятора скорости PC и датчика скорости BR, пропорциональный скольжению S.

### 3.2 Синтез структурной схемы частотного регулятора скорости

Современные системы векторного частотного управления электроприводами переменного тока выполняют на основе рассмотренной в [7] математической модели обобщенной двухфазной электрической машины. Обычно используют наиболее простую модель с осями координат u, v, вращающимися в пространстве с постоянной угловой скоростью  $\Omega_k$ .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Уравнения (3.2...3.8) в этом случае для АД с короткозамкнутым ротором приводятся к следующему виду:

$$i_{su} \perp R_s + \frac{d\Psi_{su}}{dt} - \Omega_k \Psi_{sv} = U_{su} \quad (3.2)$$

$$i_{sv} \perp R_s + \frac{d\Psi_{sv}}{dt} + \Omega_k \Psi_{su} = U_{sv} \quad (3.3)$$

$$i_{ru} \perp R_r + \frac{d\Psi_{ru}}{dt} - (\Omega_k - p_n \Omega) \Psi_{rv} = 0 \quad (3.4)$$

$$i_{rv} \perp R_r + \frac{d\Psi_{rv}}{dt} - (\Omega_k - p_n \Omega) \Psi_{ru} = 0 \quad (3.5)$$

$$M = p_n (\Psi_{sv} i_{ru} - \Psi_{ru} i_{sv}) \quad (3.6)$$

где  $u, v$  – вращающиеся оси координат;

$i_{su}, i_{sv}$  – проекции тока статора на координатные оси  $u$  и  $v$ ;

$i_{ru}, i_{rv}$  – проекции тока ротора на вращающиеся оси  $u$  и  $v$ ;

$p_n$  – число пар полюсов;

$\Psi_{su}, \Psi_{sv}$  – проекции потокосцепления обмотки статора на оси  $u$  и  $v$ ;

$\Psi_{ru}, \Psi_{rv}$  – проекции потокосцепления обмотки ротора на оси  $u$  и  $v$ ;

$\Omega_k$  – угловая скорость вращения осей  $u$  и  $v$ ;

$\Omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$M$  – момент на валу двигателя.

При этом, величины потокосцепления вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Psi_{su} &= L_s i_{su} + L_{sv} i_{rv} \\ \Psi_{sv} &= L_s i_{sv} + L_{sv} i_{ru} \\ \Psi_{ru} &= L_r i_{ru} + L_{sv} i_{sv} \\ \Psi_{rv} &= L_r i_{rv} + L_{sv} i_{su} \end{aligned} \quad (3.7)$$

В уравнениях (3.7) учтено, что взаимные индуктивности между двумя обмотками статора равны нулю, так как оси обмоток взаимно перпендикулярны, и поэтому магнитная связь между ними отсутствует. То же самое справедливо для двух обмоток ротора. В уравнениях (3.2-3.6) проекции переменных на координатные оси можно рассматривать, как проекции некоторых векторов, вращающихся в пространстве. При выборе скорости вращения осей координат  $\Omega_k$ , равной скорости вращения вектора, представляющего в модели определенную переменную, проекции этого вектора на оси координат будут постоянными величинами. В результате существенно упрощается математическая модель АД.

Но при синтезе СУЭП с частотным регулированием важно упростить не только модель управляемого объекта, но и устройство управления. Для этого дополнительно ориентируют вращающуюся систему координат  $\Omega_k$  так, чтобы

направление одной из осей, например  $u$ , совпадало по направлению с вектором выбранной переменной.

В этом случае проекция вектора на эту ось будет равна постоянной величине, равной амплитудному значению переменной, а проекция на вторую ортогональную ось будет равна нулю.

В общих чертах система векторного управления реализована следующим образом:

1) измеряются фактические мгновенные значения некоторых переменных (токов, напряжений, потокосцеплений) реальной асинхронной машины;

2) с помощью специализированных вычислительных устройств они пересчитываются к соответствующим переменным обобщенной двухфазной машины с выбранной системой координат. Преобразованные переменные оказываются при этом сигналами постоянного тока;

3) текущие значения преобразованных переменных в устройстве управления сравниваются с заданными значениями;

4) по результатам сравнения соответствующими регуляторами вырабатываются расчетные управляющие воздействия в виде электрических сигналов постоянного тока;

5) полученные воздействия с помощью специализированных вычислительных устройств преобразуются в управляющие воздействия на реальный трехфазный преобразователь частоты. При этом узлы СУЭП, реализующие функции 3 и 4, выполняются точно так же, как и в системах управления электроприводов постоянного тока.

Сравнительными исследованиями [8,9] показано, что применительно к частотному управлению АД с короткозамкнутым ротором предпочтительными являются системы векторного управления с ориентацией координат по направлению векторов результирующего потокосцепления статора  $\Psi_s$  или ротора  $\Psi_r$ .

На рисунке 3.4 представлена структурная схема электропривода. На данной структурной схеме электропривода показаны основные программно-реализованные блоки с параметрами, доступными для просмотра и редактирования с помощью пульта ручного управления или по каналу связи с внешним управляющим устройством.

Структура, параметры и алгоритмы работы регуляторов системы управления синтезированы на основе принципов частотного управления и векторной ориентации переменных с учетом дискретного характера процессов.

В структуре системы управления предусмотрен программируемый технологический регулятор для построения внешнего контура регулирования какой-либо технологической переменной без использования внешнего контроллера. Регулятор реализован в виде пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) звена с элементами ограничения. При выключении технологического регулятора привод обрабатывает задание по скорости. Параметрами  $K_p$  тр,  $K_i$  тр,  $K_d$  тр,  $\uparrow TP$  max,  $\downarrow TP$  max выполняется программная настройка на объект регулирования.

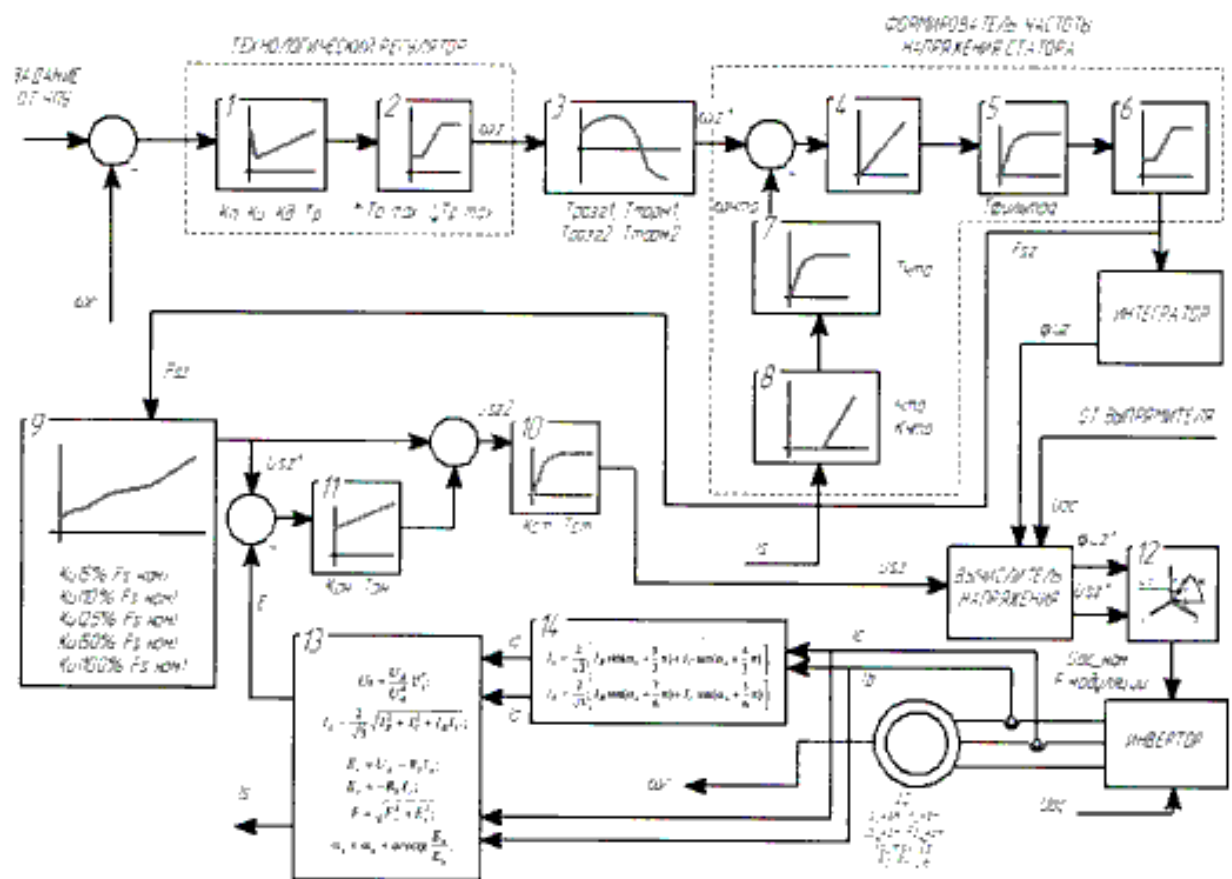


Рисунок 3.4 — Структурная схема электропривода

- 1 - ПИД-регулятор скорости; 2 - Ограничитель скорости; 3 - Задатчик интенсивности; 4 - Вычислитель частоты; 5 - Фильтр частоты; 6 - Ограничитель частоты; 7 - Фильтр частотного токоограничения; 8 - Пороговая функция токоограничения; 9 - Статический закон регулирования напряжения; 10 - Стабилизатор; 11 - Регулятор намагничивания; 12 - Преобразователь координат polar -> ABC; 13 - Вычислитель параметров АД; 14 - Преобразователь координат ABC -> dq.

Задатчик интенсивности формирует динамические характеристики электропривода по каналу управления, задавая отдельно время разгона и торможения для первой и второй зоны регулирования скорости.

Формирователь частоты осуществляет вычисление заданного значения частоты напряжения статора  $F_{sz}$ . Он включает в себя блок частотного токоограничения, фильтр и ограничитель выходного сигнала.

Блок частотного токоограничения формирует механические и электромеханические характеристики в области больших моментов нагрузки. Параметрами Порог, ЧТО и К что задается уставка срабатывания ограничения и крутизна электромеханической характеристики (зависимости снижения частоты от тока), параметр Т что определяет постоянную времени фильтра выходного сигнала блока частотного токоограничения. Фильтр в виде апериодического звена первого порядка осуществляет последовательную коррекцию динамики контура.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Выходной сигнал фильтра, проходя через ограничитель верхнего и нижнего пределов задания по частоте, поступает на выход формирователя частоты.

Формирователь напряжения (ФОРМИРОВАТЕЛЬ  $U_s$ ) включает в себя формирователь статического закона частотного управления, регулятор намагничивания и блок динамической стабилизации. Входными сигналами формирователя напряжения являются задание по частоте  $F_{sz}$  и ЭДС  $E$ .

Статический закон управления формирует зависимость напряжения от частоты, задаваемую в пяти точках частотного диапазона (5, 10, 25, 50 и 100% от номинального значения). Для определения текущего значения задания амплитуды напряжения используется линейная аппроксимация между крайними точками частотного отрезка.

Регулятор намагничивания обеспечивает поддержание ЭДС на уровне, задаваемом формирователем статического закона частотного управления. Для устранения статической ошибки и ограничения динамических отклонений регулятор выполнен пропорционально-интегральным (ПИ) и имеет элемент ограничения выходного сигнала.

Блок динамической стабилизации обеспечивает необходимый запас устойчивости электропривода во всем диапазоне регулирования. В установившемся режиме работы воздействие динамической стабилизации на канал формирования напряжения отсутствует. В переходных режимах вступает в действие отрицательная обратная связь по току статора. Желаемые динамические свойства обеспечиваются настройкой параметров  $K$  ст,  $T$  ст.

Сигнал задания по частоте  $F_{sz}$ , проходя через интегратор, преобразуется в сигнал задания по угловому положению вектора напряжения  $\varphi_{uz}$ . Сигнал задания по амплитуде напряжения статора  $U_{sz}^*$  и сигнал  $\varphi_{uz}$  поступают на вход вычислителя напряжения, с выхода которого после преобразования в естественную систему координат АВС подаются на вход векторного модулятора, который формирует импульсы управления транзисторами инвертора.

Вычислитель переменных двигателя использует информацию об измеренных значениях фазных токов, проекций вектора тока статора на оси  $d$  и  $q$ , вычисленных значениях составляющих вектора напряжения и определяет текущие значения других переменных, необходимых для организации внутренних контуров регулирования - модуля вектора ЭДС  $E$ , скольжения  $s$ , модуля тока статора  $|I_s|$ .

### 3.3 Разработка функциональной схемы

Функциональная схема системы управления электроприводом главного движения обрабатывающего центра ИР-500 состоит из следующих элементов: блока питания, силовой части, датчиковой системы, хост-контроллера, вспомогательного контроллера и панели управления.

Взаимосвязи основных функциональных узлов электропривода показаны на рисунке 3.5.

									Лист
									37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

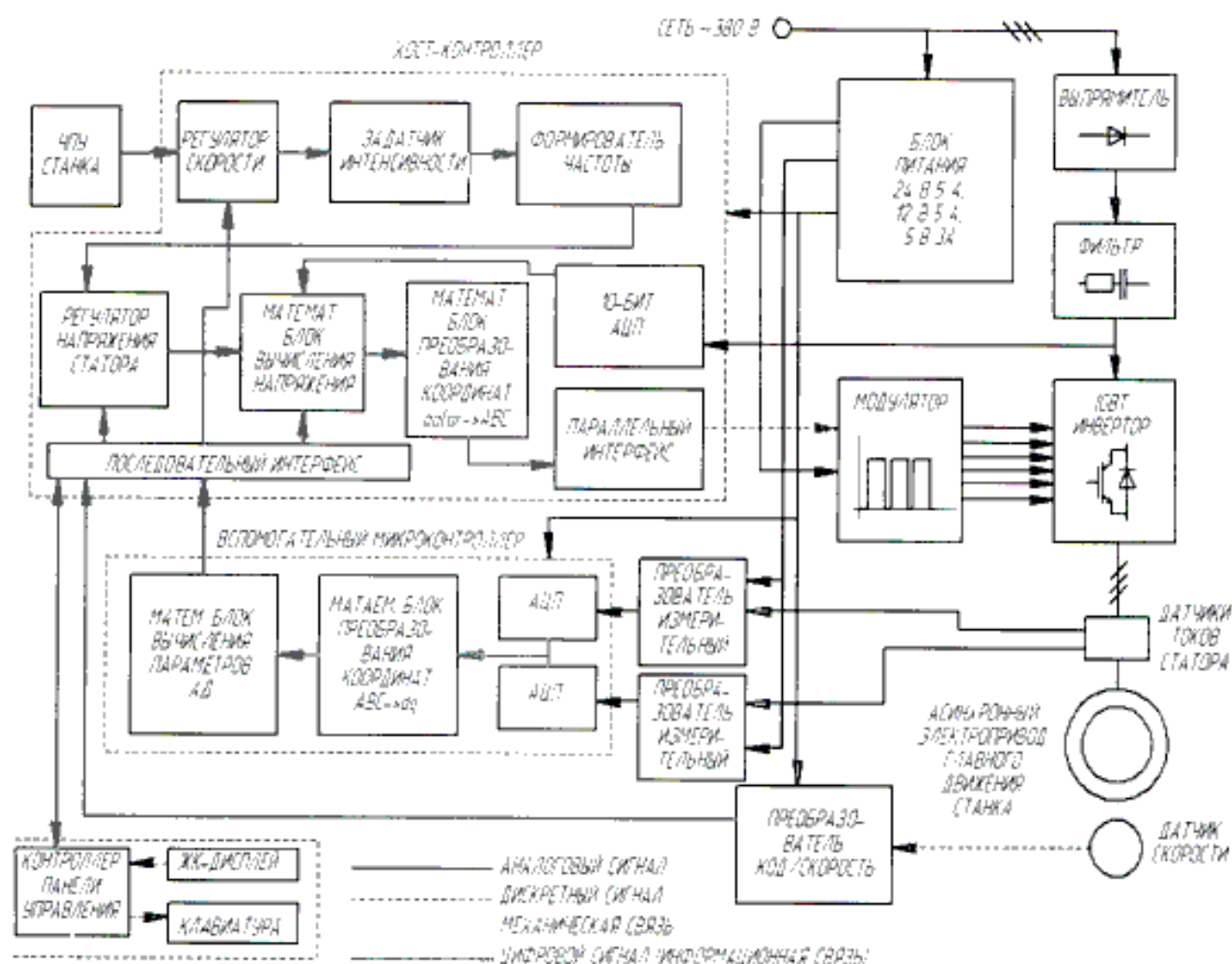


Рисунок 3.5 — Функциональная схема электропривода

Силовой модуль предназначен для преобразования сетевого напряжения постоянной частоты в напряжение переменной амплитуды и частоты для питания исполнительного двигателя.

Силовой модуль включает следующие основные элементы:

- а) трехфазный мостовой выпрямитель (выпрямитель) с варисторным ограничителем перенапряжения на входе;
- б) емкостный фильтр звена постоянного напряжения (фильтр);
- в) трехфазный мостовой IGBT-инвертор;

г) драйвер силовых ключей, обеспечивающий управление затворами IGBT, формирование сигналов защит и гальваническую развязку силовых и управляющих цепей;

Датчиковая система формирует нормированные сигналы обратных связей с гальванической развязкой силовых и управляющих цепей. Она включает:

- а) Датчик напряжения, состоящий из резистивного делителя и изолирующего усилителя с оптронной развязкой, установленный в звене постоянного напряжения;





Программное обеспечение обеспечивает обмен диагностической и управляющей информацией между электроприводом и инструментальной ЭВМ или программируемым логическим контроллером (PLC). Поддерживается протокол MODBUS.

Обеспечивает доступ ко всем переменным и флагам состояния электропривода. Скорость обмена данными 300 - 19200 бод.

Обмен информацией пульта управления со служебным контроллером выполняется по шине I2C.

По указанным критериям выбран микропроцессорный контроллер семейства STM32 на базе ядра ARM-Cortex.

Семейство ARM Cortex - новое поколение процессоров, которые выполнены по стандартной архитектуре и отвечают различным технологическим требованиям. В отличие от других ЦПУ ARM, семейство Cortex является завершенным процессорным ядром, которое объединяет стандартное ЦПУ и системную архитектуру. Семейство Cortex доступно в трех основных профилях: профиль А для высокопроизводительных применений, профиль R для реально-временных применений и профиль M для чувствительных к стоимости и микроконтроллерных применений. Микроконтроллеры STM32 выполнены на основе профиля Cortex-M3, которое специально разработано для применений, где необходимы развитые системные ресурсы и, при этом, малое энергопотребление. Они характеризуются настолько низкой стоимостью, что могут конкурировать с традиционными 8 и 16-битными микроконтроллерами. И хотя ЦПУ ARM7 и ARM9 были с успехом интегрированы в стандартные микроконтроллеры, в них все же прослеживается изначальная ориентированность на системы на кристалле (SoC). Это особенно заметно по способам обработки исключительных ситуаций и прерываний, т.к. у разных производителей микроконтроллеров и способы обработки реализованы различным образом. Cortex-M3 является стандартизованным микроконтроллерным ядром, которое помимо ЦПУ, содержит все остальные составляющие основу микроконтроллера элементы (в т.ч. система прерываний, системный таймер SysTick, отладочная система и карта памяти). 4 гигабайтное адресное пространство Cortex-M3 разделено на четко распределенные области кода программы, статического ОЗУ, устройств ввода-вывода и системных ресурсов. В отличие от ядра ARM7, Cortex-M3 выполнено по Гарвардской архитектуре и, поэтому, имеет несколько шин, позволяющие выполнять операции параллельно. Семейство Cortex имеет возможность оперировать с фрагментированными данными (unaligned data), что также отличает его от предшествующих архитектур ARM.

Этим гарантируется максимальная эффективность использования внутреннего статического ОЗУ. Семейство Cortex также поддерживает возможности установки и сброса бит в пределах двух областей памяти размером 1 Мбайт по методу bit banding. Этот метод предоставляет эффективный доступ к регистрам и флагам УВВ, расположенных в области статического ОЗУ, и исключает необходимость интеграции полнофункционального битового процессора.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Еще одним ключевым компонентом ядра Cortex-M3 является контроллер векторизованных вложенных прерываний (КВВП). КВВП предоставляет стандартную структуру прерываний для всех Cortex-микроконтроллеров и способы их обработки. КВВП предписывает векторы прерываний для 240 источников, для каждого из которых может быть установлен свой приоритет. При разработке КВВП особое внимание уделялось быстрдействию обработки прерываний. С момента получения запроса на прерывание до выполнения первой команды процедуры обработки прерывания проходит всего лишь 12 циклов. Частично это достигнуто за счет автоматических операций со стеком, выполняемым специальным микрокодом внутри ЦПУ. Если же прерывания возникают практически одновременно, то КВВП использует способ упорядоченной обработки прерываний с задержкой перед вызовом очередной процедуры обработки прерывания всего лишь 6 циклов. В случае наложения прерываний, прерывание с более высоким приоритетом может вытеснить более низкоприоритетное прерывание, не расходуя при этом дополнительных циклов ЦПУ. Структура прерываний также тесно связана с поддерживаемыми ядром Cortex-M3 экономичными режимами работы. Предусмотрена возможность конфигурации ЦПУ на автоматический переход в экономичный режим работы по завершении обработки прерывания. После этого перехода ядро будет бездействовать вплоть до возникновения очередной исключительной ситуации.

Несмотря на то, что ядро Cortex-M3 разрабатывалось как недорогое ядро, оно остается 32-битным ЦПУ и, в связи с этим, поддерживает два режима работы: потоковый режим (Thread) и режим обработчика (Handler), для каждого из которых можно сконфигурировать свои собственные стеки. Благодаря этому, появляется возможность разработки более интеллектуального программного обеспечения и поддержки операционных систем реального времени (OSPB). В ядро Cortex также входит 24-битный автоматически перезагружаемый таймер, предназначенный для генерации периодических прерываний и используемый ядром OSPB. Если у ЦПУ ARM7 и ARM9 имеется два набора инструкций (32-битный ARM и 16-битный Thumb), то у семейства Cortex предусмотрена поддержка набора инструкций ARM Thumb-2. Он представляет собой смесь 16- и 32-битных инструкций, позволяющие добиться производительности 32-битного набора инструкций ARM и плотности кода, свойственной 16-битному набору инструкций Thumb. Thumb-2 - обширный набор инструкций, ориентированный на компиляторы языков C/C++. Это означает, что программа для Cortex-микроконтроллера может быть полностью написано на Си. Упрощенная модель микроконтроллера STM32 представлена на рисунке 3.6.

Общие технические характеристики и состав периферии выбранного контроллера следующий:

- а) ARM 32-bit Cortex-M4 CPU;
- б) частота тактирования 168МГц, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/МГц;
- в) Поддержка DSP-инструкций;
- г) До 1 Мбайта Flash-памяти;

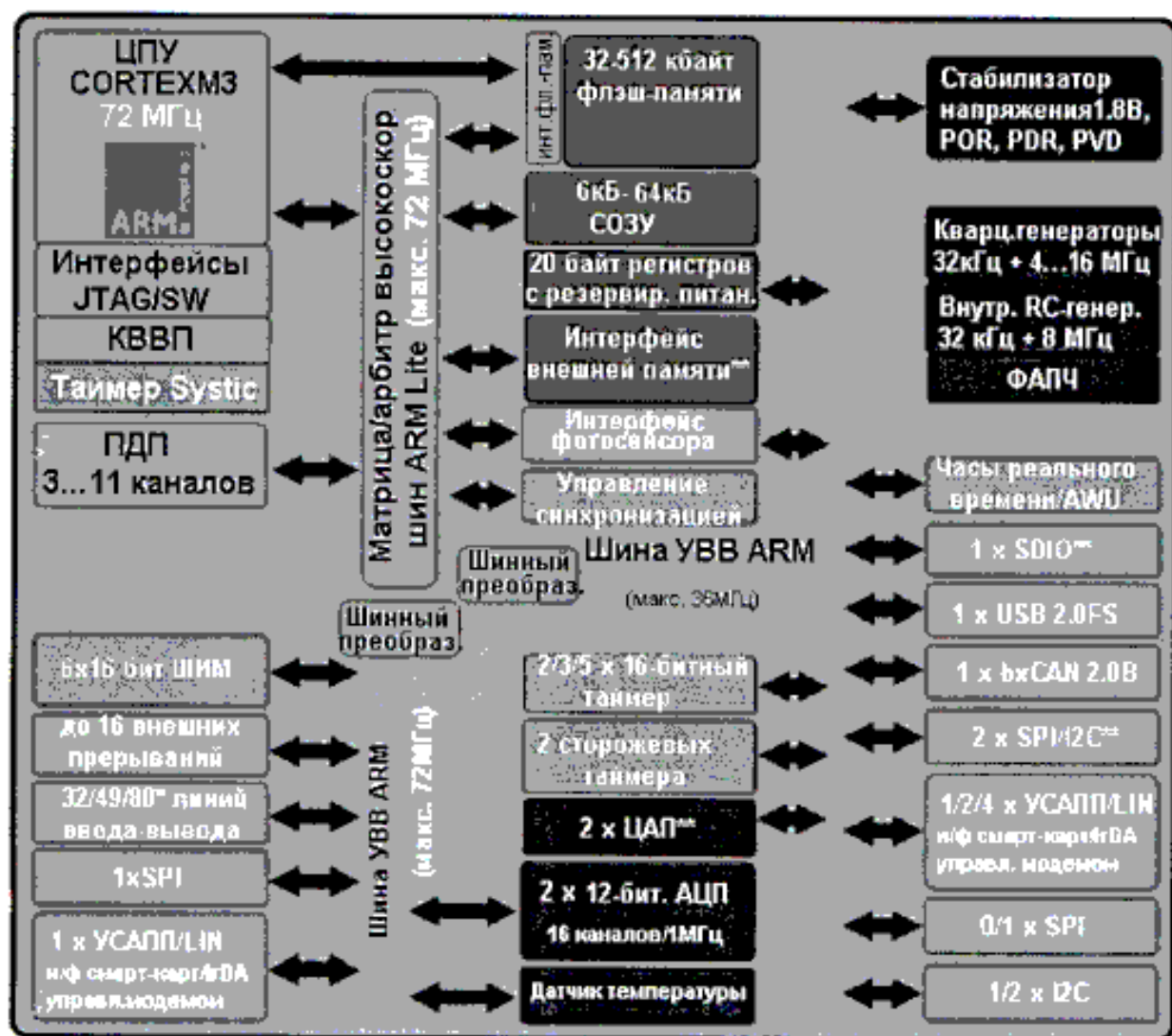


Рисунок 3.6 — Структура микроконтроллера STM32 72 МГц

- д) До 192 + 4 кбайт SRAM-памяти;
- е) Напряжение питания 1,8...3,6В (POR, PDR, PVD и BOR);
- ж) Внутренние RC-генераторы на 16МГц и 32кГц (для RTC);
- з) Внешний источник тактирования 4...26МГц и для RTC – 32,768кГц;
- и) Три 12-бит АЦП на 24 входных канала (скорость до 7,2 мегасемплов, температурный датчик);
- к) Два 12-битных ЦАП;
- л) DMA-контроллер на 16 потоков с поддержкой пакетной передачи;
- м) 17 таймеров (16 и 32 разряда);
- н) Два сторожевых таймера (WDG и IWDG);
- о) Коммуникационные интерфейсы: I2C, USART (ISO 7816, LIN, IrDA), SPI, I2S;
- п) CAN (2,0 В Active);
- р) Расширенный температурный диапазон -40...105°C.

### 3.5 Выбор вспомогательных микропроцессорных средств

В качестве вспомогательных микропроцессорных средств используются:

- а) 8-и разрядный микропроцессорный контроллер для обработки сигналов с датчиков скорости, температуры и формирования флагов медленных защит;
- б) мост для обмена данными с ЧПУ станка или ПЛК;
- в) контроллер панели управления.

Для обработки сигналов, поступающих от датчиков к микроконтроллеру предъявляются следующие требования:

- а) два аналоговых входа для измерения напряжения 0..5 В от датчиков температуры;
- б) дискретный вход для обработки сигнала от энкодера;
- в) 10-разрядный АЦП;
- г) таймер с разрешением 16 бит;
- д) UART интерфейс для обмена данными с хост-микроконтроллером.

Указанным критериям удовлетворяет микропроцессорный контроллер AVR модели ATmega8

Микроконтроллеры Atmel® megaAVR® являются идеальным выбором для проектов, которым нужны дополнительные функциональные возможности[13]. Они обладают памятью программ и данных большого объема при быстром действии до 20 млн операций в секунду, а потому идеально подходят для приложений со значительным количеством кода. Между тем, новаторская технология Atmel picoPower® минимизирует потребление энергии. Все устройства megaAVR поддерживают самопрограммирование, что позволяет выполнять внутрисхемное обновление быстро, безопасно и без лишних затрат. Даже флеш-память можно обновлять без остановки приложения.

Семейство микроконтроллеров megaAVR основано на современной и уже зарекомендовавшей себя технологии. В него входит самый широкий перечень изделий с различными объемами памяти, количеством выводов и набором периферийных устройств. К ним относятся все устройства общего назначения, модели со специальными периферийными устройствами, подобные периферийному контроллеру сенсорного ввода (PTC), USB, контроллеры ЖК-дисплеев, а также CAN, LIN и контроллеры каскадов усиления (PSC). В семействе megaAVR нетрудно подобрать микроконтроллер, подходящий именно вашему проекту. Все эти устройства поддерживаются платформой разработки Atmel Studio, которая уменьшает время выхода на рынок.

Основные технические характеристики микроконтроллера представлены в таблице 3.1

Для обеспечения связи микроконтроллера и системы ЧПУ или ПЛК по стандартным протоколам обмена данными (RS-232, Modbus, CAN) существует несколько вариантов схем преобразователей уровня, но самая популярная это все же на специальном преобразователе RS232-TTL. Это микросхема MAX232 и ее аналоги.

Таблица 3.1 — Основные технические характеристики вспомогательного контроллера

Параметр	Память FLASH	Память ОЗУ	Память EEPROM	Порты ввода/вывода	U питания	Частота
Значение	8	1К	512	23	4,5-5,5	0-16

Дополнительные параметры МК AVR mega:

- а) рабочая температура:  $-55...+125$  °С;
- б) температура хранения:  $-65...+150$  °С;
- в) напряжение на выводе RESET относительно GND: max 13В;
- г) максимальное напряжение питания: 6.0В;
- д) максимальный ток линии ввода/вывода: 40мА;
- е) максимальный ток по линии питания VCC и GND: 200мА.

MAX232—интегральная схема, преобразующая сигналы последовательного порта RS-232 в сигналы, пригодные для использования в цифровых схемах на базе ТТЛ или КМОП технологий. MAX232 работает приемопередатчиком и преобразует сигналы RX, TX, CTS и RTS.

Функциональность и цоколевка микросхемы стала стандартом де-факто и её аналоги (с другой маркировкой) выпускаются множеством производителей полупроводников.

Схема обеспечивает уровень выходного напряжения, используемый в RS-232 (приблизительно  $\pm 7.5$  В), преобразуя входное напряжение + 5 В при помощи внутреннего зарядового насоса на внешних конденсаторах. Это упрощает реализацию RS-232 в устройствах, работающих на напряжениях от 0 до + 5 В, так как не требуется усложнять источник питания только для того, чтобы использовать RS-232.

Входное напряжение от RS-232, которое может достигать  $\pm 25$  В, понижается до стандартных 5 В, используемых в транзисторно-транзисторной логике. Входы имеют средний порог 1.3 В и средний гистерезис 0.5 В.

Модификация MAX232A обратно совместима с MAX232, но может работать на более высоких скоростях (см.Бод), и использовать внешние конденсаторы меньшей ёмкости — 0.1  $\mu$ F вместо конденсаторов на 1.0  $\mu$ F, используемых с оригинальной схемой[1].

Последняя модификация — MAX3232 — также обратно совместима с предыдущими, но работает в диапазоне напряжений от 3 до 5.5В [14].

Панель управления состоит контроллера панели, кнопочного пульта и и LCD дисплея. В качестве контроллера используется ATmega8, описанный выше. В качестве дисплея — текстовый экран 16x2 MT-16S2H компании Мэлт для вывода текста с подсветкой. Внешний вид экрана показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 — Внешний вид LCD дисплея пульта управления

Экран имеет 16 контактов для подведения питания и взаимодействия с управляющей электроникой. Для управления выводом дисплея возможно использовать только 6 из них.

Дисплей выполнен на чипе, совместимом с HD44780, который является де-факто стандартом для LCD-экранов [15].

Программирование дисплея, возможно с помощью стандартной библиотеки Liquid Crystal.

### 3.6 Выбор датчиков обратной связи

#### 3.6.1 Выбор датчика скорости

В системах АСУТП и электроприводов для реализации обратной связи по скорости вращения и значению угла поворота широко применяются энкодеры. В нашем случае, для обеспечения наилучшей совместимости датчика скорости и контроллера был выбран инкрементный энкодер серии ЛИР. Особенности данной серии являются:

- а) большой выбор моделей для разных областей эксплуатации;
- б) тип вала / фланца: вал сельсинного типа, вал зажимного типа, полый сквозной и полый несквозной вал;
- в) типы подключения: несъемный кабель с разъемом или несъемный кабель без разъема (модели с полым валом есть только с несъемным радиальным кабелем), осевой/радиальный разъем;
- г) конструкций корпуса с передним креплением значительно упрощает монтаж.

Тип и модификацию датчика выбираем исходя из максимального числа оборотов, класса точности, разрешения. По указанным характеристикам выбран датчик типа ЛИР-158. Габаритный чертеж датчика показан на рисунке 3.8. Технические характеристики выбранного датчика:

- а) разрешение до 8000 имп/об.;
- б) напряжение питания 5 В;
- в) тип выходного сигнала: СТ (~11мкА), СН (~1 В) ПИ (TTL), ПИ (HTL);

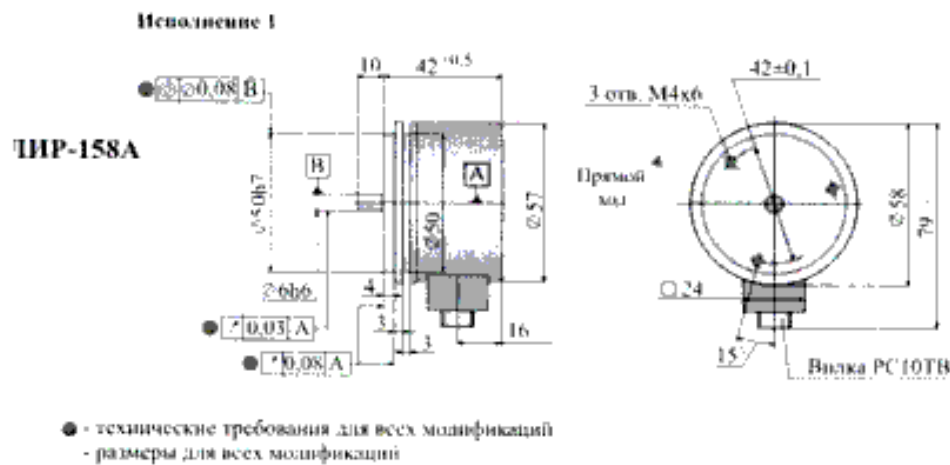


Рисунок 3.8 — Габаритный чертеж датчика ЛИР-158

- г) класс точности: 6 класс  $\pm 30''$ ;
- д) максимальная скорость вращения вала: 10000 об/мин;
- е) диаметр вала 12 мм;
- ж) степень защиты IP64

### 3.6.2 Выбор датчика тока

Основными критериями выбора датчика тока для обеспечения обратной связи в системе управления электроприводом являются [16]:

- а) гальваническая развязка;
- б) возможность сопряжения с микроконтроллером без дополнительных затрат на преобразование сигнала и программную часть.

Рассмотрим распространенные типы датчиков тока.

Наиболее простой и точный способ измерения тока — измерительный шунт. Как известно, при протекании тока через активное сопротивление, на нем происходит падение напряжения, пропорциональное измеряемому току. Схема измерения показана на рисунке 3.9.

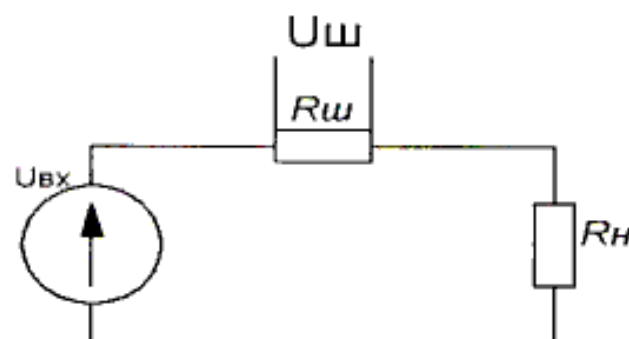


Рисунок 3.9 — Датчик тока — токовый шунт

Соответственно в зависимости от требуемого напряжения на выходе датчика подбирается нужное сопротивление шунта. Однако, падение напряжения на шунте приведет к потерям мощности, выделяемым в тепло, соответственно, при



больших токах, значения напряжения с датчика небольшие. Для измерения тока с помощью таких шунтов требуется использовать операционные усилители. При этом, средний коэффициент усиления составляет 20-40, что позволяет использовать широко-распространенные операционные усилители. В некритичных цепях постоянного тока можно воспользоваться и усилительным каскадом на базе одного транзистора. Достоинствами измерительного шунта являются: высокая точность, широкий диапазон напряжений и частот, измеряет постоянный и переменный ток.

Недостатки: отсутствует гальваническая развязка; низкий КПД.

Измерительный трансформатор тока представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого подключается к источнику тока, а вторичная замыкается на измерительные приборы или устройства защитной автоматики.

Трансформаторы тока используются для измерения токов в силовых цепях, зачастую я высоким потенциалом. Основная проблема трансформаторов тока заключается в том, что они могут измерять только переменное напряжение.

Трансформатор тока всегда нагружается. Если вторичная обмотка трансформатора тока окажется разомкнутой, то на ней возникнет потенциал в пару тысяч киловольт, который может привести к травмированию персонала и выведет из строя прибор, вызвав пробой его изоляции.

Диапазон измеряемых токов — от десятков до тысяч ампер, но они страдают от невысокой точности.

Достоинства: гальваническая развязка, работа с большими токами в тысячи Ампер.

Недостатки: измеряет только переменный ток в определенном диапазоне частот(кроме катушки Роговского), изменяет фазу сигнала и требует компенсации.

Датчики Холла используют эффект возникновения разности потенциалов при помещении проводника с током в магнитное поле. При создании датчика используется магнитопровод, через который пропускается провод измеряемой цепи и в разрез магнитопровода помещается датчик Холла, получая датчик тока открытого типа. Схема такого датчика показана на рисунке 3.10.

С нулевым подмагничиванием сердечника мы повышаем линейность датчика и его класс точности. Однако по своей конструкции такой датчик приближается к трансформаторам тока, соответственно его стоимость повышается в разы.

Достоинства: широкий диапазон измеряемых токов с частотой до 50-100кГц и выше, измеряет постоянный и переменный ток, гальваническая развязка.

Недостатки: высокая стоимость.

Проанализировав имеющиеся у представленных датчиков достоинства и недостатки выбираем датчик тока на эффекте Холла. Модель датчика выбираем исходя из максимального значения измеряемого тока и возможности сопряжения с микроконтроллером.

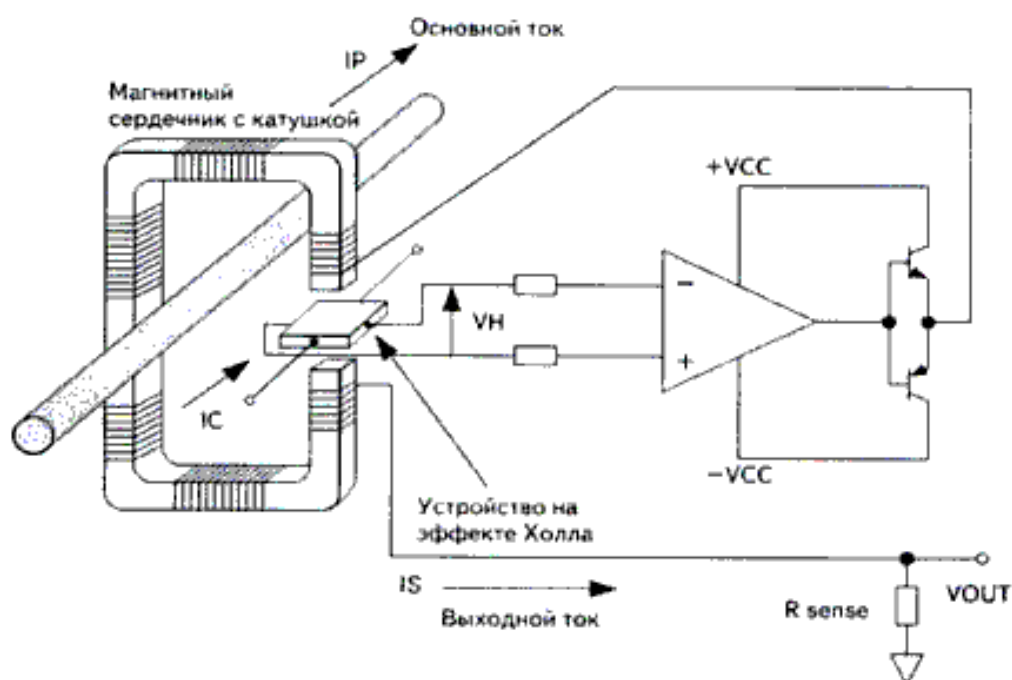


Рисунок 3.10 — Датчик тока на эффекте Холла

Указанным критериям удовлетворяет датчик измерения постоянного и переменного тока ДТХ-150. Датчики состоят из корпуса, печатной платы, на которой закреплен кольцевой магнитопровод с компенсационной обмоткой и электронной схемы. Составным элементом является специальный датчик Холла, который находится в зазоре магнитопровода и работает как "0"-индикатор.

При протекании измеряемого тока по шине, охватываемой магнитопроводом, в последнем наводится магнитная индукция. Датчик Холла, реагирующий на возникшее магнитное поле, вырабатывает напряжение, пропорциональное величине наведенной магнитной индукции. Выходной сигнал с датчика усиливается электронным усилителем и подается в компенсационную обмотку. В результате, по обмотке течет компенсационный ток, пропорциональный измеряемому току по величине и соответствующий ему по форме. Возникающее при этом магнитное поле компенсационной обмотки компенсирует магнитное поле измеряемого тока, и датчик Холла работает как нуль-орган. При этом полоса частот, пропускаемая таким датчиком тока, составляет от 0 Гц (постоянный ток) до 200 кГц.

Технические характеристики датчика представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 — Технические характеристики датчика ДТХ-150

Характеристика	Значение
Диапазон измеряемых токов, А	0...150
Допустимая перегрузка по измеряемому току, разы	1,5

Окончание таблицы 3.2

Характеристика	Значение
Основная приведенная погрешность, не более, %	1
Нелинейность выходной характеристики, не более, %	0,1
Выходной сигнал при номинальном измеряемом токе, мА *	75
Коэффициент передачи	1:2000
Полоса пропускания, Гц	0-50000
Источник питания, В	±15 (±5%)
Диаметр отверстия под токовую шину, мм	10
Габаритные размеры, мм	44x33x22
Масса, г	70

Схема включения датчика показана на рисунке 3.11.

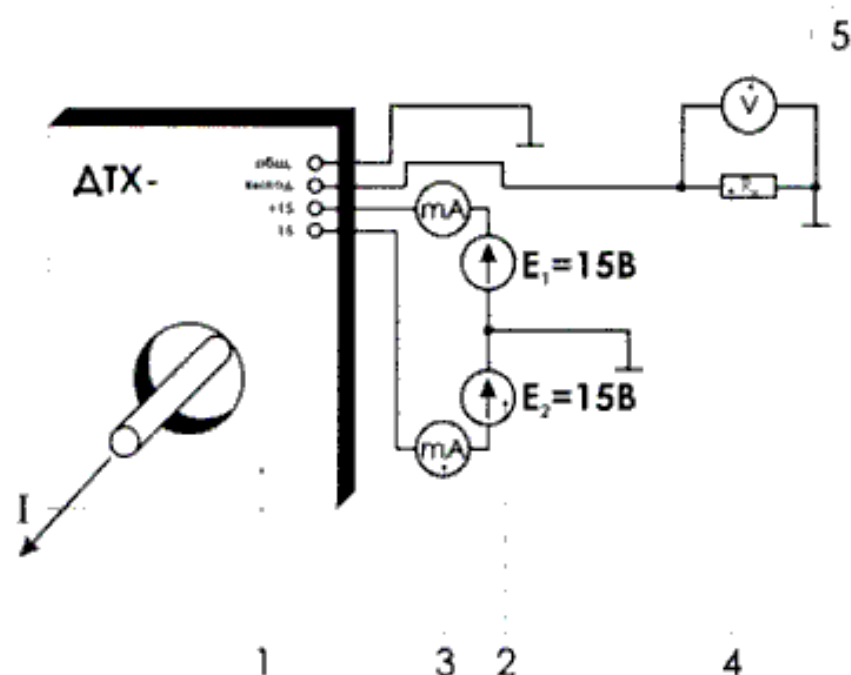


Рисунок 3.11 — Схема подключения датчика ДТХ-150:  
 1 Датчик тока ДТХ; 2 Источник питания; 3 Миллиамперметр; 4  
 Сопротивление класса точности 0,05 % 80 Ом; 5 Вольтметр.

### 3.6.3 Выбор датчика температуры

Для контроля температуры на корпусе двигателя и корпусе IGBT-инвертора, применяем датчики температуры, обеспечивающие диапазон  $+20...100\text{ }^{\circ}\text{C}$  с точностью до  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данным критериям удовлетворяют датчики типа DS18B20.

DS18B20 цифровой термометр с программируемым разрешением, от 9 до 12-bit, которое может сохраняться в EEPROM памяти прибора. DS18B20 обменивается данными по 1-Wire шине и при этом может быть как единственным устройством на линии так и работать в группе. Все процессы на шине управляются центральным микропроцессором. Диапазон измерений от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  и точностью  $0,5^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . В дополнение, DS18B20 может питаться напряжением линии данных, при отсутствии внешнего источника напряжения. Каждый DS18B20 имеет уникальный 64-битный последовательный код, который позволяет, общаться с множеством датчиков DS18B20 установленных на одной шине. Такой принцип позволяет использовать один микропроцессор, чтобы контролировать множество датчиков DS18B20, распределенных по большому участку. Приложения, которые могут извлечь выгоду из этой особенности, включают системы контроля температуры в зданиях, и оборудовании или машинах, а так же контроль и управление температурными процессами.

Рисунок 3.12 показывает блок-схему DS18B20. 64-битовый ROM запоминает уникальный последовательный код прибора. Оперативная память содержит 2-байтовый температурный регистр, который запоминает цифровой выход от температурного преобразователя. Кроме того, электронный блок обеспечивает доступ к 1-байтовым сигнальным регистрам триггерной схемы (TH и TL), и к регистру конфигурации. Регистр конфигурации позволяет пользователю устанавливать разрешающую способность цифрового преобразователя температуры к 9, 10, 11, или 12 битам. TH, TL и регистры конфигурации энергонезависимы (EEPROM), таким образом они сохраняют данные, когда прибор - выключен. DS18B20 использует исключительно 1-Wire протокол – при этом формируется соединение, которое осуществляет коммуникацию на шине, используя всего один управляющий сигнал. Шина должна быть подключена к источнику питания через подтягивающий резистор, так как все приборы связаны с шиной, используют соединение через Z-состояния или вход открытого стока. Используя эту шину микропроцессор (ведущий) идентифицирует и обращается к датчикам температуры, используя 64-битовый код прибора. Поскольку каждый прибор имеет уникальный код, число приборов, к которым можно обратиться на одной шине, фактически неограниченно. Другая особенность DS18B20 - способность работать без внешнего питания. Эта возможность предоставляется через подтягивающий резистор. Высокий сигнал шины заряжает внутренний конденсатор (CPP), который питает прибор, когда на шине низкий уровень. Этот метод носит название «Паразитное питание». При этом максимальная измеряемая температура при этом  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ					

Для расширения диапазона температур до + 125 °С необходимо использовать внешнее питание.

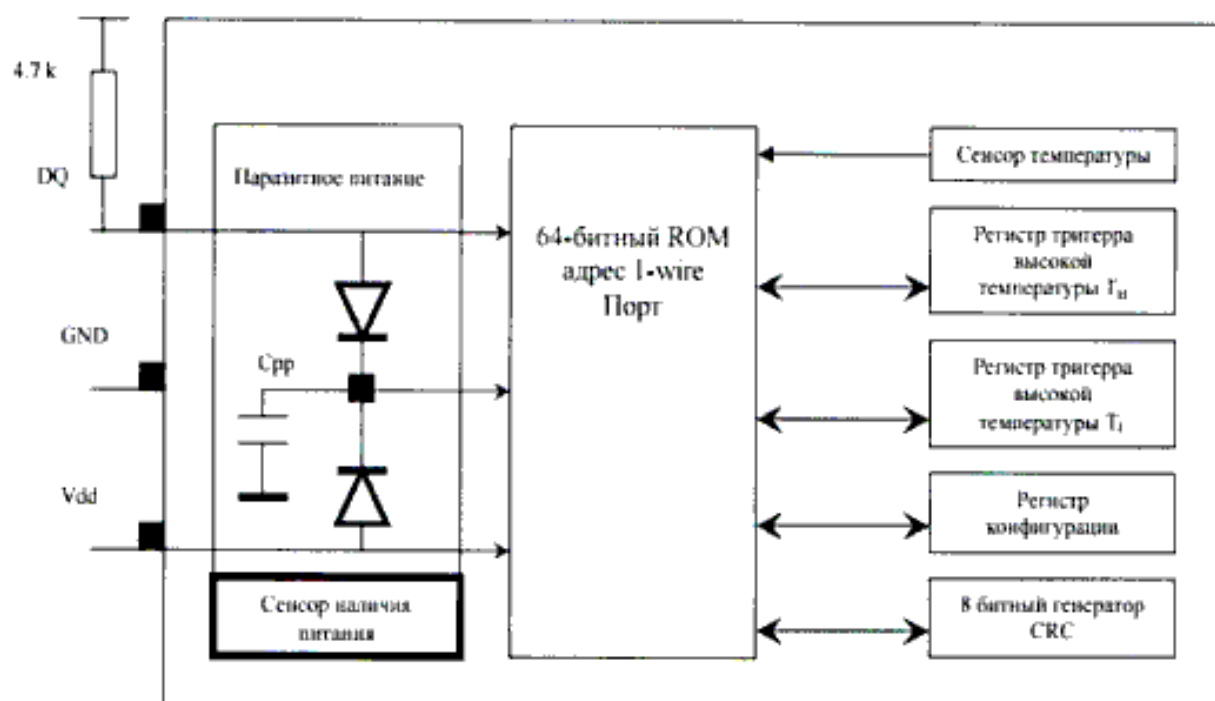


Рисунок 3.12 — Блок-схема датчика температуры

Основные функциональные возможности DS18B20 - его температурный преобразователь. Разрешающая способность температурного преобразователя может быть изменена пользователем и составляет 9, 10, 11, или 12 битов, соответствуя приращениям (дискретности измерения температуры) 0.5 °С, 0.25°С, 0.125°С, и 0.0625°С, соответственно. Разрешающая способность по умолчанию установлена 12-бит. В исходном состоянии DS18B20 находится в состоянии покоя ( в неактивном состоянии). Чтобы начать температурное измерение и преобразование, ведущий должен подать команду начала конвертирования температуры [0x44]. После конвертирования, полученные данные запоминаются в 2-байтовом регистре температуры в оперативной памяти, и DS18B20 возвращается к его неактивному состоянию. Если DS18B20 включен с внешним питанием, ведущий может контролировать конвертирование температуры (после команды [0x44]) по состоянию шины. На шине будет присутствовать логический «0» когда происходит температурное преобразование. И логическая «1», когда конвертирование выполнено. Если DS18B20 включен с паразитным питанием, эта технология уведомления не может быть использована, так как шину нужно подать высокий уровень (напряжение питания) в течение всего времени температурного преобразования. Выходные температурные данные DS18B20 калиброваны в градусах Цельсия. Температурные данные запоминаются как 16-битовое число со знаком. Биты признака (S) указывают, является ли температура положительная или отрицательная: для положительных  $S = 0$ , а для отрицательных чисел  $S = 1$ .

Если DS18B20 будет настроен для конвертирования 12-битной разрешающей способности, то все биты в температурном регистре будут содержать действительные данные. Для 11-битной разрешающей способности, бит 0 неопределен. Для 10-битной разрешающей способности, биты 1 и 0 неопределены, и для 9-битной разрешающей способности биты 2, 1 и 0 неопределены.

### 3.7 Выбор частотного преобразователя

В рамках работы выбран частотный преобразователь серии ЭПВ. Преобразователи частоты серии ЭПВ предназначены для регулирования частоты вращения асинхронных и синхронных электродвигателей. Преобразователи имеют четыре варианта исполнения.

Исполнение 1 - преобразователи для общепромышленных механизмов с асинхронным двигателем и диапазоном регулирования скорости до 50:1, без датчика скорости/положения, не предъявляющих повышенных требований к быстродействию и точности регулирования скорости, в том числе для насосов, вентиляторов, подъемнотранспортных средств, высокоскоростных электрошпинделей и т. п.;

Исполнение 2 - преобразователи с векторным управлением, предназначенные для широкодиапазонного высококачественного асинхронного электропривода различных производственных механизмов, в том числе механизмов главного движения и подачи металлорежущих станков с ЧПУ и промышленных роботов.

Исполнение 3 - преобразователи с векторным управлением, предназначенные для широкодиапазонного высококачественного синхронного электропривода различных производственных механизмов, в том числе механизмов подачи металлорежущих станков с ЧПУ и промышленных роботов;

Исполнение 4 - преобразователи с векторным управлением без датчика скорости/положения, предназначенные для механизмов с диапазоном регулирования скорости до 50:1, предъявляющих повышенные требования к быстродействию, у которых вследствие технологических особенностей установка датчика на вал двигателя не предусматривается, в том числе экструдеры, дробилки и другие механизмы химической и горнорудной промышленности.

Для электропривода главного движения обрабатывающего центра выбрано исполнение 2.

Выбираем марку преобразователя по типовой мощности электродвигателя и напряжению питания. Для напряжения 380 В и мощности электродвигателя 15 кВт выбран преобразователь ЭПВ-Т-Т Е-Т 32-380-2АП-УХЛ4:

- а) питающая цепь: трехфазная 380 В;
- б) род тока на выходе: трехфазный;
- в) способ охлаждения: естественное;
- г) тип полупроводниковых приборов силовой схемы: транзисторы;
- д) номинальный выходной ток: 32 А;
- е) исполнение — 2;
- ж) тип двигателя: асинхронный;

									Лист
									52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

- з) тип датчика: импульсный;
- и) тип исполнения УХЛ4 по ГОСТ 15150.

Основные технические характеристики выбранного преобразователя приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 — Основные технические характеристики преобразователя

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Габаритные размеры (Ш x В x Г)	мм	215x320x220
Номинальная выходная мощность	кВА	21
Типовая мощность двигателя	кВт	15
Напряжение питания	В	380+10/-15%
Частота напряжения питания	Гц	48..63
Выходное напряжение	В	0..входное напряжение
Выходная частота	Гц	0..400
Частота модуляции	Гц	2500..16000
Номинальный выходной ток $I_{НОМ}$ (действ.)	А	32
Максимальный выходной ток $I_{max}$ (действ.)	А	42
Ток срабатывания защиты $I_{МТЗ}$ (абс. зн.)	А	75
Максимальный ток торможения	А	42
Мин. сопротивление балласт. резистора	Ом	15
Мощность потерь в номинальном режиме	Вт	292
Максимальная температура радиатора	°С	+85
Рабочий диапазон температур окр. среды	°С	0..+40

Электроприводы должны обеспечивать следующие режимы работы:

- а) плавный пуск/реверс/останов с регулируемой интенсивностью;
- б) автоматическое определение параметров подключенного двигателя;
- в) автоматический перезапуск после кратковременного пропадания напряжения питания;
- г) стабилизация технологического параметра по сигналам внешних датчиков со стандартными аналоговыми сигналами 0 .. 10 В или 4 .. 20 мА;
- д) режим частотного токоограничения;
- е) режим токовой отсечки.

Электроприводы в режиме регулирования скорости обеспечивают:

- а) для АД с напряжением питания 380 В / 50 Гц – регулирование двух зонное:
  - 1) первая зона – с постоянным моментом;

2) вторая зона – с постоянной мощностью.

б) для высокоскоростных электрошпинделей – одно зонное, с постоянным моментом.

в) общий диапазон регулирования скорости – 50;

г) поддиапазон регулирования скорости вверх от номинальной – не менее 2 (при отсутствии ограничений со стороны двигателя);

д) точность поддержания скорости в соответствии с табл. 3.4.

Таблица 3.4 — Погрешности поддержания скорости

Уровень скорости	Погрешность скорости при изменении нагрузки $\Delta n$ , % не более
$n_{max}$	2
$n_{ном}$	2
$0,1 n_{ном}$	15

Номинальный режим работы электроприводов - продолжительный (S1). При работе в кратковременном (S2) и повторно-кратковременном режимах (S3) максимальный выходной ток преобразователя не должен превышать значений  $I_{MTЗ}$ , данных в таблице 3.3.

Кратность рабочей перегрузки по номинальному току преобразователя – до 1.3 в течение времени не более 60 с при частоте выходного напряжения не ниже 40 Гц и частоте модуляции 5 кГц (таблица 3.3). При повышении частоты модуляции кратность рабочей перегрузки снижается согласно диаграмме рисунок 3.13. При необходимости большей перегрузочной способности выбирается преобразователь следующего габарита.

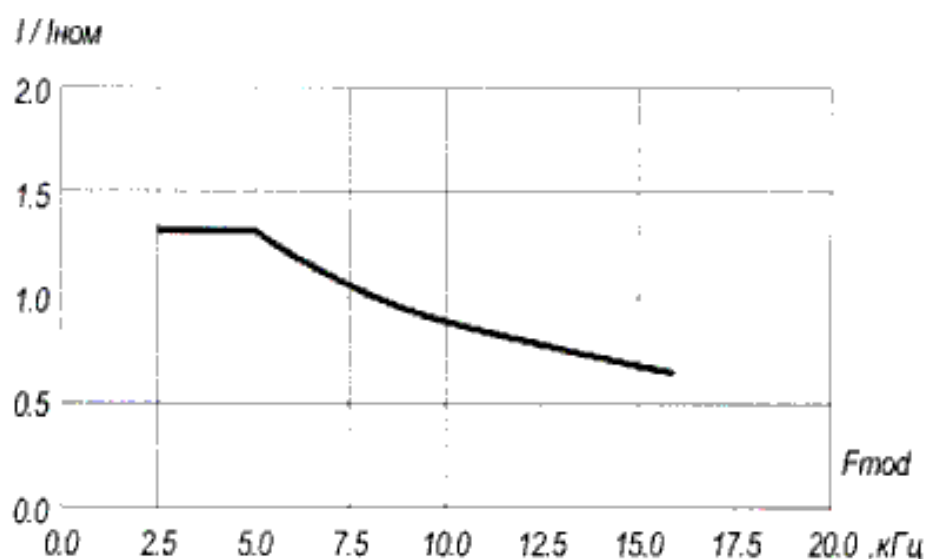


Рисунок 3.13 - Диаграмма снижения кратности рабочей перегрузки Преобразователи частоты обеспечивают защиты электропривода в соответствии с ГОСТ24607-88:



- а) максимально-токовую защиту преобразователя;
- б) защиту от пропадания питания цепей управления;
- в) защиту от сбоев программного обеспечения;
- г) защиту от недопустимых отклонений питающего напряжения;
- д) защиту от аварии узла сброса энергии;
- е) защиту от перегрева силового блока преобразователя;
- ж) защиту от перегрева двигателя (при наличии встроенного термодатчика);
- з) время-токовую защиту двигателя.

Показатели надежности электроприводов:

- а) средняя наработка на отказ - не менее 8000 ч;
- б) среднее время восстановления – не более 8 ч, при использовании резервных плат – 0,5 ч;
- в) средний срок службы – не менее 12 лет;
- г) гарантийный срок службы – 2 года.

### 3.8 Разработка принципиальной схемы

#### 3.8.1 Блок преобразователя частоты

Электропривод выполнен на базе трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем и инвертором напряжения. На выходе преобразователя формируется напряжение регулируемой амплитуды и частоты, подаваемое на обмотки статора двигателя. Используя сигналы обратной связи по току и напряжению, система управления вычисляет неизмеряемые переменные, регулирует скорость двигателя в соответствии с получаемым заданием.

Силовой модуль предназначен для преобразования сетевого напряжения постоянной частоты в напряжение переменной амплитуды и частоты для питания исполнительного двигателя.

Силовой модуль включает следующие основные элементы:

- а) трехфазный мостовой выпрямитель VD17...VD22 с варисторным ограничителем перенапряжения на входе R17...R19;
- б) емкостный фильтр звена постоянного напряжения R14...R15, C19...C20;
- в) трехфазный мостовой IGBT- инвертор VT6...VT11;
- г) узел сброса энергии торможения, состоящий из IGBT-чоппера VT5 и внешнего балластного резистора R16;

Принципиальная схема преобразователя частоты показана на рисунке 3.14.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

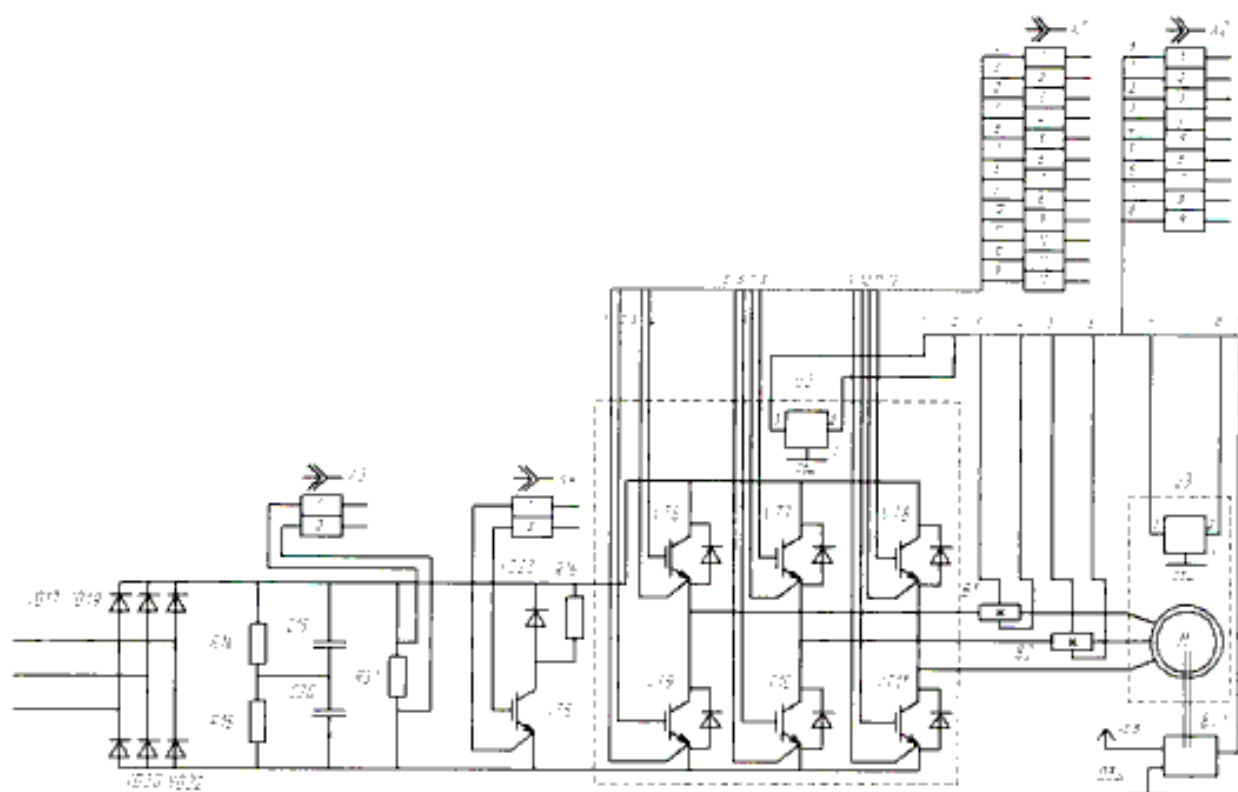


Рисунок 3.14 Принципиальная схема преобразователя частоты

Датчиковая система формирует нормированные сигналы обратных связей с гальванической развязкой силовых и управляющих цепей. Она включает:

- а) Датчик напряжения RS1, состоящий из резистивного делителя и изолирующего усилителя с оптронной развязкой, установленный в звене постоянного напряжения;
- б) Датчики тока В1, В2, установленные в двух выходных фазах инвертора;
- в) Датчик температуры силового блока, состоящий из NTC-резистора, установленного в силовом модуле и изолирующего усилителя U2 (в преобразователях с выходным током 50 А и более датчики имеются в каждом из силовых модулей выпрямителя и инвертора);
- г) Терморезистор защиты двигателя со схемой компаратора U3 и оптронной развязкой;
- д) энкодера BV1;

### 3.8.2 Блок питания 24 В

Источник с выходным напряжением +24 В служит для питания высоковольтных схем управления IGBT транзисторами.

Принципиальная схема блока питания 24 В показана на рисунке 3.15.

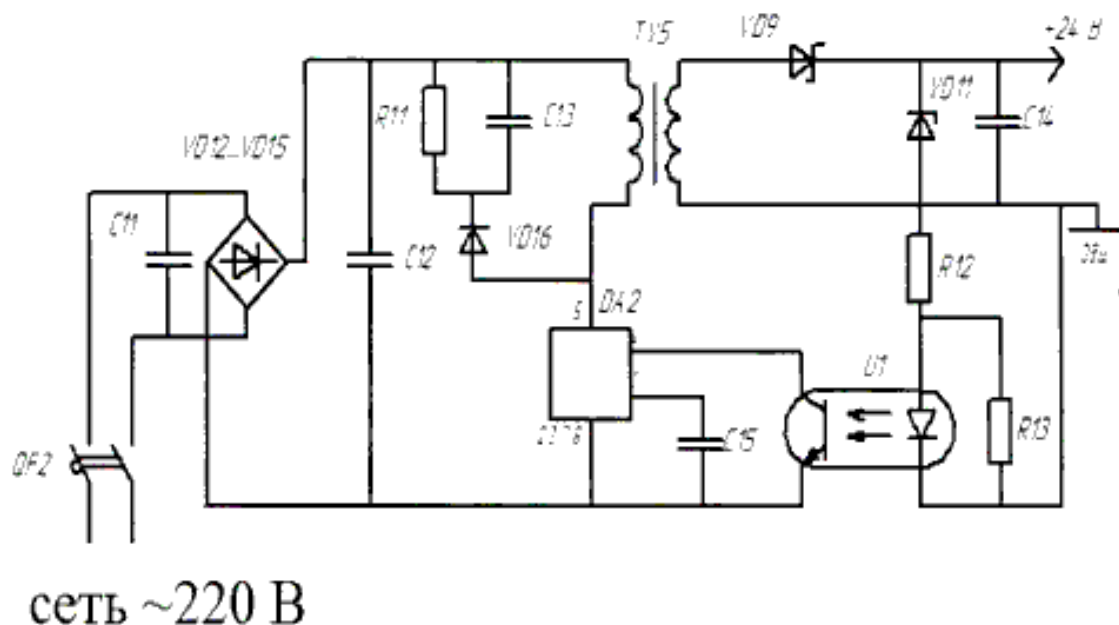


Рисунок 3.15 — Принципиальная схема блока питания 24 В.

Потребляемый ток для трех схем определяется по формуле 3.8:

$$I_{\text{ин}} = 3 \cdot I_d = 3 \cdot 270 = 810 \text{ мА}, \quad (3.8)$$

где  $I_d$  — ток, потребляемый одним драйвером транзисторов,  $I_d = 270 \text{ мА}$ .

Схема источника построена на базе ШИМ-регулятора TNY268, обеспечивающей необходимую выходную мощность 23 Вт.

Частота работы преобразователя 132 кГц. Блок питания построен по топологии флуэбаск-обратноходовый преобразователь.

Конденсатор C11 от помех в сеть на 2,2 нФ. Диодная сборка VD12...VD15 DB107, возможна замена на обычные диоды или любую другую оборуку (400В 0,5А). Конденсатор C12 22мкФх400 — электролитический. Защитная цепочка: конденсатор C13 Y5P 2200пФ 2000В, резистор R11 200 кОм 0,125 Вт, диод VD16 1N4007. Микросхема TNY266, возможна замена на TNY263-268.

Конденсатор на 1 выводе микросхемы - 0,1 мкФ 50В - керамический. Оптотранзистор U1 CNY17-2 или любой с аналогичными параметрами из серий PC, TLP, ток через диод подбирается путём подстройки резисторов делителя. Стабилитрон VD11 - 3,9 вольта. Диод Шоттки VD9 1N5822 или любой аналогичный.

Сглаживающий конденсатор 1000 мкФ х 16 В, конденсатор на напряжение ниже 10 вольт устанавливать не рекомендуется.

									Лист
									57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

### 3.8.3 Блок питания 12 В/5 В

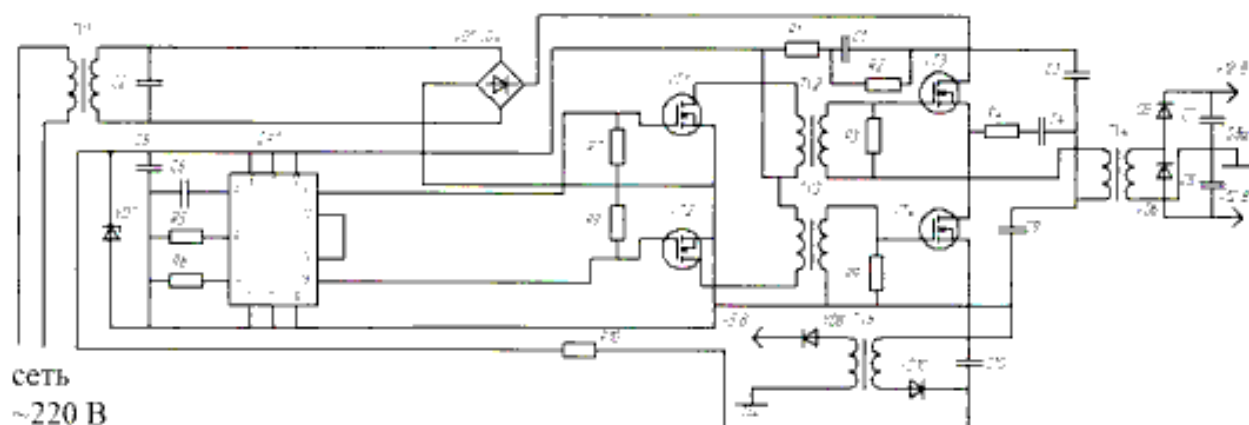


Рисунок 3.16 — Принципиальная схема блока питания 12 В / 5 В

Источник с выходными напряжениями: двухполярным 12 В, однополярным 5 В, схема принципиальная которого показана на рисунке 3.16 обеспечивает питание датчиковой системы, микропроцессорных устройств. Источник построен с использованием ШИМ контроллера DA1 TL494 и двойного моста на транзисторах VT1...VT4. Структурная схема TL494 показана на рисунке 3.17.

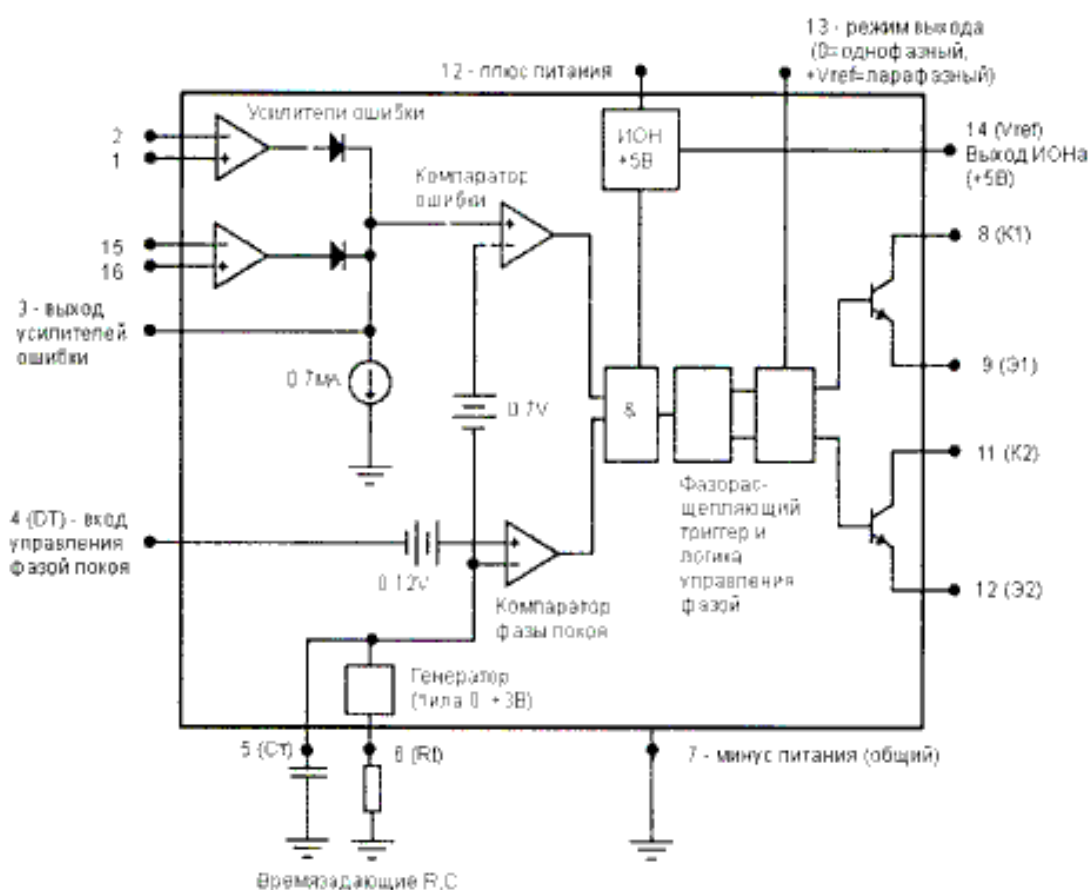


Рисунок 3.17 — Структурная схема ИС TL494

Цепи ИОНа и защиты от недонапряжения питания. Схема включается при достижении питанием порога 5,5..7,0 В (типовое значение 6,4В). До этого момента внутренние шины контроля запрещают работу генератора и логической части схемы. Ток холостого хода при напряжении питания +15В (выходные транзисторы отключены) не более 10 мА. ИОН +5В (+4,75..+5,25 В, стабилизация по выходу не хуже +/- 25мВ) обеспечивает вытекающий ток до 10 мА.

Генератор вырабатывает на времязадающем конденсаторе  $C_t$  (вывод 5) пилообразное напряжение 0..+3,0В (амплитуда задана ИОНом) для TL494 Texas Instruments и 0..+2,8В для TL494 Motorola, соответственно для  $T_i F=1,0/(R_t C_t)$ , для Моторолы  $F=1,1/(R_t C_t)$ .

Допустимы рабочие частоты от 1 до 300 кГц, при этом рекомендованный диапазон  $R_t = 1...500\text{кОм}$ ,  $C_t=470\text{пФ}...10\text{мкФ}$ . При этом типовой температурный дрейф частоты составляет +/-3%, а уход частоты в зависимости от напряжения питания - в пределах 0.1% во всем допустимом диапазоне.

Для дистанционного выключения генератора можно внешним ключом замкнуть вход  $R_t$  (6) на выход ИОНа, или - замкнуть  $C_t$  на землю. Сопротивление утечки разомкнутого ключа должно учитываться при выборе  $R_t$ ,  $C_t$ .

Вход контроля фазы покоя (скважности) через компаратор фазы покоя задает необходимую минимальную паузу между импульсами в плечах схемы. Это необходимо как для недопущения сквозного тока в силовых каскадах за пределами ИС, так и для стабильной работы триггера - время переключения цифровой части TL494 составляет 200 нс. Выходной сигнал разрешен тогда, когда пила на  $C_t$  превышает напряжение на управляющем входе 4 (DT). На тактовых частотах до 150 кГц при нулевом управляющем напряжении фаза покоя = 3% периода (эквивалентное смещение управляющего сигнала 100..120 мВ), на больших частотах встроенная коррекция расширяет фазу покоя до 200..300 нс.

Используя цепь входа DT, можно задавать фиксированную фазу покоя (R-R делитель), режим мягкого старта (R-C), дистанционное выключение (ключ), а также использовать DT как линейный управляющий вход. Входная цепь собрана на pnp-транзисторах, поэтому входной ток (до 1.0 мкА) вытекает из ИС а не втекает в нее. Ток достаточно большой, поэтому следует избегать высокоомных резисторов (не более 100 кОм). На TI, стр. 23 приведен пример защиты от перенапряжения с использованием 3-выводного стабилитрона TL430 (431).

Усилители ошибки - фактически, операционные усилители с  $K_u=70..95\text{дБ}$  по постоянному напряжению (60 дБ для ранних серий),  $K_u=1$  на 350 кГц. Входные цепи собраны на pnp-транзисторах, поэтому входной ток (до 1.0 мкА) вытекает из ИС а не втекает в нее. Ток достаточно большой для ОУ, напряжение смещения тоже (до 10мВ) поэтому следует избегать высокоомных резисторов в управляющих цепях (не более 100 кОм). Зато благодаря использованию pnp-входов диапазон входных напряжений - от -0.3В до  $V_{\text{питания}}-2\text{В}$ .

Выходы двух усилителей объединены диодным ИЛИ. Тот усилитель, на выходе которого большее напряжение, перехватывает управление логикой. При этом выходной сигнал доступен не порознь, а только с выхода диодного ИЛИ (он же вход компаратора ошибки). Таким образом, только один усилитель может быть

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

замкнут петлей ОС в линейном режиме. Этот усилитель и замыкает главную, линейную ОС по выходному напряжению. Второй усилитель при этом может использоваться как компаратор - например, превышения выходного тока, или как ключ на логический сигнал аварии (перегрев, КЗ и т.п.), дистанционного выключения и пр. Один из входов компаратора привязывается к ИОНу, на втором организуется логическое ИЛИ аварийных сигналов (еще лучше - логическое И сигналов нормальных состояний).

При использовании RC частотнозависимой ОС следует помнить, что выход усилителей - фактически одноканальный (последовательный диод!), так что заряжать емкость (вверх) он зарядит, а вниз - разрядит долго. Напряжение на этом выходе находится в пределах 0..+3,5В (чуть больше размаха генератора), далее коэффициент напряжения резко падает и примерно при 4,5В на выходе усилителя насыщаются. Аналогично, следует избегать низкоомных резисторов в цепи выхода усилителей (петли ОС).

Усилители не предназначены для работы в пределах одного такта рабочей частоты. При задержке распространения сигнала внутри усилителя в 400 нс они для этого слишком медленные, да и логика управления триггером не позволяет (возникали бы побочные импульсы на выходе). В реальных схемах ПН частота среза цепи ОС выбирается порядка 200-10000 Гц.

Триггер и логика управления выходами - при напряжении питания не менее 7В, если напряжение пилы на генераторе больше чем на управляющем входе DT, и если напряжение пилы больше чем на любом из усилителей ошибки (с учетом встроенных порогов и смещений) - разрешается выход схемы. При сбросе генератора из максимума в ноль - выходы отключаются. Триггер с парафазным выходом делит частоту надвое. При логическом 0 на входе I3 (режим выхода) фазы триггера объединяются по ИЛИ и подаются одновременно на оба выхода, при логической 1 - подаются парафазно на каждый выход порознь.

Выходные транзисторы - при Дарлингтоны со встроенной тепловой защитой (но без защиты по току). Таким образом, минимальное падение напряжение между коллектором (как правило замкнутым на плюсовую шину) и эмиттером (на нагрузке) — 1,5В (типовое при 200 мА), а в схеме с общим эмиттером - чуть лучше, 1,1 В типовое. Предельный выходной ток (при одном открытом транзисторе) ограничен 500 мА, предельная мощность на весь кристалл - 1Вт.

При работе на емкостную нагрузку, какой условно является затвор МДП транзистора, выходные транзисторы TL494 включаются эмиттерным повторителем. При ограничении среднего тока в 200 мА схема способна достаточно быстро зарядить затвор, но разрядить его выключенным транзистором невозможно. Разрядить затвор с помощью заземленного резистора - также неудовлетворительно медленно. Ведь напряжение на условной емкости затвора спадает по экспоненте, а для закрытия транзистора затвор надо разрядить от 10В до не более 3В.

Ток разряда через резистор будет всегда меньше тока заряда через транзистор.

Схема управления нагрузкой показана на рисунке 3.18. Цепь разряда через внешний pnp транзистор. При зарядке затвора ток, протекающий через диод,

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60



Схема защиты по току показана на рисунке 3.19. В правой части схемы - два типовых решения для TL494. Делитель Rdt1-Rdt2 задает максимальную скважность (минимальную фазу покоя). Например, при Rdt1=4.7кОм, Rdt2=47кОм на выходе 4 постоянное напряжение Udt=450мВ, что соответствует фазе покоя 18..22% (в зависимости от серии ИС и рабочей частоты).

При включении питания C<sub>ss</sub> разряжен и потенциал на входе DT равен V<sub>ref</sub> (+5В). C<sub>ss</sub> заряжается через R<sub>ss</sub> (она же Rdt2), плавно опуская потенциал DT до нижнего предела, ограниченного делителем. Это "мягкий старт". При C<sub>ss</sub>=47мкФ и указанных резисторах выходы схемы открываются через 0.1 с после включения, и выходят на рабочую скважность еще в течении 0.3-0.5 с.

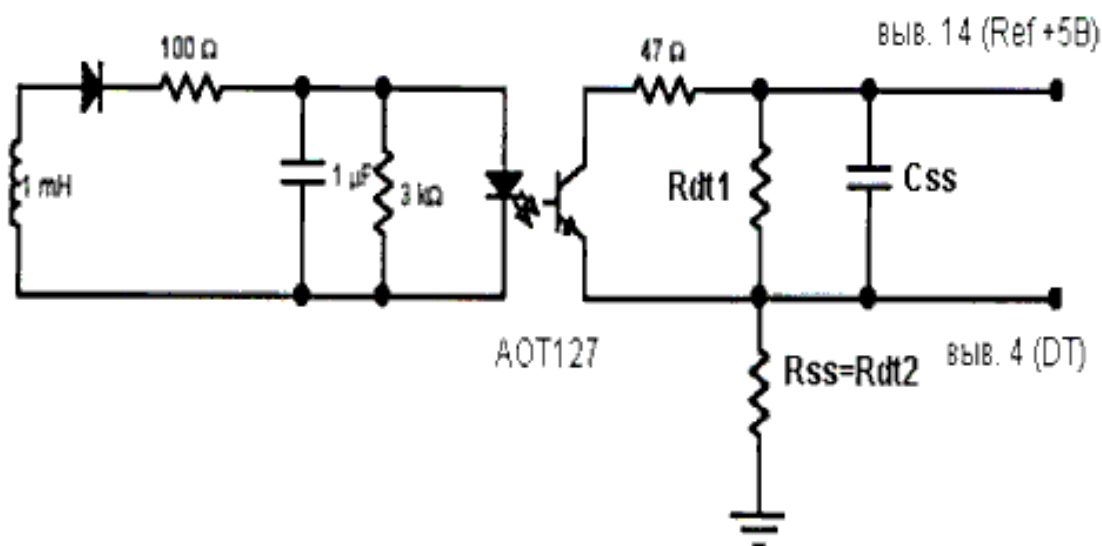


Рисунок 3.19 — Защита по переменному току первичной обмотки

В схеме, помимо Rdt1, Rdt2, C<sub>ss</sub> присутствуют две утечки - ток утечки оптрона (не выше 10 мкА при высоких температурах, порядка 0,1-1 мкА при комнатной температуре) и вытекающий из входа DT ток базы входного транзистора ИС. Чтобы эти токи не влияли существенно на точность делителя, Rdt2=R<sub>ss</sub> выбираем не выше 5 кОм, Rdt1 - не выше 100 кОм.

Разумеется, выбор именно оптрона и цепи DT для управления непринципиален. Возможно и использование усилителя ошибки в режиме компаратора, и блокировка емкости или резистора генератора (например, тем же оптроном) - но это именно выключение, а не плавное ограничение.

### 3.8.4 Схема драйверов транзисторов

Мощные полевые MOSFET-транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) являются базовыми элементами современной силовой электроники и используются в качестве элементов

									Лист
									62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				



коммутации больших токов и напряжений. Однако для согласования низковольтных логических управляющих сигналов с уровнями управления затвора MOSFET- и IGBT-транзисторов требуются промежуточные устройства согласования – высоковольтные драйверы (в дальнейшем, для краткости, под «высоковольтными драйверами» будем понимать «высоковольтные драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов»).

В большинстве случаев используется следующая классификация высоковольтных драйверов:

- а) независимые драйверы верхнего и драйверы нижнего плеча полумоста, интегрированные в одной микросхеме (High and Low Side Driver);
- б) драйверы верхнего и драйверы нижнего плеча, включенные по схеме полумоста (Half-Bridge Driver);
- в) драйверы верхнего плеча (High Side Driver);
- г) драйверы нижнего плеча (Low Side Driver).

На рисунке 3.20 показаны соответствующие этим типам драйверов схемы управления.

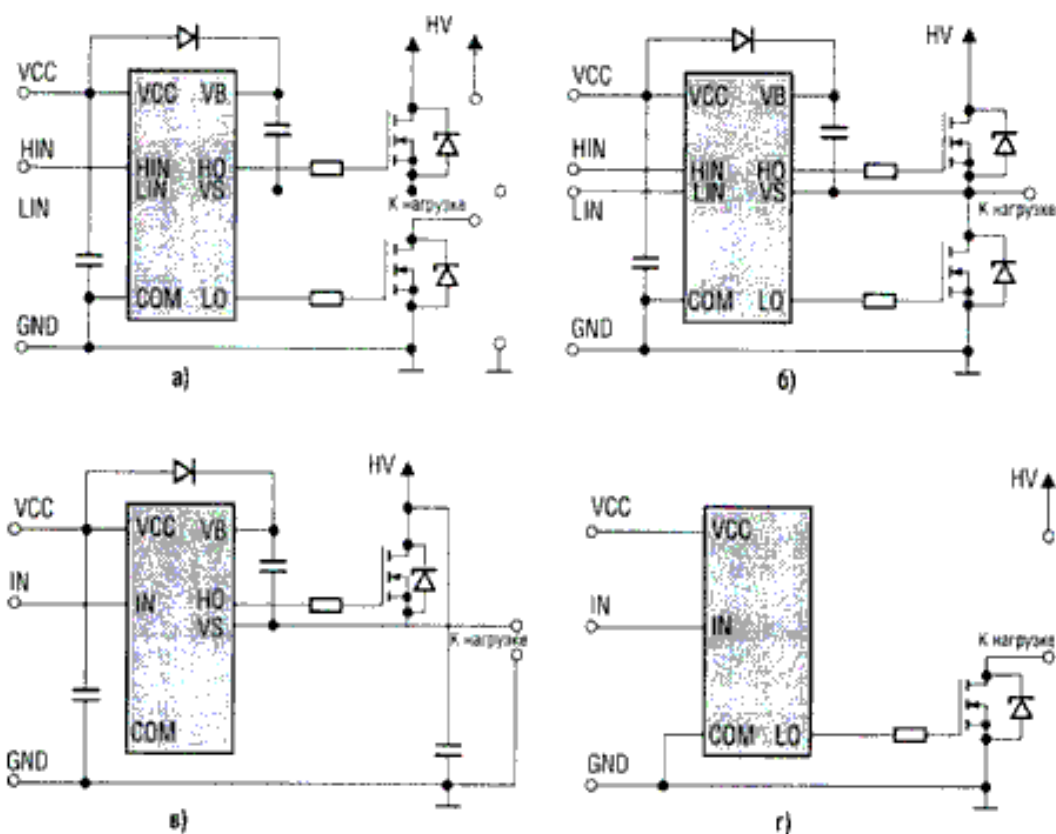


Рисунок 3.20 — Варианты схем включения драйверов IGBT-транзисторов

В первом случае (рисунок 3.20 а) управление двумя независимыми нагрузками осуществляется от единых управляющих сигналов. Нагрузки, соответственно, включаются между истоком нижнего транзистора и шиной высоковольтного питания (драйвер нижнего плеча), а также между стоком верхнего транзистора и землей (драйвер верхнего плеча). Так называемые средние точки (сток верхнего транзистора и исток нижнего транзистора) не соединены между собой.

Во втором случае (рисунок 3.20 б) средние точки соединены. Причем нагрузка может быть включена как на верхнее, так и на нижнее плечо, но подключена к средней точке аналогично полумостовой схеме (полная мостовая схема). Строго говоря, в схеме ничто не мешает соединить средние точки. Но в этом случае при определенной комбинации входных сигналов возможно одновременное открытие сразу двух транзисторов и, соответственно, протекание чрезмерно большого тока от высоковольтной шины на землю, что приведет к выходу из строя одного или сразу обоих транзисторов. Исключение подобной ситуации в данной схеме является заботой разработчика. В полумостовых драйверах (схема 3.20 б) подобная ситуация исключается на уровне внутренней логики управления микросхемы.

В третьем случае (рисунок 3.20 в) нагрузка включается между стоком верхнего транзистора и землей, а в четвертом (рисунок 3.20 г) – между истоком нижнего транзистора и шиной высоковольтного питания, т.е. отдельно реализованы две части схемы, показанной на рисунке 3.20 а.

Компания STMicroelectronics в последние годы ориентируется (в нише высоковольтных драйверов) только на драйверы первых двух типов (семейства L638x и L639x). Однако более ранние разработки содержат микросхемы драйверов, управляющих включением или выключением одиночного MOSFET-или IGBT-транзистора (категория «Single» в терминах компании STMicroelectronics). При определенной схеме включения данные драйверы могут управлять нагрузкой как верхнего, так и нижнего плеча. Отметим также микросхему TD310 – три независимых одиночных драйвера в одном корпусе. Такое решение будет эффективным при управлении трехфазной нагрузкой. Данную микросхему компания STMicroelectronics относит к драйверам категории «Multiple».

Микросхемы независимых драйверов верхнего и нижнего плеча управляются по входам HIN и LIN. Причем высокий уровень логического сигнала включает, соответственно, верхнее или нижнее плечо драйвера. В микросхеме L6386E помимо этого используется дополнительный вход SD, отключающий оба плеча независимо от состояния на входах HIN и LIN.

В микросхеме L6384E применяются сигналы SD и IN. Сигнал SD отключает оба плеча независимо от состояния на входе IN. Сигнал  $IN = 1$  эквивалентен комбинации сигналов  $\{HIN = 1, LIN = 0\}$  и, наоборот,  $IN = 0$  эквивалентен комбинации сигналов  $\{HIN = 0, LIN = 1\}$ . Таким образом, одновременное включение транзисторов верхнего и нижнего плеча невозможно в принципе.

В микросхеме L6388E управление осуществляется по входам HIN и LIN, поэтому принципиально возможно подать на входы комбинацию  $\{HIN = 1, LIN = 1\}$ , однако внутренняя логическая схема преобразует ее в комбинацию  $\{HIN = 0, LIN = 0\}$ , исключив, таким образом, одновременное включение обоих транзисторов.

Значение VOFFSET, равное 600 Вольт, является в каком-то смысле стандартом для микросхем данного класса.

									Лист
									64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

Значение выходного тока IO+ (IO-), равное 400/650 мА, является показателем средним, ориентированным на типовые транзисторы общего назначения. Если сравнивать с микросхемами семейства IRS (поколение G5 HVIC), то компания International Rectifier предлагает, главным образом, микросхемы с параметром 290/600 мА. Однако в линейке International Rectifier есть также модели с параметрами 2500/2500 мА (IRS2113) и несколько меньшим быстродействием или микросхемы с выходными токами до 4000/4000 мА (IRS2186).

Правда, в этом случае время переключения по сравнению с L6385E увеличивается до значения 170/170 нс. Значения времени переключения TON (TOFF), равные 110/105 нс (для L6385E), превышают аналогичные значения микросхем семейства IRS (пусть и не очень значительно). Лучших показателей (60/60 нс) компания International Rectifier добилась в модели IRS2011, но за счет снижения напряжения VOFFSET до 200 В.

Однако отметим, что компания STMicroelectronics предлагает драйверы, в которых общий провод входного (низковольтного) и выходного (высоковольтного) каскадов – единый. Компания International Rectifier, помимо микросхем с аналогичной архитектурой, предлагает драйверы с отдельными общими шинами для входного и выходного каскадов.

Сравнивая параметры драйвера полумостовой схемы L6384E с изделиями International Rectifier, можно сделать вывод, что он уступает (и по выходным токам, и по быстродействию) только модели IRS21834, в которой реализована входная логика HIN/-LIN. Если критичной является входная логика IN/-SD, то драйвер L6384E превосходит по своим параметрам изделия International Rectifier.

Безусловно, номенклатуру высоковольтных драйверов компании STMicroelectronics нельзя признать очень широкой (хотя бы в сравнении с аналогичными изделиями компании International Rectifier). Тем не менее, количественные и качественные характеристики рассмотренных семейств не уступают лучшим изделиям IR.

Говоря о драйверах MOSFET- и IGBT-транзисторов, нельзя не упомянуть и сами транзисторы; компания STMicroelectronics выпускает достаточно широкую линейку полевых (например MDMESH V и SuperMesh3) и биполярных транзисторов с изолированным затвором. Эти электронные компоненты освещаются в статьях [17, 18].

### 3.8.5 Вспомогательный контроллер

Схема подключения вспомогательного контроллера показана на рисунке 3.21.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

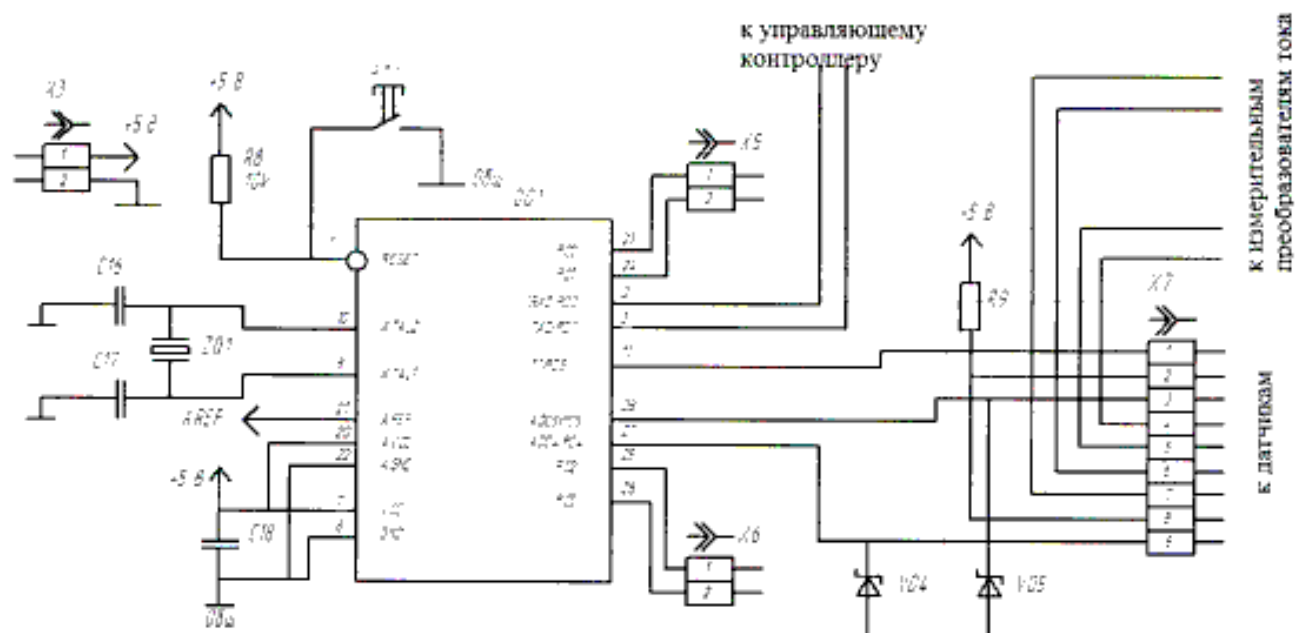


Рисунок 3.21 — Схема подключения вспомогательного контроллера

Микропроцессорный контроллер DD1 ATmega48 получает питание от источника 5 В (разъем X3). К данному разъему также подключены входы питания датчиков температуры — выводы 2 и 8 разъема X7. Схема тактирования собрана на конденсаторах C16-C17 и кварцевого резонатора ZQ1. Схема подключена к выводам XTAL1 и XTAL2 микроконтроллера. Для обмена данными с управляющим контроллером предусмотрен последовательный интерфейс — выводы PD0 и PD1 вспомогательного контроллера. Управление включением тормозного резистора осуществляется посредством параллельного интерфейса (выводы PC0 и PC1 микроконтроллера). Сигнал с датчика напряжения подается на аналоговые входы PC2, PC3. Энкодер подключается к выводу PD5 таймера T1. Датчики температуры подключены к аналоговым входам PC4, PC5. Диоды VD4, VD5 обеспечивают защиту входных схем микроконтроллера от обратных токов датчиков.

### 3.8.6 Схема связи с ЧПУ и панелью управления.

Для обмена данными с СЧПУ станка и панелью управления используется преобразователь интерфейсов. Схема подключения преобразователя показана на рисунке 3.22



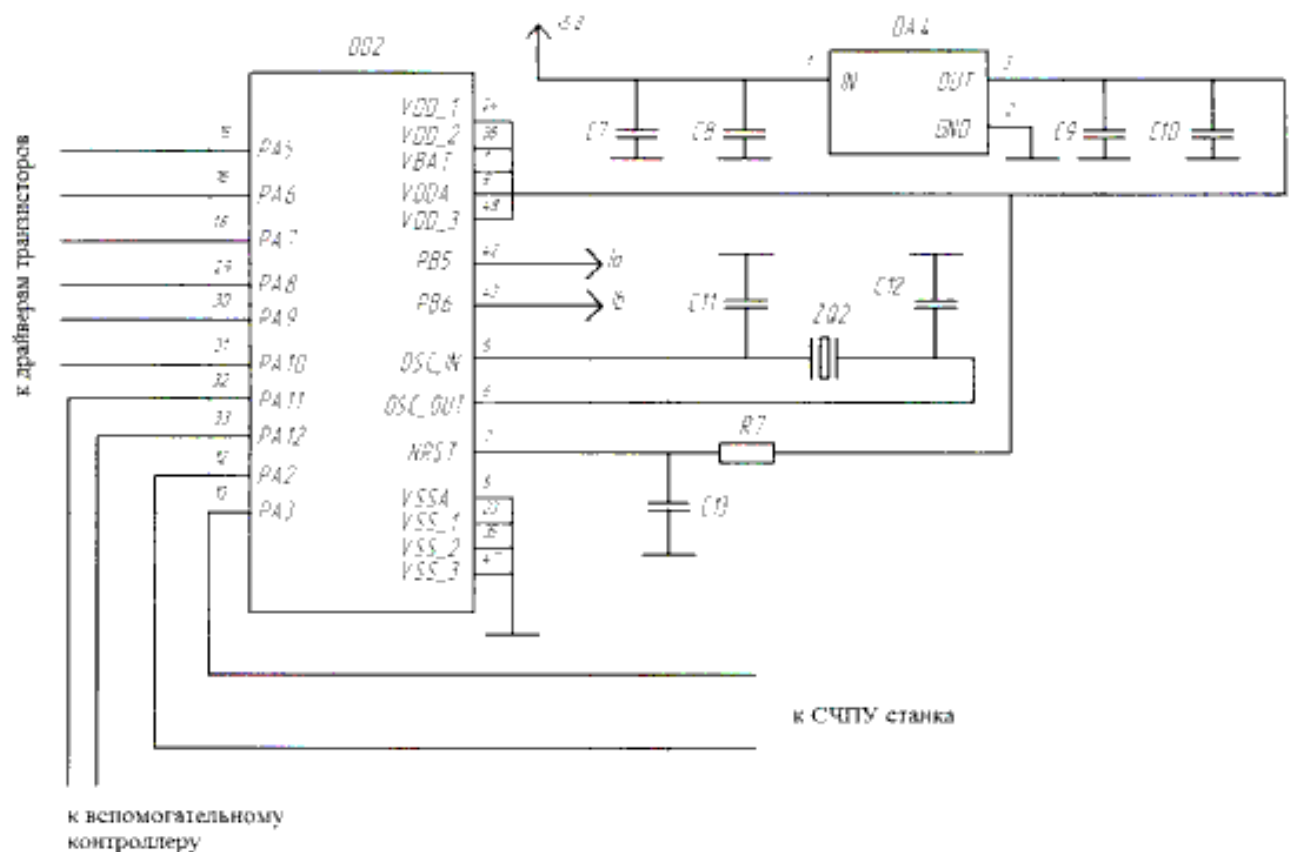


Рисунок 3.23 — Схема подключения хост-контроллера

### 3.8.8 Измерительные преобразователи токов

Датчики Холла состоят из первичных преобразователей, устанавливаемые на фазовые проводники в цепи двигателя и преобразователей. Схема подключения преобразователей показана на рисунке 3.24

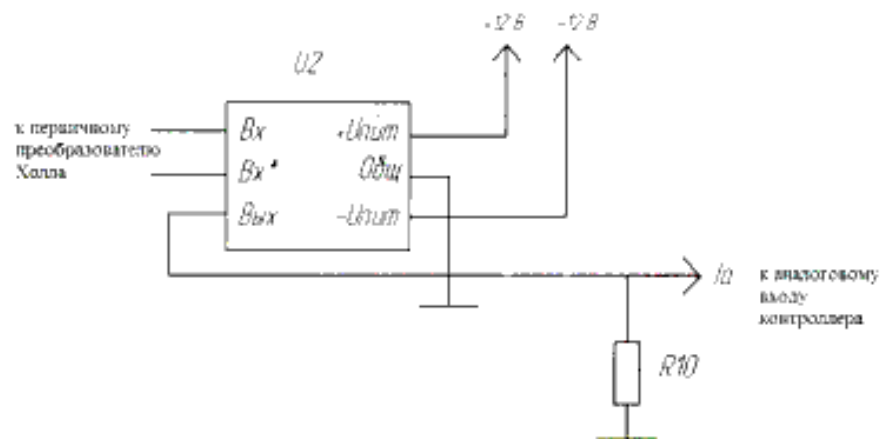


Рисунок 3.24 — Схема подключения измерительного преобразователя тока  
Измерительный преобразователь получает двухполярное напряжение питания 12 В от источника. Первичный преобразователь подключается к выводам Vx блока U2. Выходной сигнал постоянного тока снимается с вывода Vyx.

### 3.9 Выбор защитной аппаратуры

Для защиты электрооборудования применим автоматические выключатели. Выключатели предназначены для проведения тока в нормальном режиме и отключения тока при перегрузках и коротких замыканиях в цепях, нечастых оперативных коммутаций электрических цепей, а также для защиты электрических цепей при снижении напряжения до недопустимой величины. Выключатели предназначены для работы в электрических цепях с номинальным напряжением постоянного тока до 440 В, переменного тока до 500 В частотой 50; 60 Гц, для проведения тока в нормальном режиме и отключения при коротких замыканиях и перегрузках, а также для нечастых (до 10 раз в сутки) оперативных коммутаций этих цепей.

Номинальный ток выключателя  $I_n$  - максимальное значение тока (переменного или постоянного), протекающего в длительном режиме через автоматический выключатель при нормальных условиях эксплуатации. Уставка по току срабатывания в зоне токов короткого замыкания - такое значение тока, переменного или постоянного, при котором происходит практически мгновенное срабатывание автоматического выключателя с разрывом электрической цепи. Уставка по току срабатывания в зоне токов короткого замыкания нормируется либо в единицах тока, либо как величина, кратная току  $I_n$ .

Определим ток короткого замыкания по формуле:

$$I_{кк} = \frac{U_{\phi}}{Z_n + Z_t} = \frac{380}{0,06 + 0,003} = 6032 \text{ А}, \quad (3.9)$$

где  $U_{\phi}$  — фазное напряжение сети,  $U_{\phi}=380 \text{ В}$ ;

$Z_n$  — сопротивление петли фаза-нуль, принимаем  $Z_n=0,06 \text{ Ом}$ ;

$Z_t$  — полное сопротивление фазной обмотки трансформатора на стороне низшего напряжения, принимаем  $Z_t=0,003 \text{ Ом}$ .

Выбираем автоматические выключатели по номинальным значениям напряжения и тока. Результат выбора показан в таблице 3.5

Таблица 3.5 — Выбор автоматических выключателей

Марка автоматического выключателя	Характеристики
DEKRAFT 11058DEK	Номинальное напряжение: 230 В; Номинальный ток 10 А;
EZC250N	Номинальное напряжение: 380 В; Номинальный ток 160 А;

Выбранные автоматические выключатели проверяем по чувствительности и по отключающей способности. Автоматы должны срабатывать приближенным

$$1,4 I_{ЭМР} \leq I_{ОКЗ} \quad (3.10)$$

где  $I_{ОКЗ}$  — ток однофазного короткого замыкания.

Отключающая способность автомата с электромагнитным расцепителем определяется величиной тока трехфазного короткого замыкания  $I_{ТКЗ}$ :

$$I_{ЭМРоткл} \leq I_{ТКЗ} \quad (3.11)$$

Выбранные автоматические выключатели удовлетворяют условиям (3.10) и (3.11) так как для EZC250N:

$$H_2 = H_1 - H_1 = 0,016 - 0,007 = 0,009 \text{ Па.}$$

Для автоматического выключателя ВА47-29-3P 25 А аналогично:

$$210 = 1,4 \cdot 150 \leq I_{ОКЗ} = 6032 \text{ A} \leq I_{ЭМРоткл} \leq 3 \cdot I_{ОКЗ} = 18095 \text{ A.}$$

### 3.10 Исследование переходных процессов

Для исследования динамики электропривода воспользуемся разработанной системой дифференциальных уравнений и структурной схемой нелинейной модели асинхронного двигателя [19].

Запишем систему уравнений определяющих динамику асинхронного двигателя при частотном регулировании:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(1+T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\alpha} = \gamma^* \cdot \omega_1 - \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\alpha} - T_1 \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu\beta} \\ -(1+T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\beta} = \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\beta} + \omega_1 \cdot T_1 \cdot i_{\mu\alpha} \\ -(1+T_2 \cdot p) \cdot i_{2\alpha} = T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\alpha} - (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\beta} \\ (1+T_2 \cdot p) \cdot i_{2\beta} = T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\alpha} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\alpha} \\ M = \frac{3}{2} \cdot p_{fl} \cdot L_0 \cdot (i_{\mu\beta} \cdot i_{2\alpha} + i_{\mu\alpha} \cdot i_{2\beta}) \\ M = J \cdot p \cdot \omega + M_c \\ \omega = p_{fl} \cdot \omega_{дв} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

где  $T_1$  — постоянная времени статорной цепи;

$T_2$  — постоянная времени роторной цепи;

$L_0$  — индуктивность главного поля;

$L_1$  — индуктивность статора;

									Лист
									70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				



$L_2$  – индуктивность ротора;  
 $T_{32}$  – постоянная времени полного потока рассеивания;  
 $\gamma_0$  – коэффициент, учитывающий связь между амплитудой и частотой питающего напряжения;  
 $p$  – число пар полюсов;  
 $J$  – момент инерции двигателя;

Построим структурную схему нелинейной модели асинхронного двигателя по системе уравнений (3.12). Схема показана на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 — Структурная схема частотно-регулируемого привода

Вычислим значения индуктивностей при нормальном режиме, которые считаем постоянными на всех частотах.

Индуктивность статора и ротора определяется по выражениям (3.13-3.14):

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{314} = \frac{0,1716 + 6,16}{314} = 0,02 \text{ Гн} \quad (3.13)$$

$$L_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{314} = \frac{0,0286 + 6,16}{314} = 0,0197 \text{ Гн} \quad (3.14)$$

где  $X_1$ ,  $X_2$  – реактивные сопротивления цепей статора и ротора, по паспортным данным выбранного двигателя,  $X_1=0,1716$  Ом,  $X_2=0,0286$  Ом;

$X_\mu$  – реактивное сопротивление цепи намагничивания, принимаем  $X_\mu=6,16$  Ом.

Индуктивность главного поля равна:

$$L_0 = \frac{X_\mu}{314} = \frac{6,16}{314} = 0,0196 \text{ Гн} \quad (3.15)$$



д) коэффициент стабилизации  $K_{ст} = [1...3]R_s$ , (по умолчанию установлено значение  $K_{ст} = R_s$ );

е) постоянная времени токовой отсечки  $T_{то} = [1K3]T_s$ , (по умолчанию установлено значение  $T_{то} \cong 3 T_s$ ),

На основании разработанных математических моделей объектов управления главным приводом, с помощью численных значений параметров составных элементов объектов управления в программной среде VisSim создадим вычислительную модель. Произведем исследования динамики ОУ.

Результаты исследования динамики электропривода при настройке на технологический оптимум показаны на рисунке 3.26

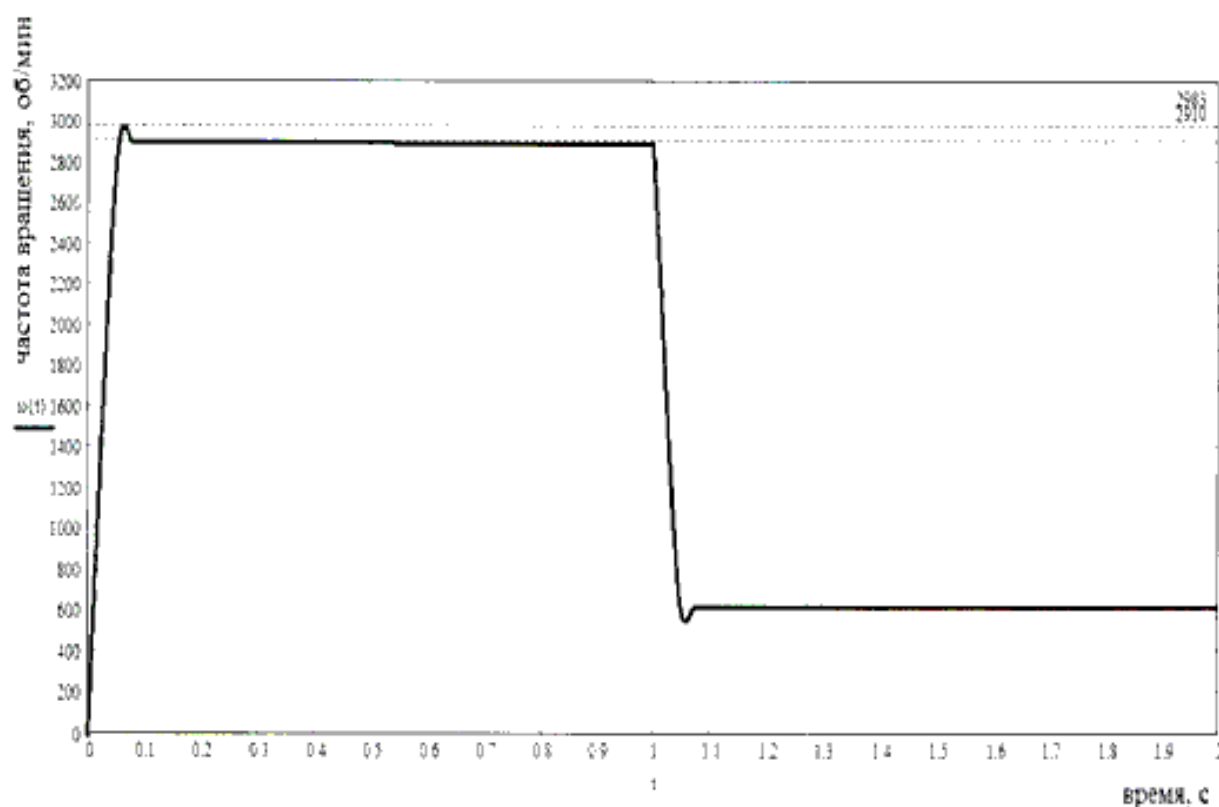


Рисунок 3.26 — Исследование динамики работы привода при настройке на оптимум

В первой части графика показано изменение скорости вращения вала двигателя при  $t=0$  до номинальной частоты вращения, во второй, при  $t=1$  с — реакция системы управления приводом на скачкообразное изменение сигнала задания на 60 %.

Таким образом, время переходного процесса составляет 0,07 с. Величина перерегулирования составит:

$$\sigma = \frac{N_{\max} - N_{у\text{ст}}}{N_{\max}} \cdot 100 = \frac{2983 - 2910}{2910} \cdot 100 = 2,4\%, \quad (3.21)$$

что находится в пределах зоны 5%, которую обеспечивают современные электроприводы.

Уменьшение коэффициента пропорциональности технологического регулятора приводит увеличению длительности переходного процесса, увеличение — к росту значения перерегулирования.

Исследуем систему управления электроприводом на устойчивость при скачкообразном изменении нагрузки на валу двигателя. График переходного процесса при приложении нагрузки к валу и снятии нагрузки показан на рисунке 3.27.

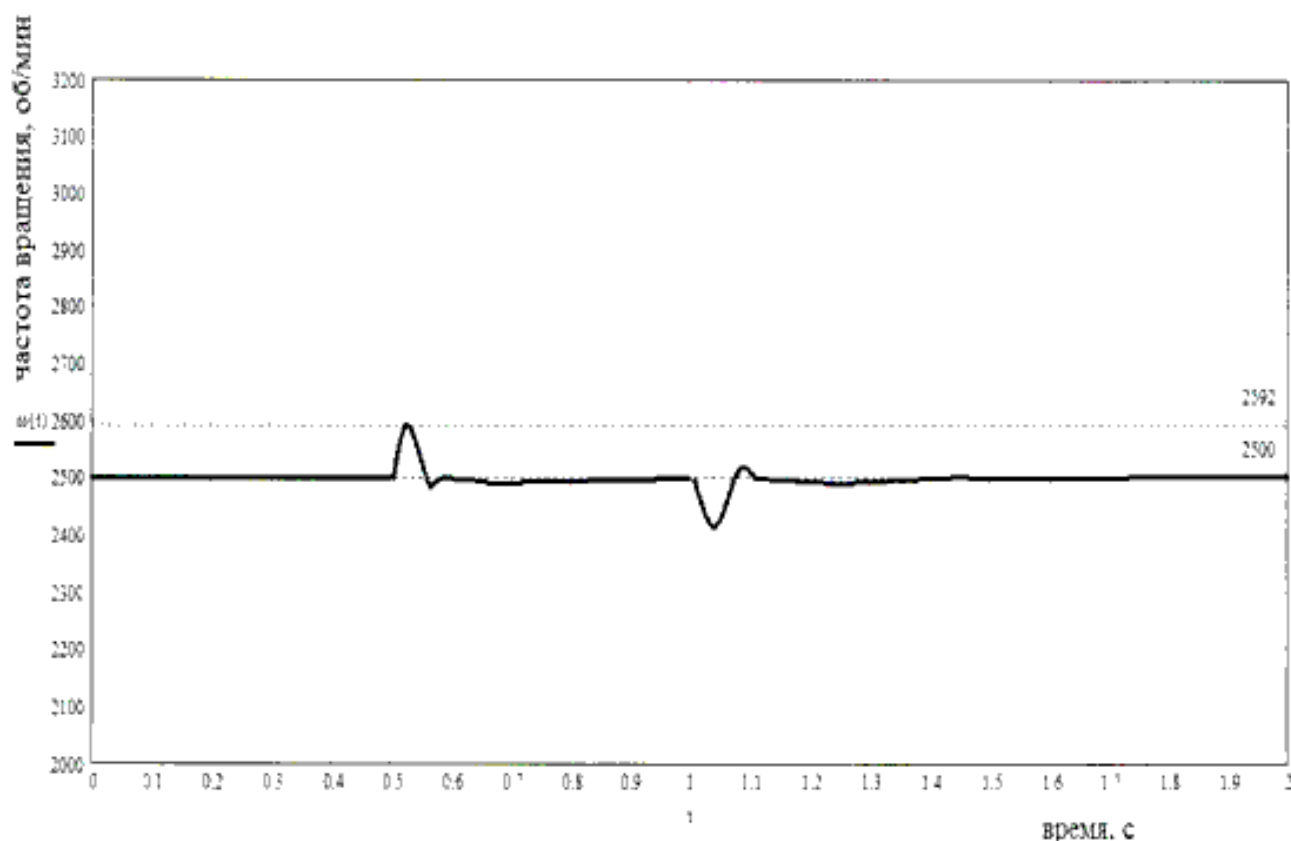


Рисунок 3.27 — Исследование динамики привода при изменении нагрузки

На представленном графике наблюдаем, что система остается устойчивой как при увеличении момента на валу, так и при его уменьшении. Время переходного процесса при этом составляет не более 0,1 с, а величина перерегулирования:

$$\sigma = \frac{N_{\max} - N_{у\text{с}}}{N_{\max}} \cdot 100 = \frac{2500 - 2592}{2592} \cdot 100 = 3,5\% \quad (3.22)$$

Таким образом, внутренний контур регулирования системы управления электроприводом обладает достаточным запасом по устойчивости, а быстродействие и величина перерегулирования соответствуют заявленным характеристикам.

### 3.11 Разработка системы диагностики и защиты

Система диагностики и защит реализует две группы защит: быстродействующие, срабатывание которых мгновенно блокирует привод, сбрасывает флаг состояния «Готовность привода 1», отключает силовое питание преобразователя, и медленнодействующие, мгновенно сбрасывающие флаг состояния «Готовность привода 2» при достижении порога перегрузки (перегрева) и блокирующие привод с выдержкой времени в случае, если нагрузка (температура) не снижается. Схема программно-реализованной системы защит показана на рисунке 3.28.

К первой группе защит относятся:

- а) максимально-токовая защита преобразователя;
- б) защита от превышения максимально допуст. температуры кристаллов IGBT;
- в) защита от недопустимых отклонений питающего напряжения;
- г) защиты от ошибок системы управления;
- д) защита от аварии узла сброса энергии.

Защита от замыканий во входных цепях и внутренних замыканий выпрямителя на корпус выполняется внешним автоматическим выключателем.

Максимально-токовая защита инвертора – двухуровневая. Первый уровень защиты выполняется программно, путем сравнения мгновенных значений тока в выходных фазах с максимально допустимыми для установленного в преобразователе IGBT-модуля. Срабатывание первого уровня защиты диагностируется установкой флага «ПРЕВЫШЕНИЕ ТОКА В ФАЗАХ».

Второй уровень защиты – контроль насыщения IGBT, выполняется аппаратными средствами драйвера при возникновении режима короткого замыкания выходных фаз между собой или на «землю». Диагностируется установкой флага «КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ».

Защита от превышения максимально допустимой температуры кристаллов IGBT реализуется на основе динамической тепловой модели. Модель, работающая в масштабе реального времени, выполняет расчет статических и динамических потерь и мгновенных значений перегрева кристаллов каждого из шести IGBT-ключей инвертора относительно корпуса модуля. Входными переменными модели являются мгновенные значения токов выходных фаз  $I_a$ ,  $I_b$ , выпрямленного напряжения  $U_{dc}$ , и температуры корпуса IGBT-модуля и сигналы управления, формируемые векторным модулятором. Срабатывание защиты при достижении расчетного значения температуры любого из IGBT предельно допустимой величины 125 °С диагностируется флагом «ПЕРЕГРЕВ КРИСТАЛЛА IGBT».

Защиты от недопустимого повышения и понижения напряжения выполняются по сигналу датчика в звене постоянного напряжения. Порог срабатывания защиты от повышения напряжения составляет 700 В. Порог срабатывания защиты от понижения напряжения и обрыва фазы составляет -15% от номинального значения напряжения питающей сети. Срабатывание диагностируется соответственно флагами «НАПРЯЖЕНИЕ ВЫШЕ ДОПУСТИМОГО» и «НАПРЯЖЕНИЕ НИЖЕ ДОПУСТИМОГО».

									Лист
									75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

Защита выпрямителя от импульсных сетевых перенапряжений выполняется установленными на входе варисторами.

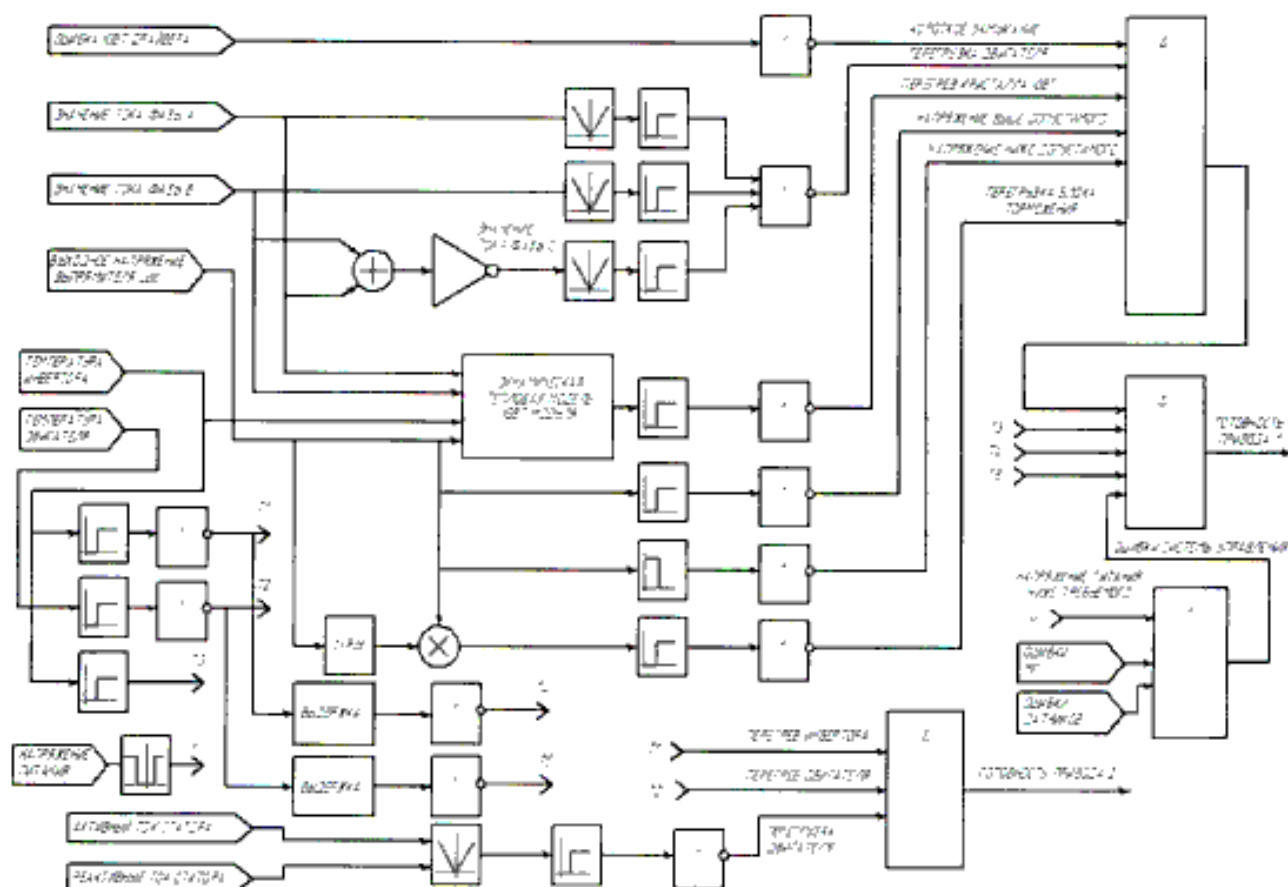


Рисунок 3.28— Структурная схема системы диагностики

Защита от аварии узла сброса энергии выполняется путем контроля пределов использования балластного резистора. Для корректной работы защиты должны быть установлены параметры подключенного резистора  $R_{бр}$ ,  $P_{бр}$ ,  $K_{бр}$ ,  $T_{бр}$  в меню «ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ / БАЛЛАСТНЫЙ РЕЗИСТОР». Срабатывание защиты диагностируется установкой флага «ПЕРЕГРУЗКА БЛОКА ТОРМОЖЕНИЯ».

Время выдержки до срабатывания защиты определяется по формуле 3.23:

$$T_{\text{выдержки}} = T \cdot \ln\left(\frac{K}{K-1}\right) = 27 \cdot \ln\left(\frac{4}{4-1}\right) = 7,8 \text{ с}, \quad (3.23)$$

где  $K = \frac{U_{dc}^2}{R_{бр} \cdot P_{бр}}$  - текущая кратность перегрузки по мощности резистора  $K=4$ ,

$U_{dc}$  - текущее значение напряжения на конденсаторах фильтра,

$R_{бр}$  - сопротивление подключенного балластного резистора,

$P_{бр}$  - мощность подключенного балластного резистора,

$T_{бр}$  - нормированное время действия перегрузки (по умолчанию - 30 с),

$K_{бр}$  - нормированная кратность перегрузки (по умолчанию - 1.5).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$T = \frac{T_{\text{ср}}}{\ln\left(\frac{K_{\text{ср}}}{K_{\text{ср}} - 1}\right)} - \text{постоянная времени модели нагрева } T=27,3 \text{ с,}$$

Защиты от ошибок системы управления диагностируются следующими флагами:

- а) отклонение напряжений питания цепей управления сверх допуст. пределов;
- б) сбой в процессорном ядре;
- в) ошибка тестирования датчиков тока;
- г) ошибка тестирования датчика напряжения;

Ко второй группе защит относятся:

- а) температурная защита преобразователя;
- б) температурная защита двигателя;
- в) время-токовая защита двигателя.

Температурная защита преобразователя выполняется по сигналам датчиков, установленных в силовых модулях инвертора и выпрямителя, и настроена на максимально допустимую рабочую температуру. При достижении температуры корпуса любого из модулей 90 °С сбрасывается флаг «Готовность привода 2». При температуре 95 °С привод блокируется, сбрасывается флаг «Готовность привода 1», отключается силовое питание преобразователя.

При достижении температурой двигателя порогового значения сбрасывается сигнал «Готовность привода 2». Если температура продолжает расти, то через время, установленное параметром  $T_{\text{тз}}$  сбрасывается сигнал «Готовность привода 1». Требуемый порог срабатывания защиты может быть скорректирован с помощью подстроечного резистора RV1 на интерфейсной плате.

Действие время-токовой защиты двигателя программируется параметрами  $I_{2\text{T}}$ ,  $K_{12\text{T}}$  и  $T_{12\text{T}}$  в меню «НАБОР ПАРАМЕТРОВ / ПАРАМЕТРЫ ЗАЩИТ». Порог активизации защиты  $I_{2\text{T}}$  задается в процентах от номинального тока двигателя  $I_{\text{с ном}}$  (меню «НАБОР ПАРАМЕТРОВ / ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЯ»). При достижении током установленного значения сбрасывается сигнал «Готовность привода 2». Если нагрузка не снижается, то преобразователь блокируется с выдержкой времени, определяемой формулой (3.24):

$$T_{\text{выдержки}} = T \cdot \ln\left(\frac{K^2}{(K^2 - 1)}\right) = 51 \cdot \ln\left(\frac{3^2}{(3^2 - 1)}\right) = 6 \text{ с,} \quad (3.24)$$

где  $K = \frac{I_{\text{с}}}{I_{2\text{T}}}$  - текущая кратность перегрузки по току двигателя,  $K=3$ ;

$I_{\text{с}}$  - текущее действующее значение тока фазы статора двигателя;

$T_{12\text{T}}$  - пороговое значение тока фазы статора двигателя, соответствующее установке время-токовой защиты  $I_{2\text{T}}$ ;

$$T = \frac{T_{12\text{T}}}{\ln\left(\frac{K_{12\text{T}}^2}{K_{12\text{T}}^2 - 1}\right)} - \text{постоянная времени модели нагрева, } T=51 \text{ с;}$$

$T_{12\text{T}}$  - нормированное время действия перегрузки (по умолчанию - 30 с),

									Лист
									77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

$K_{12T}$ - нормированная кратность перегрузки (по умолчанию - 1.5).  
Характеристика время-токовой защиты показана на рисунке 3.29.

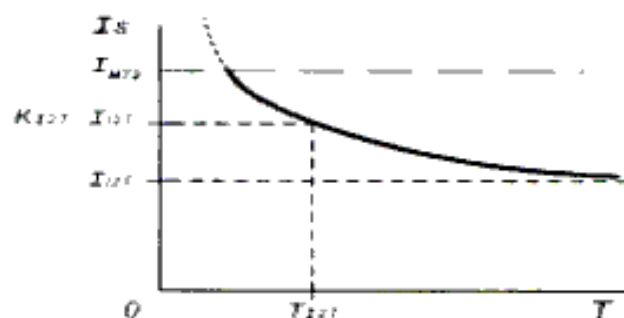


Рисунок 3.29 — Характеристика время-токовой защиты

Разблокирование привода и сброс флагов защит выполняется входным логическим сигналом «Сброс защит» или отключением питания. Флаги срабатывания защит второй группы могут быть сброшены только при снижении температуры преобразователя (двигателя) до установленного значения или с выдержкой времени, эквивалентной времени остывания двигателя после перегрузки.

Состояние флагов защит для последних 4 отключений сохраняются в энергонезависимой памяти контроллера. Они отображаются в меню «ИСТОРИЯ ОТКЛЮЧЕНИЙ» с указанием даты и времени отключения.

Выводы по разделу три

В ходе работы над разделом были рассмотрены варианты систем управления электроприводами, после чего была выбрана система векторного управления по принципу постоянства  $U/f$  с датчиками скорости и тока в качестве звена обратной связи. На основании системы уравнений составлена структурная схема электропривода, содержащая технологический регулятор, частотный преобразователь, блока частотного токоограничения, блоков вычисления параметров электродвигателя, табличного преобразователя напряжения и преобразователей координат.

Спроектирована функциональная схема. В качестве хост-контроллера выбран STM32вспомогательного контроллера — ATmega8. Для обеспечения обратной связи выбраны датчик скорости — энкодер ЛИР-158, датчики тока на эффекте Холла ДТХ-150, датчики температуры DS18B20.

Спроектирована принципиальная схема системы управления электроприводом, состоящая из силовой части — преобразователя частоты и блоков питания, микропроцессорной части и датчиковой системы. Произведен расчет постоянных времени статора и ротора двигателя. После настройки технологического регулятора на оптимум, по математической модели проведено исследование динамики электропривода. Разработана аппаратно-программная система диагностики для реализации защит привода.



#### 4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

##### 4.1 Исходные данные для расчета экономического эффекта от модернизации

Проведенная модернизация обрабатывающего центра ИР-500 позволила снизить штучное время на обработку деталей.

Рассчитаем годовой экономический эффект от модернизации.

В качестве детали – представителя для проведения расчетов выбрана деталь «корпус».

База для сравнения вариантов – обрабатывающий центр ИР-500 до модернизации.

Исходные данные представлены в таблицах 4.1-4.3.

Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета затрат на модернизацию станка

Показатели	Условное обозначение	Единица измерения	Значение
Часовая тарифная ставка рабочих, участвующих в проведении модернизации	$ЧТС_m$	руб./час	95
Суммарная трудоемкость работ по модернизации	$T_{рм}$	час	160
Коэффициент, учитывающий заработную плату	$K_{лз}$	-	1,2
Районный коэффициент	$K_{урал}$	-	1,15
Коэффициент отчислений на социальные нужды	$K_{сн}$	-	1,3
Коэффициент, учитывающий прочие (накладные) расходы на модернизацию оборудования	$K_{прм}$	-	2,9
Стоимость базового оборудования (после кап. Ремонта)	$Ц_{обнмод}$	тыс.руб.	2 850
Общая стоимость комплектующих изделий, заменяемых в ходе проведения модернизации	$C_{змкомпн}$	тыс.руб.	127,85

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчета затрат на комплектующие изделия для модернизации станка

Наименование комплектующих изделий	Количество, шт	Цена, руб
Частотный привод ЭПВ-Т-ТЕ-Т 32-380-2АП-УХЛ4	1	85000
Асинхронный двигатель 4AM160S2	1	19000
Хост-контроллер ARM-32 bit Cortex-M4	1	750
Вспомогательный контроллер Atmel megaAVR ATMega8	1	300
LCD дисплей MT-16S2H	1	500
Датчик скорости ЛИР-158	1	13500
Датчик тока ДТХ-150	1	2000
Датчик температуры DS18B20	1	200
Автоматический выключатель DEKRAFT 11058DEK	1	100
Автоматический выключатель EZC250N	1	4500
Соединительные провода	-	2500
Крепежные элементы	-	1500

Таблица 4.3-Исходные данные для расчета экономического эффекта от применения модернизированного оборудования

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Базовый вариант	Модерниз. вариант
Штучное время	$t_{шт}$	мин/шт.	390	350
Годовая программа	$N_{вып}$	Шт/год	330	330
Количество смен в день	$h_{смен}$	смен/ день	1	1
Количество часов работы в смену	$F_{смен}$	час/смен	8	8

Продолжение таблицы 4.3

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Базовый вариант	Модерниз. вариант
Коэффициент потерь времени на ремонт и наладку оборудования	$K_{рн}$	-	0,95	0,95
Стоимость оборудования	$C_{об}$	руб	2 850 000	2 850 000
Стоимость 1м <sup>2</sup> здания	$C_{зд}$	руб./м <sup>2</sup>	7500	7500
Площадь здания, занимаемая единицей оборудования	$S_{об}$	м <sup>2</sup>	25	25
Коэффициент, учитывающий дополнительную производственную площадь	$K_{доп}$	-	1,2	1,2
Часовая тарифная ставка	ЧТС	Руб/час	34	34
Стоимость 1кВт-ч электроэнергии	$C_{эл}$	руб./кВт-ч	3,5	3,5
Мощность оборудования	$M_{об}$	кВт	45	45
Норма годовых амортизационных отчислений для оборудования	$H_{чоб}$	%	10	10
Норма годовых амортизационных отчислений для здания	$H_{зд}$	%	2,5	2,5
Нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений	$E_n$	-	0,15	0,15

Окончание таблицы 4.3

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Базовый вариант	Модерниз. вариант
Норма годовых затрат на текущий ремонт оборудования	$N_{\text{ремоб}}$	%	3	3
Норма годовых затрат на текущий ремонт здания	$N_{\text{ремзд}}$	%	1	1
Норма годовых затрат на содержание здания	$N_{\text{содзд}}$	%	3	3
Цена инструмента	$C_{\text{инстр}}$	руб./шт.	1500	1500
Срок службы инструмента	$T_{\text{слинстр}}$	мин	4800	4800

#### 4.2 Расчет затрат на проведение модернизации

4.2.1 Расчет заработной платы, участвующих в проведении модернизации, с отчислениями

Годовая заработная плата с отчислениями, ( $C_{\text{зп}}$ , руб.) рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{зп}} = \text{ЧТС}_m \cdot T_{\text{рм}} \cdot K_{\text{дз}} \cdot K_{\text{урал}} \cdot K_{\text{соц}} \quad (4.1)$$

где  $\text{ЧТС}_m$  - часовая тарифная ставка, участвующих в модернизации руб./час;

$T_{\text{рм}}$  - суммарная трудоемкость работ по модернизации оборудования

$K_{\text{дз}}$  - коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату;

$K_{\text{урал}}$  - районный коэффициент;

$K_{\text{соц}}$  - коэффициент отчислений на социальные нужды.

Подставим данные таблицы 4.1 в формулу 4.1, получим:

$$C_{\text{зп}} = 95 \cdot 160 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,3 = 27\,268,8 \text{руб.}$$

4.2.2 Расчет затрат на комплектующие изделия для модернизации оборудования

Расчет затрат на комплектующие изделия для модернизации оборудования ( $C_{\text{звмкомп}}$ , руб.) осуществляется по формуле:

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

$$C_{\text{изделия, компл}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{компл}} \cdot C_{\text{компл}} \quad (4.2)$$

где  $n$  – число наименований комплектующий изделий для модернизации оборудования;

$Q_{\text{компл}}$  — количество  $i$ -ых комплектов изделий, используемых для модернизации оборудования, шт;

$C_{\text{компл}}$  — цена  $i$ -ых комплектующих, руб/шт.

Подставим данные из таблицы 4.2 в формулу 4.2, получим:

$$C_{\text{замкомпл}} = 85000 \cdot 1 + 19000 \cdot 1 + 750 \cdot 1 + 300 \cdot 1 + 500 \cdot 1 + 13500 \cdot 1 + \dots \\ \dots + 2000 \cdot 1 + 200 \cdot 1 + 100 \cdot 1 + 4500 \cdot 1 + 2500 \cdot 1 + 1000 \cdot 1 = 127850 \text{ руб.}$$

#### 4.2.3 Расчет прочих расходов на модернизацию оборудование

Величина прочих расходов ( $C_{\text{прм}}$ , руб.) определяется пропорционально расходам на оплату труда:

$$C_{\text{прм}} = C_{\text{оп}} \cdot K_{\text{прм}} \quad (4.3)$$

где  $K_{\text{прм}}$  — коэффициент, учитывающий прочие(накладные) расходы на модернизацию оборудования

Подставим данные из таблицы 4.1 в формулу 4.3 и получим:

$$C_{\text{прм}} = 27268,8 \cdot 2,9 = 79\,079,52 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4 Расчет суммарных затрат на модернизацию оборудования

Расчет суммарных затрат на модернизацию оборудования ( $C_{\text{мод}}$ , руб.) производится по формуле:

$$C_{\text{мод}} = C_{\text{оп}} + C_{\text{замкомпл}} + C_{\text{прм}} \quad (4.4)$$

Подставим полученные ранее данные в формулу 4.4, и получим суммарные затраты на модернизацию

$$C_{\text{мод}} = 27268,8 + 127850 + 79079,52 = 234\,198,32 \text{ руб.}$$

Сведем все полученные затраты в таблицу 4.4

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
						83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 4.4 — Затраты на модернизацию оборудования

Статьи затрат	Затраты, руб
1. Заработная плата рабочих	27268,8
2 Затраты на комплектующие изделия	127850
3 Прочие расходы	79079,52
<b>ИТОГО</b>	<b>234198,32</b>

Расчет стоимости модернизированного оборудования ( $C_{обмод}$ , руб.) осуществляется по формуле

$$C_{обмод} = C_{обнмод} + C_{мод} - C_{замкомпл} \quad (4.5)$$

где  $C_{обнмод}$  — стоимость немодернизированного оборудования, руб;

$C_{замкомпл}$  — общая стоимость комплектующих, руб.

Подставим данные в формулу 4.5 и получим стоимость модернизированного оборудования

$$C_{обмод} = 2850000 + 243198,32 - 127850 = 2\,965\,348,32 \text{ руб.}$$

### 4.3 Расчет экономического эффекта от проведения модернизации

#### 4.3.1 Расчет изменения трудоемкости

Снижение трудоемкости,  $\Delta T$ , % рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = 100 - \frac{t_{штмод}}{t_{штбаз}} \cdot 100, \quad (4.6)$$

где  $t_{штмод}$  — штучное время на обработку детали с использованием модернизированного оборудования, мин/шт;

$t_{штбаз}$  — штучное время на обработку детали с использованием модернизированного оборудования, мин/шт.

Подставим данные из таблицы 4.3 в формулу 4.6, получим

$$\Delta T = 100 - \frac{350}{390} \cdot 100 = 10,25\%$$

#### 4.3.2 Расчет необходимого количества оборудования и его загрузки

Расчетное количество базового и модернизированного оборудования ( $C_{расч}$ ) рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{расч}} = \frac{t_{\text{шт}} \cdot N_{\text{вып}}}{(60 \cdot F_{\text{действ}})} \quad (4.7)$$

где  $N_{\text{вып}}$  - годовая программа выпуска деталей, шт/год;

$F_{\text{действ}}$  - действительный годовой фонд времени работы оборудования, час/год.

Действительный годовой фонд времени работы оборудования можно рассчитать по следующей формуле:

$$F_{\text{действ}} = F_{\text{ном}} \cdot K_{\text{рн}}, \quad (4.8)$$

где  $K_{\text{рн}}$  - коэффициент потерь времени на ремонт и наладку (принимаем  $K_{\text{рн}} = 0,95$ );

$F_{\text{ном}}$  - номинальный фонд годового времени работы оборудования, час/год.

Рассчитываем по следующей формуле

$$F_{\text{ном}} = F_{\text{ном.дн}} \cdot h_{\text{смен}} \cdot F_{\text{смен}} - D_{\text{празд}} \cdot h_{\text{смен}} \cdot l, \quad (4.9)$$

где  $h_{\text{смен}}$  - количество смен в день, смен;

$F_{\text{смен}}$  - количество часов работы в смену, час/смену;

$l$  - сокращенная продолжительность смен в предпраздничные дни, час;

$F_{\text{ном.дн}}$  - номинальный фонд годового времени работы оборудования, в днях, дн/год. В свою очередь рассчитываем по следующей формуле

$$F_{\text{ном.дн}} = D_{\text{кален}} - D_{\text{вых}} - D_{\text{празд}}, \quad (4.10)$$

где  $D_{\text{кален}}$  - количество календарных дней в году, дней;

$D_{\text{вых}}$  - количество выходных дней в году, дней;

$D_{\text{празд}}$  - количество праздничных дней в году, дней.

Подставим известные данные в формулы 4.7 — 4.10 соответственно и получим

$$F_{\text{ном.дн}} = 366 - 109 - 10 = 247 \text{ дней}$$

$$F_{\text{ном}} = 247 \cdot 1 \cdot 8 - 3 \cdot 1 \cdot 7 = 1974 \text{ час/год}$$

$$F_{\text{действ}} = 1974 \cdot 0,95 = 1875 \text{ час/год}$$

$$C_{\text{расч.баз}} = \frac{390 \cdot 330}{(60 \cdot 1875,3)} = 1,14$$

$$C_{\text{расч.мод}} = \frac{350 \cdot 330}{(60 \cdot 1875,3)} = 0,93$$

Принимаем количество оборудования  $C_{\text{прин}}$

$C_{\text{прин. баз}} = 2$

$C_{\text{прин. мод}} = 1$

Загрузка оборудования ( $K_{\text{загр}}$ , %) рассчитывается по формуле:

										Лист
										85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ					

$$K_{\text{загр}} = \frac{C_{\text{расч}}}{C_{\text{прим}}} \cdot 100\% \quad (4.11)$$

Подставим оба варианта в формулу 4.11 и получим коэффициенты загрузки центров для базового ( $K_{\text{загр.баз}}$ ) и модернизированного варианта ( $K_{\text{загр.мод}}$ )

$$K_{\text{загр.баз}} = \frac{1,14}{2} \cdot 100\% = 57\%$$

$$K_{\text{загр.мод}} = \frac{0,93}{1} \cdot 100\% = 93\%$$

4.3.3 Расчет годовой производительности единицы оборудования и ее изменения

Годовая производительность единицы оборудования ( $Pr$ , шт./год) рассчитывается по формуле:

$$Pr = \frac{F_{\text{действ}} \cdot 60}{t_{\text{шт}}} \quad (4.12)$$

Подставим значения для базового и модернизированного варианта в формулу 4.12 и получим годовую производительность:

$$Pr_{\text{баз}} = \frac{1875,3 \cdot 60}{390} \approx 288 \text{ шт/год}$$

$$Pr_{\text{мод}} = \frac{1875,3 \cdot 60}{350} \approx 321 \text{ шт/год}$$

Коэффициент роста производительности оборудования ( $K_{\text{пр}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{действ}} \cdot 60}{t_{\text{шт}}} \quad (4.13)$$

Произведем расчет по формуле 4.13

$$K_{\text{пр}} = \frac{321}{288} = 1,12$$

4.3.4 Расчет капитальных вложений

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86



Капитальные вложения в оборудование ( $K_{об}$ , руб.) рассчитываются по формуле:

$$K_{об} = Ц_{обмол} \cdot C_{прин} \quad (4.13)$$

Капитальные вложения в здание ( $K_{зд}$ , руб.) определяются по формуле:

$$K_{зд} = Ц_{зд} \cdot S_{об} \cdot K_{доп} \cdot C_{прин} \quad (4.14)$$

Произведем расчет капитальных вложений используя данные таблиц 4.1, 4.3

$$K_{об.баз} = 2850000 \cdot 2 = 5700000 \text{ руб.}$$

$$K_{об.мол} = 2965348,32 \cdot 1 = 2965348,32 \text{ руб.}$$

$$K_{зд.баз} = 7500 \cdot 25 \cdot 1,2 \cdot 2 = 450000 \text{ руб.}$$

$$K_{зд.мол} = 7500 \cdot 25 \cdot 1,2 \cdot 1 = 225000 \text{ руб.}$$

Суммарные капитальные вложения ( $K$ , руб.) определяются по формуле:

$$K = K_{об} + K_{зд} \quad (4.14)$$

Подставим оба варианта в формулу 4.14 и узнаем суммарные капитальные вложения

$$K_{баз} = 5700000 + 450000 = 6150000 \text{ руб}$$

$$K_{мол} = 2965348,32 + 225000 = 3190348,32 \text{ руб}$$

#### 4.3.5 Расчет технологической себестоимости годового выпуска изделий

Годовая заработная плата с отчислениями ( $C_{зп}$ , руб./год) рассчитывается по формуле:

$$C_{зп} = \frac{ЧТС \cdot t_{шт} \cdot N_{вып} \cdot K_{дз} \cdot K_{урал} \cdot K_{сн}}{60} \quad (4.15)$$

где ЧТС – часовая тарифная ставка, руб./час;

$K_{дз}$  – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату;

$K_{урал}$  – районный коэффициент;

$K_{сн}$  – коэффициент отчислений на социальные нужды.

Подставим данные из таблицы 4.1, 4.3 в формулу 4.15 и получим годовую зарплату станочника для двух вариантов:

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

$$C_{\text{эл.об.}} = \frac{34 \cdot 390 \cdot 330 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,3}{60} = 130836,42 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{эл.мол.}} = \frac{34 \cdot 350 \cdot 330 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,3}{60} = 117417,30 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на электроэнергию ( $C_{\text{эл}}$ , руб./год) вычисляем по формуле

$$C_{\text{эл}} = \frac{Ц_{\text{эл}} \cdot M_{\text{об}} \cdot F_{\text{дейст}} \cdot K_{\text{зар}} \cdot C_{\text{прям}}}{100} \quad (4.16)$$

где  $M_{\text{об}}$  — мощность оборудования, кВт;

$Ц_{\text{эл}}$  — стоимость 1 кВт/час электроэнергии, руб./кВт-час.

Подставим данные из таблицы 4.1, 4.3 в формулу 4.16 и получим годовые затраты на электроэнергию для двух вариантов

$$C_{\text{эл.об.}} = \frac{3,5 \cdot 45 \cdot 1875,3 \cdot 57 \cdot 2}{100} = 336710,11 \text{ руб./год.}$$

$$C_{\text{эл.мол.}} = \frac{3,5 \cdot 45 \cdot 1875,3 \cdot 97 \cdot 1}{100} = 286498,96 \text{ руб./год.}$$

#### 4.3.6 Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления для оборудования ( $C_{\text{ам.об}}$ , руб./год) рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{ам.об}} = \frac{K_{\text{об}} \cdot N_{\text{а.об}}}{100}, \quad (4.17)$$

где  $N_{\text{а.об}}$  - норма годовых амортизационных отчислений для данного вида оборудования, %

Годовые амортизационные отчисления для здания ( $C_{\text{ам.зд}}$ , руб./год) определяются по формуле:

$$C_{\text{ам.зд}} = \frac{K_{\text{об}} \cdot N_{\text{а.зд}}}{100} \quad (4.18)$$

где  $N_{\text{а.зд}}$  - норма годовых амортизационных отчислений для здания, %

Амортизационные отчисления суммарные ( $C_{\text{ам}}$ , руб./год) рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{ам}} = C_{\text{ам.об}} + C_{\text{ам.зд}} \quad (4.19)$$

Используя данные таблицы 4.1 и 4.3, а также сведения полученные выше в формулах 4.13 и 4.14 произведем расчет амортизационных отчислений для обоих вариантов:

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$C_{\text{ам.об.баз}} = \frac{5700000 \cdot 10}{100} = 570000 \text{ руб./год}$$

$$C_{\text{ам.об.мол}} = \frac{2965348,32 \cdot 10}{100} = 296534 \text{ руб./год}$$

$$C_{\text{ам.зд.баз}} = \frac{450000 \cdot 2,5}{100} = 11250 \text{ руб./год}$$

$$C_{\text{ам.зд.мол}} = \frac{225000 \cdot 2,5}{100} = 5625 \text{ руб./год}$$

$$C_{\text{ам.баз}} = 570000 + 11250 = 581250 \text{ руб./год}$$

$$C_{\text{ам.мол}} = 296534 + 5625 = 302159 \text{ руб./год}$$

4.3.7 Расчет годовых затрат на текущий ремонт, содержание здания, инструмент

Годовые затраты на текущий ремонт оборудования, ( $C_{\text{рем.об}}$ , руб./год) рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{рем.об}} = \frac{K_{\text{об}} \cdot N_{\text{рем.об}}}{100}, \quad (4.20)$$

где  $N_{\text{рем.об}}$  - норма годовых затрат на текущий ремонт оборудования, %

Годовые затраты на текущий ремонт здания, ( $C_{\text{рем.зд}}$ , руб./год) рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{рем.зд}} = \frac{K_{\text{об}} \cdot N_{\text{рем.зд}}}{100} \quad (4.21)$$

где  $N_{\text{рем.зд}}$  - норма годовых затрат на текущий ремонт здания, %

Годовые суммарные затраты на текущий ремонт ( $C_{\text{рем}}$ , руб./год) определяются по формуле:

$$C_{\text{рем}} = C_{\text{рем.об}} + C_{\text{рем.зд}} \quad (4.22)$$

Расчет годовых затрат на содержание здания ( $C_{\text{сод.зд}}$ , руб./год) ведется по формуле:

$$C_{\text{сод.зд}} = \frac{K_{\text{зд}} \cdot N_{\text{сод.зд}}}{100} \quad (4.23)$$

где  $N_{\text{сод.зд}}$  - норма годовых затрат на содержание здания, %

Годовые затраты на инструмент, ( $C_{\text{инстр}}$ , руб./год) рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{инструм}} = C_{\text{инстр}} \cdot P_{\text{инстр}} \quad (4.24)$$

где  $C_{\text{инстр}}$  – цена инструмента, руб./шт.;

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
						89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$$C_{\text{техн}} = C_{\text{м}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{инстр}} + C_{\text{созд}} \quad (4.26)$$

Подставим данные в формулу 4.26

$$C_{\text{техн. баз}} = 130836,42 + 336710,11 + 581250 + 175500 + \dots + 40500 + 13500 = 1\,278\,296,53 \text{ руб/год}$$

$$C_{\text{техн. мод}} = 117417,3 + 286498,96 + 302159 + 91210 + \dots + 36000 + 6750 = 840\,035,26 \text{ руб/год}$$

Штучная технологическая себестоимость ( $C_{\text{шт техн}}$  руб./шт.) рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{шт техн}} = \frac{C_{\text{техн}}}{N_{\text{вып}}} \quad (4.27)$$

Подставим данные

$$C_{\text{шт техн баз}} = \frac{1\,278\,296,53}{330} = 3873,62 \text{ руб/шт}$$

$$C_{\text{шт техн мод}} = \frac{840\,035,26}{330} = 2545,56 \text{ руб/шт}$$

Экономия от снижения себестоимости, ( $C_{\text{изм}}$  руб./год) рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{изм}} = C_{\text{техн. баз}} - C_{\text{техн. мод}} \quad (4.28)$$

Произведем расчет по формуле 4.28:

$$C_{\text{изм}} = 1\,278\,296,53 - 840\,035,26 = 438\,261,27 \text{ руб/год}$$

Годовые приведенные затраты, ( $Z_{\text{прив год}}$  руб./год) рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{прив год}} = C_{\text{техн}} + E_{\text{н}} \cdot K \quad (4.29)$$

Произведем расчет по формуле 4.29:

$$Z_{\text{прив год баз}} = 1\,278\,296,53 + 0,15 \cdot 6150000 = 2\,200\,796,53 \text{ руб/год}$$

$$Z_{\text{прив год мод}} = 840\,035,26 + 0,15 \cdot 3190348,32 = 1\,318\,587,51 \text{ руб/год}$$

Удельные приведенные затраты, ( $Z_{\text{прив. уд}}$  руб./год) рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{прив. уд}} = \frac{Z_{\text{прив. год}}}{N_{\text{год}}} \quad (4.30)$$

Произведем расчет затрат по вариантам:

$$Z_{\text{прив. у.д. баз}} = \frac{2200796,53}{330} = 6669,08 \text{ руб./год}$$

$$Z_{\text{прив. у.д. мод}} = \frac{1318587,51}{330} = 3995,72 \text{ руб./год}$$

Годовой экономический эффект ( $\mathcal{E}_{\text{год}}$ , руб./год) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = Z_{\text{прив. год. баз}} - Z_{\text{прив. год. мод}} \quad (4.31)$$

Произведем расчет годового экономического эффекта

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 2200796,53 - 1318587,51 = 882209,02 \text{ руб./год}$$

Выводы по разделу четыре

Полученные результаты расчета технико-экономических показателей модернизации обрабатывающего центра ИР-500 сведем в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 — Техничко-экономические показатели расчета модернизации

Показатели	Единица измерения	Базовый вариант	Модерн. вариант
1 Годовая программа	шт./год	330	330
2 Штучное время	мин/шт	390	350
3 Снижение трудоемкости	%	10,25	
4 Количество оборудования	ед	2	1
5 Годовая производительность оборудования	шт./год	288	321
6 Коэффициент роста производительности оборудования		1,12	
7 Капитальные вложения в т. ч.:	руб.	6 150 000	3 190 348
– в оборудование;		5 700 000	2 965 348
– в здание		450 000	225 000
8 Технологическая себестоимость годового выпуска	руб./год	1 278 296,53	840 035
9 Экономия от снижения себестоимости	руб./год	438 261	
10 Годовые приведенные затраты	руб./год	2 200 796	1 318 587
11 Годовой экономический эффект	руб./год	882 209	

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 5.1 Общие сведения

Обрабатывающий центр ИР500 находится на механическом участке общей площадью 300 м<sup>2</sup>, где применяется стационарное оборудование с постоянно установленными ограждениями и предохранительными устройствами (экраны, кожуха, пылеотсасывающие устройства). Для погрузки, разгрузки и транспортировки материалов, оборудования, приспособлений по массе больших, чем допустимые значения норм поднимаемых тяжестей вручную, на участке предусмотрены двухбалочный кран с электросталью грузоподъемностью 10 т. и транспортер. Оборудование располагается в той же последовательности, что и операции в разработанном технологическом процессе. Контроль параметров производят унифицированным инструментом на контрольных точках. На участке также предусмотрены места для курения, приема пищи, рабочего телефона, фонтанчиков для питья, раздевалка, сан. узел. Планировка участка обеспечивает беспрепятственный путь как к эвакуации работников во время чрезвычайных ситуациях, так и прибытию на место возникновения ЧС команд МЧС, пожарных команд и скорой медицинской помощи.

### 5.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Негативные факторы производственной среды можно разделить на:

- физические факторы
- метеорологические факторы, или микроклимат рабочего помещения (повышенные или пониженные температура и влажность помещения, загазованность, запыленность рабочей зоны);
- светотехнические факторы (недостаточная освещенность рабочей зоны);
- бароакустические факторы (атмосферное давление, повышенный уровень шума);
- электромагнитные факторы (высокое напряжение в электрической сети, опасность поражения электрическим током);
- механические факторы (перемещающиеся изделия заготовки, незащищенные подвижные элементы производственного оборудования);
- психофизиологические факторы.

К группе психофизиологических факторов относятся:

- физические перегрузки;
- статические нагрузки;

В ГОСТ 12.0.002 – 80 техника безопасности определена как система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих воздействие на работающих опасных производственных факторов, а производственная санитария – как система организационных, технических средств, предотвращающих или уменьшающих воздействие на работающих вредных производственных факторов.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		93

### 5.3 Расчет защитного заземления

Заземление - преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством (ПУЭ 1.7.28).

Назначение защитного заземления - устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Принцип действия защитного заземления – снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус. Это достигается уменьшением потенциала заземленного оборудования, а также выравниванием потенциалов за счет подъема потенциала основания, на котором стоит человек, до потенциала, близкого по назначению к потенциалу заземленного оборудования.

Область применения защитного заземления – трехфазные трехпроводные сети напряжением до 1000В с изолированной нейтралью и выше 1000В с любым режимом нейтрали.

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя – металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих заземляемые части электроустановки с заземлителем. Различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

Выносное заземляющее устройство характеризуется тем, что заземлитель его вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки.

Данный тип заземляющего устройства применяют лишь при малых значениях тока замыкания на землю и, в частности, в установках напряжением до 1000В, где потенциал заземлителя не превышает допустимого напряжения прикосновения. Преимуществом такого типа заземляющего устройства является возможность выбора места размещения электродов с наименьшим сопротивлением грунта.

Контурное заземляющее устройство характеризуется тем, что его одиночные заземлители размещают по контуру площадки, на которой находится заземляемое оборудование, или распределяют по всей площадке по возможности равномерно.

Безопасность при контурном заземлителе обеспечивается выравниванием потенциала на защищаемой территории путем соответствующего размещения одиночных заземлителей.

Внутри помещений выравнивание потенциала происходит естественным путем через металлические конструкции, трубопроводу, кабели и подобные им проводящие предметы, связанные с разветвленной сетью заземления.

Защитному заземлению подлежат металлические нетоковедущие части оборудования, которые из-за неисправности изоляции могут оказаться под напряжением и к которым возможно прикосновение людей. При этом в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных по условиям поражения

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94



током, а также в наружных установках заземление является обязательным при номинальном напряжении электроустановки выше 42В переменного и выше 110В постоянного тока, а в помещениях без повышенной опасности – при напряжении 380В и выше переменного и 440В и выше постоянного тока. Лишь во взрывоопасных помещениях заземление выполняется независимо от назначения установки.

Электроустановки в отношении мер электробезопасности разделяются на:

- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с глухозаземлённой или эффективно заземлённой нейтралью;
- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземлённой через дугогасящий реактор или резистор нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с глухозаземлённой нейтралью;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью.

В зависимости от технических особенностей электроустановки и снабжающих электросетей, её эксплуатация может требовать различных систем заземления. Как правило, перед проектированием электроустановки, сбытовая организация выдаёт перечень технических условий, в которых оговаривается используемая система заземления.

Классификация типов систем заземления приводится в качестве основной из характеристик питающей электрической сети. ГОСТ Р 50571.2-94 «Электроустановки зданий. Часть 3. Основные характеристики» регламентирует следующие системы заземления: TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT.

Для электроустановок напряжением до 1 кВ приняты следующие обозначения:

- система TN — система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземлённой нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;
- система TN-C — система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всём её протяжении;
- система TN-S — система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всём её протяжении;
- система TN-C-S — система TN, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то её части, начиная от источника питания;
- система IT — система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены;
- система TT — система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземлённой нейтрали источника.

Нормируемое сопротивление в соответствии с ПУЭ составляет 4 Ома. Контур заземления предполагается соорудить с внешней стороны с расположением

									Лист
									95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

вертикальных электродов по контуру. В качестве вертикальных заземлителей принимаем электроды с размером 18.00 мм и длиной 3.00 м, которые погружаются в грунт. Верхние концы электродов располагаем на глубине 0.70 м от поверхности земли. К ним привариваются горизонтальные электроды из той же стали, что и вертикальные электроды.

Предварительно с учётом площади (20x15 м), занимаемой объектом, намечаем расположение заземлителей по периметру длиной 70 м.

Параметры двухслойного грунта в месте сооружения, климатические коэффициенты и другие исходные данные для расчета сведены в таблице 1.

Таблица 5.1 — Исходный данные для расчета защитного заземления

Обозначение	Наименование	Ед. измерения e	Значени
$R_n$	нормируемое сопротивление растеканию тока в землю	Ом	4,00
$\rho_1$	удельное сопротивление верхнего слоя грунта (принимаем садовую землю)	Ом*м	50,00
$\rho_2$	удельное сопротивление нижнего слоя грунта (принимаем каменистую глину)	Ом*м	80,00
d	диаметр заземляющего стержня	мм	18
L	Длина заземляющего стержня	м	3,00
H	толщина верхнего грунта	м	0,50
$t_{пол}$	Глубина заложения горизонтального заземлителя	м	0,70
t	расстояние от поверхности земли до середины заземлителя	м	2,20
$k_1$	климатический коэффициент для вертикальных электродов, для II климатической группы (Челябинская область)	-	1,65
$k_2$	климатический коэффициент для горизонтальных электродов, для II климатической группы (Челябинская область)	-	4,00
b	ширина стальной полосы	мм	50,00
$l_2$	длина горизонтального заземлителя	м	70,00



Подставим известные данные в формулу 5.4 получим сопротивление горизонтального заземлителя:

$$r_r = \frac{0,366 \cdot 4 \cdot 83,33}{(70 \cdot 0,36)} \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 70^2 \cdot 1000}{(50 \cdot 0,7)}\right) = 26,33 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление вертикальных заземлителей R не должно превышать значения определяемого по формуле:

$$R = \frac{R_n \cdot r_r}{(r_r - R_n)}, \text{ Ом} \quad (5.5)$$

Подставим известные данные в формулу 5.5 получим полное сопротивление заземлителей:

$$R = \frac{4 \cdot 26,33}{(26,33 - 4)} = 4,71 \text{ Ом}$$

С учетом полного сопротивления вертикальных заземлителей уточнённое количество вертикальных заземлителей с учётом соединительной полосы определяется по формуле:

$$n = \frac{r_s}{(R \cdot \eta_s)}, \text{ шт} \quad (5.6)$$

Подставим известные данные в формулу 5.6 получим полное сопротивление заземлителей:

$$n = \frac{45,12}{(4,71 \cdot 0,66)} = 14,5 \text{ шт}$$

Принимаем к установке 14 вертикальных заземлителей, общая длина горизонтального заземлителя 70 м при среднем расстоянии между вертикальными заземлителями 5 м. Окончательное расстояние между вертикальными заземлителями вдоль соединительной полосы указывается на плане заземляющего устройства. Конструкция заземляющего устройства на рисунке 5.1.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98

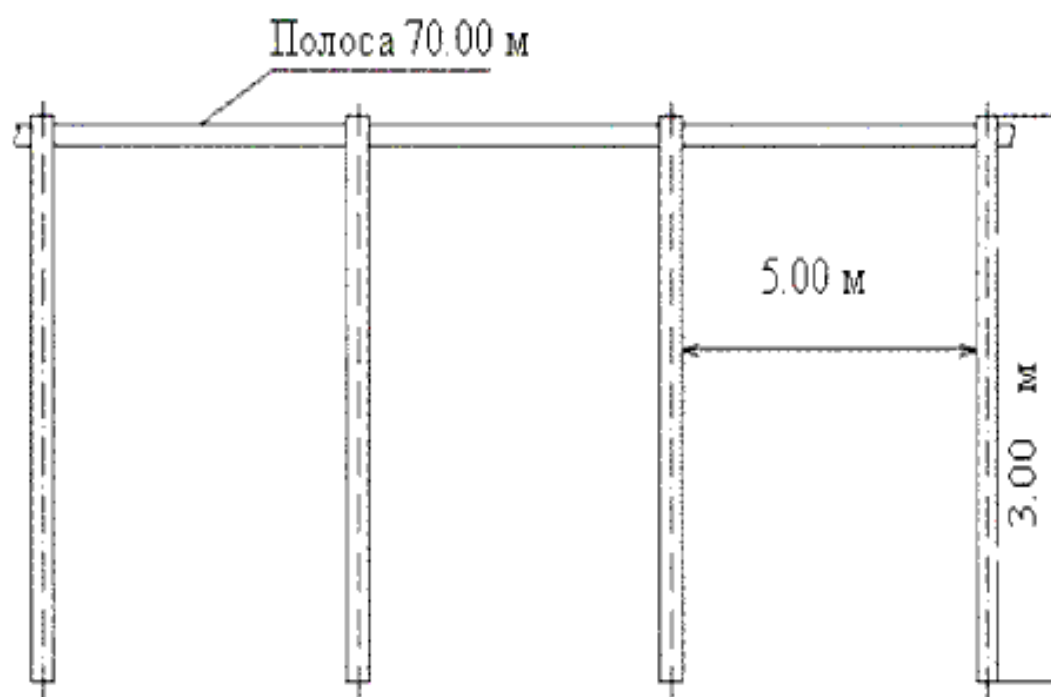


Рисунок 5.1 - Конструкция заземляющего устройства

#### 5.4 Экологическая безопасность

В результате производственной деятельности в воздушную среду на участке поступают различные вредные вещества: стружка, пыль, пары и аэрозоли СОЖ. Отработанная СОЖ сливается в специальные емкости и увозится на переработку и нейтрализацию. Стружка собирается в специальные контейнеры и отправляется на переплавку. Средства индивидуальной защиты от пыли – это применение защитных очков, а также соблюдение личной гигиены. В связи с тем, что выявленные вредные вещества в воздухе рабочей зоны имеют незначительный характер воздействия на организм человека, то класс вредных веществ малоопасный. Концентрация вредных веществ в воздухе ниже ПДК.

#### Выводы по разделу пять

В данном разделе отражены вопросы общего характера металлообработки на обрабатывающем центре, произведен анализ факторов действующих на оператора центра, произведен расчет защитного заземления, отражены вопросы экологической безопасности и гражданской обороны.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе была предложена модернизация обрабатывающего центра IP-500. Выбран вариант замены существующего электропривода на современный. Отечественные преобразователи серий ЭПВ и ProfiMaster обладают идентичным рядом функциональных возможностей, а главное, адаптированы к особенностям российской промышленной сети.

Сравнив варианты электроприводов пришли к выбору преобразователей серии ЭПВ по следующим причинам:

- а) более широкий выбор мощностей
- б) возможность автоматической настройки регулятора по измеренным параметрам подключенного двигателя;
- в) расширенный набор возможностей программирования;
- г) режим «самоподхвата» и режим «плохой» сети;
- д) более высокая перегрузочная способность.

Рассмотрены варианты систем управления электроприводами, после чего была выбрана система векторного управления по принципу постоянства  $U/f$  с датчиками скорости и тока в качестве звена обратной связи.

На основании системы уравнений составлена структурная схема электропривода, содержащая технологический регулятор, частотный преобразователь, блока частотного токоограничения, блоков вычисления параметров электродвигателя, табличного преобразователя напряжения и преобразователей координат.

Спроектирована функциональная схема. В качестве хост-контроллера выбран STM32вспомогательного контроллера — ATmega8. Для обеспечения обратной связи выбраны датчик скорости — энкодер ЛИР-158, датчики тока на эффекте Холла ДТХ-150, датчики температуры DS18B20.

Спроектирована принципиальная схема системы управления электроприводом, состоящая из силовой части — преобразователя частоты и блоков питания, микропроцессорной части и датчиковой системы.

Произведен расчет постоянных времени статора и ротора двигателя. После настройки технологического регулятора на оптимум, по математической модели проведено исследование динамики электропривода.

Разработана аппаратно-программная система диагностики для реализации защит привода.

Проект модернизации является экономически целесообразным, так как полученный экономический эффект положительный и составляет 882 209,02 руб./год.

В разделе «безопасность жизнедеятельности» отражены вопросы общего характера металлообработки на обрабатывающем центре, произведен анализ факторов действующих на оператора центра, произведен расчет защитного заземления, отражены вопросы экологической безопасности и гражданской обороны

									Лист
									100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	140400.2016.086.000 ПЗ				

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Виноградов, А.Б. Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Электротехника. - 2001. - Вып. 12. - С. 25-30.

2 Виноградов, А.Б. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока нового поколения / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Привод и управление. - 2000. - Вып. 10.- С. 21-24.

3 Виноградов, А.Б. Опыт разработки цифровых систем векторного управления асинхронным электроприводом / А.Б Виноградов // Труды III международной (XIV всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу "АЭП-2001" / под ред. С.В. Хватова. - Нижний Новгород: "Вектор-ТиС", 2001, С. 59-60.

4 Кравчик, А.Э. Выбор и применение асинхронных двигателей / А.Э. Кравчик, Э.К. Стрельбицкий, М.М. Шлаф. -М.: Энергоатомиздат, 1987.

5 Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / под ред. Ю.К. Розанова, - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Информэлектро, 2001.

6 Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. В.М.Терехова. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 304 с.

7 Миронов, С. И. Анализ методов структурного синтеза электроприводов непосредственного действия / С.И. Миронов, В.П. Повалев, Г.В. Соломахин // Электротехнические комплексы и системы управления - Современный электропривод. 2006. - Вып. 1.

8 Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау.-Л.: Энергоатомиздат, 1987.-136 с.

9 Слежановский, О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов. - М.: Энергоатомиздат, 1983.-256с.

10 Корнеев, В. Современные микропроцессоры / В. Корнеев, А. Киселев. - М.:Нолидж. - 2000.

11 Козаченко, В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателем и требования к микроконтроллерам / В.Ф. Козаченко. // ChipNews. - 1999. - Вып. 1.

12 Сердюков, О. Выбор микроконтроллера/ О. Сердюков, Ю. Мухин. // Электронные компоненты - Микроконтроллеры 2002 №5

13 Королев Н., AVR микроконтроллеры второго поколения: новые аппаратные возможности // Электронные компоненты. - 2003. - Вып. 4.

14 Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем. Справочник в 2 т. / под. Ред. А. Шахнова. - 1988 год. - 368 с.

15 Балашов, Е. П. Микропроцессоры и микропроцессорные системы: учебное пособие / Е. П. Балашов. - М.:МГТУ, 1981.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

16 Башарин, А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. — Ленинград: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. — 392 с, ил.

17 Ильин, П., Алимов Н. Обзор MOSFET и IGBT компании STMicroelectronics / П. Ильин, Н. Алимов // Новости электроники. — 2009. - Вып. 2.

18 Меджахед Д. Высокоэффективные решения на базе транзисторов SuperMESH3 // Новости электроники. — 2009. - Вып. 16.

19 Алексеев, К.Б., Микроконтроллерное управление электроприводом: учебное пособие / К.Б. Алексеев, К.А Палагута.. — М.: МГИУ, 2008. — 298 с.

					140400.2016.086.000 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102