

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт открытого и дистанционного образования
Кафедра «Техника, технологии и строительство»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,

к.т.н., доцент

_____ К.М. Виноградов
_____ 2020 г.

Модернизация электропривода главного движения
фрезерного станка 6Н82Г

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.03.02. 2020.054.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы, доцент

_____ В.Д. Константинов
_____ 2020 г.

Автор работы

студент группы ДО-503

_____ А.А. Рахимьянов
_____ 2020 г.

Нормоконтролер,
преподаватель

_____ О.С. Микерина
_____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Рахимьянов А.А. Модернизация электропривода главного движения фрезерного станка 6Н82Г – Челябинск: ЮУрГУ, Институт открытого и дистанционного образования; 2020, 84 с., 24 ил., библиограф. список – 24 наим., 6 листов чертежей ф. А1.

В данной выпускной квалификационной работе выполнена разработка электропривода главного движения горизонтально-фрезерного станка модели 6Н82Г. Дано описание станка, выполнен расчёт электропривода, выбран электродвигатель, проведён обзор и выбор электропривода. Выполнен статический и динамический расчёт электропривода.

Также рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности. Установлено наличие и проведен анализ опасных и вредных производственных факторов при эксплуатации данного станка. Разработаны мероприятия по снижению этих факторов на работников. Оценено воздействие процессов механической обработки металлов на окружающую среду и способы ее защиты. Проведена оценка пожаро-безопасности.

Выполнено экономическое обоснование модернизации, в ходе которого была рассчитана экономия на годовых эксплуатационных издержках при внедрении модернизированного оборудования, срок окупаемости и рентабельность капитальных вложений.

Результаты работы имеют практическую значимость и могут быть применены на производстве.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Рахимьянов А.А.			Модернизация электропривода главного движения фрезерного станка 6Н82Г	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Константинов В.Д.					2	84
Т. контр.						ЮУрГУ (НИУ). Кафедра ТТС		
Н. контр.		Микерина О.С.						
Утверд.		Виноградов К.М.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ.....	7
1.1 Общее сопоставление возможностей преобразователей частоты	7
1.2 Особенности преобразователей частоты Control Techniques	8
1.3 Особенности преобразователей частоты КЕВ	10
1.4 Особенности преобразователей частоты НІТАСНІ	13
1.5 Особенности преобразователей частоты LS Industrial Systems	16
1.6 Особенности преобразователей частоты «Эффективные системы»... 17	17
1.7 Особенности преобразователей частоты ОВЕН	19
Выводы по разделу один	21
2 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 6Н82Г	22
2.1 Назначение и область применения	22
2.2 Описание конструкции станка	22
2.3 Основные технические характеристики станка	26
2.4 Электрооборудование станка	28
2.4.1 Общие сведения.....	28
2.4.2 Работа электросхемы при ручном управлении	29
2.4.3 Работа электросхемы при автоматическом управлении	29
2.4.4 Импульсное включение двигателей	31
2.4.5 Торможение шпинделя	31
2.4.6 Блокировки станка	32
2.5 Обоснование модернизации привода главного движения	32
Выводы по разделу два	33
3 РАСЧЁТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ	34
3.1 Расчет мощности двигателя.....	34
3.2 Выбор двигателя	36
3.3 Построение нагрузочной диаграммы электропривода	36
Выводы по разделу три	39
4 ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДА	40
4.1 Формулирование требований к электроприводу	40
4.2 Выбор преобразователя частоты.....	40
Выводы по разделу четыре	42
5 СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПРИВОДА	43
5.1 Статический расчёт привода	43
5.2 Расчёт динамических характеристик привода.....	49
5.2.1 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	49
5.2.2 Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ ЭП	50

5.2.3	Оптимизация контура регулирования тока	52
5.2.4	Оптимизация контура регулирования потокосцепления	53
5.2.5	Оптимизация контура регулирования скорости	55
5.2.6	Построение имитационной модели и моделирование переходных процессов	56
	Выводы по разделу пять	59
6	ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	60
6.1	Общие положения	60
6.2	Оценка годовой производительности станка	60
6.3	Определение капитальных затрат.....	62
6.4	Определение эксплуатационных расходов.....	63
6.5	Определение приведенных затрат по вариантам систем электроприводов и экономического эффекта от использования нового оборудования.....	64
6.6	Определение экономической эффективности использования предварительно выбранной системы электропривода	65
	Выводы по разделу шесть	66
7	БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ	67
7.1	Социальное значение безопасности жизнедеятельности	67
7.2	Опасные и вредные производственные факторы при фрезеровании изделий	69
7.3	Разработка технических и организационных мер по уменьшению влияния опасных и вредных факторов на человека	70
7.3.1	Электробезопасность	70
7.3.2	Меры по уменьшению опасности травмирования от движущихся частей станка	74
7.3.3	Меры защиты от шумов и вибрации	75
7.4	Пожарная безопасность.....	76
7.5	Процесс механической обработки металлов как источник загрязнения окружающей среды.....	79
	Выводы по разделу семь	81
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	82
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	83

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – привод главного движения фрезерного станка 6Н82Г.

Цель работы – модернизация привода главного движения станка модели 6Н82Г с бесступенчатым изменением частоты вращения шпинделя.

Актуальность темы. Важнейшими условиями увеличения роста промышленной продукции является развитие электрификации, комплексной механизации и автоматизации, внедрение новейшего высокопроизводительного оборудования и передовой технологии, широкая замена и модернизация устаревшего оборудования.

Осуществление этих задач в машиностроительной металлообрабатывающей промышленности связано в первую очередь с повышением производительности основного технологического оборудования – металлорежущих станков.

Для обеспечения повышения производительности труда в машиностроении большое значение имеет более полное использование действующего парка станков, в первую очередь за счет его модернизации и реконструкции.

Особое значение приобретает модернизация электроприводов, находящихся в эксплуатации, поскольку износ электрооборудования происходит значительно быстрее, чем износ станков. Оно может дать существенный эффект в отношении повышения производительности и облегчения обслуживания станка.

В настоящее время в ПАО «Ашинский метзавод» используются различные типы и модели станков, и в частности горизонтально-фрезерные станки типа 6Н82Г. Данный станок используется в технологическом процессе изготовления различных изделий.

Данный тип станков морально устарел, т.к. электрооборудование было выпущено в 80^х годах прошлого столетия. Поэтому на сегодняшний день актуальным вопросом является модернизация привода станка. От данной модернизации ожидается повышения качества металлообработки, увеличение производительности, снижение энергопотребления, снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт.

Современные трёхфазные асинхронные двигатели (АД) благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой надёжности получили широкое применение. Они присутствуют практически повсюду, это самый распространённый тип двигателей.

Для управления асинхронным двигателем широко используются преобразователи частоты (ПЧ).

Главными преимуществами частотно-регулируемого электропривода (ЭП) являются: обеспечение плавного пуска и использование короткозамкнутых асинхронных двигателей, что значительно снижает затраты на обслуживание приводов и увеличивает срок службы оборудования. Частотное управление является весьма экономичным, так как обеспечивает регулирование скорости АД без больших потерь мощности в роторной цепи, ухудшающих КПД ЭП и приводящих к необходимости завышения мощности АД.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

Частотное регулирование скорости может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики, т.е. АД может иметь скорость как больше, так и меньше номинальной. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жесткость, а АД сохраняет большую перегрузочную способность.

Реализуемый диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет от 5 до 10, а в замкнутых системах (при использовании обратных связей) его значение может достигать 1000 и более.

В силу отмеченных высоких показателей частотный способ находит в настоящее время все более широкое применение. Более того, можно назвать примеры, когда использование частотно-управляемого асинхронного ЭП является единственно возможным: привод высокоскоростных электрошпинделей, электровентен, вентиляторов высокоскоростных аэродинамических труб, различных испытательных стендов и др.

Большие перспективы применения ПЧ связаны с использованием в них силовых транзисторов (в частности, биполярных с изолированным затвором в модульном исполнении) и средств микропроцессорной техники для реализации схем управления.

Широкому внедрению частотного ЭП во многом способствует выпуск промышленностью статических ПЧ самого разнообразного исполнения.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ПЕРЕДОВЫХ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

1.1 Общее сопоставление возможностей преобразователей частоты

В настоящее время большое распространение получили статические преобразователи частоты. Такое название они получили из-за того, что в них используются не имеющие движущихся частей элементы и устройства. Ускорение развития статических преобразователей произошло в связи с массовым производством тиристоров и силовых транзисторов. Применение статических преобразователей позволяет повышать технические и экономические характеристики регулируемого частотного привода.

Проанализируем особенности построения и реализации различных преобразователей, зарубежных: «Control Techniques», «КЕВ», «HITACHI», «LS Industrial Systems» и российских производителей: «Эффективные системы», «ОВЕН».

Рассмотрим технические и функциональные возможности преобразователей частоты при использовании их для модернизации привода. ПЧ целесообразно сравнить по следующим показателям:

- тип преобразователя;
- напряжение питания;
- диапазон изменения выходной частоты;
- количество аналоговых/дискретных входов;
- наличие дополнительных опций.

Анализируя технические возможности преобразователей частоты различных производителей, можно прийти к выводу, что диапазон мощностей характеризует мощность двигателей, подключаемых к этому преобразователю. Также, если производитель выпускает преобразователи в широком диапазоне мощностей, то это характеризует о его серьезных и прочных позициях на данном рынке.

Производители выпускают модели ПЧ небольшой мощности, рассчитанные на однофазное (двухпроводное) питание 220В переменного тока. Более мощные модели ПЧ изготавливаются на трехфазное питание 380–480В переменного тока. Для устойчивой работы в российских сетях, стандартом, предъявляемым к электрическим аппаратам, является разброс от -15% до +10% номинального напряжения питания. Все преобразователи, рассмотренные в данной работе, соответствуют этому требованию.

Количество параметров настройки характеризует возможность более точно настроить преобразователь под свои задачи. Но, конечно, не менее важным является качественный состав и продуманность этих параметров. Для упрощенных исполнений специализированных ПЧ достаточно малого количества необходимых для технологического процесса параметров. Для правильной оценки количественного и качественного состава, его достаточности и необходимости для решения поставленных задач, нужно изучить все характеристики и полное описание рассматриваемой модели преобразователя частоты.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Наличие у данной модели дополнительных опций дает возможность для гибкой настройки преобразователя частоты под нужды производственного процесса.

Почти все крупные производители реализуют возможность установки в ПЧ дополнительных модулей (опций), расширяющих его возможности. Но, если у одних это идет как дополнительная опция, то у других это может входить в основную (базовую) комплектацию.

Количество аналоговых/дискретных входов, характеризует возможность сопряжения ПЧ с системой локального управления технологическим процессом. Чем больше сигнальных входов, тем проще интегрировать преобразователь с внешней системой управления.

1.2 Особенности преобразователей частоты Control Techniques

Английская компания Control Techniques, является подразделением компании Emerson Industrial Automation. Control Techniques разрабатывает, производит и продает электроприводы переменного и постоянного тока, а также сервоприводы для коммерческих и промышленных применений. Используя новейшие технологии, компания Control Techniques предлагает продукцию высокого качества. Электроприводы идеально подходят для широкого спектра задач от прецизионных машин до высокопроизводительных грузоподъемных механизмов, от кранов до вентиляторов. Электроприводы Control Techniques позволяют получить эффективное решение для повышения производительности и снижения энергопотребления в любом применении.

Продукция Control Techniques поставляется во многие страны. Высокие показатели равномерности хода на малых скоростях позволяют использовать преобразователь частоты Control Techniques на металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станках, в автомобилестроительной промышленности, на подъемном оборудовании в металлургии.

Дистрибьюторы и центры технической поддержки компании расположены более чем в 70 странах, обеспечивают сервис и конструкторские решения, многие также предлагают полное проектирование систем и услуги по монтажу. Производственные площадки находятся в Европе, США, Азии.

Учитывая многообразие возможных применений преобразователей частоты в промышленности, Контрол Текникс выпускает много моделей преобразователей, которые способны покрыть любые потребности в автоматизированных системах управления электроприводом.

На смену сериям UNIDRIVE SP и Commander SK фирма Control Techniques начала выпуск серии Unidrive M. Unidrive M – электроприводы для автоматизации производства, оптимизированные для нужд заказчика, По результатам исследования рынка и опроса заказчиков каждая модель Unidrive M оптимизирована для использования в конкретных задачах при автоматизации. Серия состоит из семи моделей переменного тока, обеспечивающих превосходные технические характеристики и только нужный уровень функциональности.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Параметры моделей серии Unidrive M указаны в таблице 1.
Таблица 1 – Параметры моделей серии Unidrive M

Параметр		M100	M200	M300	M400	M600	M700	M800
Номинальные параметры для тяжелого режима	Максимальная в серии номинальная мощность, кВт	7.5	22	22	110	1200	1200	1200
	Ток, А	17	47	47	224	2286	2286	2286
Номинальные параметры для нормального режима	Максимальная в серии номинальная мощность, кВт	N/A	30	30	132	1500	1500	1500
	Ток, А	N/A	63	63	266	2786	2786	2786
Режим управления	Векторное управление в разомкнутом контуре или вольт-частотное управление ($U/f = \text{const}$) асинхронными двигателями	•	•	•	•	•	•	•
	Векторное управление в разомкнутом контуре для асинхронных двигателей (RFC-A)		•	•	•	•	•	•
	Управление в разомкнутом контуре для двигателей с постоянными магнитами (RFC-S)					•	•	•
Параметр		M100	M200	M300	M400	M600	M700	M800
Режим управления	Векторное управление в замкнутом контуре для асинхронных двигателей (RFC-A)					Опция	•	•
	Векторное управление в замкнутом контуре для двигателей с постоянными магнитами (RFC-S)						•	•
	Режим активного выпрямления Active Front End (AFE)					•	•	•
Встроенные функции коммуникации	RS485					•	M701	
	Ethernet (1 порт)						•	•
	Ethernet (2 порт)							M810
Программируемость	ПЛК				•	•	•	•
	Задачи в реальном времени				•	•	•	•
	Функция цифрового замка					•	•	•
	Расширенный контроллер движения						•	•
	Machine Controller							•
	Улучшенный Machine Controller							M810

Продолжение таблицы 1

Резервное хранение параметров	Копирование - Serial/Ethernet порт (необходим AI-485 Adaptor для M200, M300 & M400)		Опция	Опция	Опция	•	•	•
	SD card и adaptor	Опция	Опция	Опция	Опция	Опция	Опция	Опция
	Поддержка Smartcard reader					•	•	•
	Хранение параметров двигателя электронного шильдика(EnDat, HIPERFACE, BISS encoders)						•	•
Обратная связь	Вход энкодера 1				•	Опция	•	•
	Вход энкодера 2						•	•
	Эмуляция выхода энкодера						•	•
Встроенные входы/ выходы	Аналоговые входы/выходы	1/0	2/1	2/1	2/2	3/2	3/2 M702: 0/0	0/0
	Дискретные входы/выходы/ входы или выходы	3/0/1	4/0/1	4/0/1	5/0/2	4/1/3	4/1/3 M702: 3/3/0	3/3/0
	Выход реле	1	1 (габариты 1 - 4) 2 (габарит 5 и выше)			1	1	1

1.3 Особенности преобразователей частоты КЕВ

Компания КЕВ (Германия) была основана в 1972 году. За годы динамичной работы компания прошла путь от разработчика электромагнитной техники до производителя комплексных решений по автоматизации промышленного оборудования и процессов.

Оборудование КЕВ производится в 5 странах мира. Представительства и сервисные центры работают более чем в 25 странах.

Компания КЕВ гибко реагирует на меняющиеся потребности клиентов по всему миру. В ответ на запрос российских промышленных предприятий КЕВ-РУС, официальный представитель КЕВ в России и СНГ, реализует проекты по производству и локализации компонентов систем управления и электропривода.

С 1 июля 2016 года в России запущен участок сборки преобразователей частоты серии COMBIVERT F5. Серийная сборка ПЧ мощностью от 1,5 до 22 кВт. Возможен проектный выпуск ПЧ мощностью до 315 кВт.

Преобразователи частоты российской сборки имеют сертификат продукции российского происхождения.

Данную серию отличает наличие преобразователей с обратной связью, что позволяет увеличивать диапазон регулирования сервопривода.

Разработанное специализированное программное обеспечение позволяет использовать частотники КЕВ совместно с устройствами других производителей. Частотные преобразователи КЕВ активно применяются в конвейерных и фасо-

вочных линиях, устанавливаются на деревообрабатывающих и металлорежущих станках, на роботизированных линиях сборки, используются на насосных станциях и т.п.

Компания КЕВ предоставляет своим потребителям четыре серии частотных преобразователей COMBIVERT F5 без обратной связи – F5 Basic, F5 Compact, F5 General, F5-H (ASCL) и одной серии COMBIDRIVE B6.

Преобразователи частоты КЕВ серии COMBIVERT F5 с обратной связью позволяют управлять как асинхронными (серия F5-A), так и синхронными двигателями (серии F5-Servo, F5-A Servo).

Серия F5-A, F5-Servo, F5-A Servo используется в системах управления координатными столами, металлообрабатывающих центрах, деревообработке, системах с диапазоном регулирования скорости свыше 10000, системах с высокоточным позиционированием, следящих системах, робототехнике, полиграфическом оборудовании, текстильном и упаковочном оборудовании.

Компания КЕВ также предоставляет своим потребителям серию частотных преобразователей COMBIVERT F6. COMBIVERT F6 – это современный, компактный и более гибкий преобразователь частоты для уровней производительности от 4 до 400 кВт. Для этого контроллер привода обеспечивает оптимальную производительность при управлении крутящим моментом, скоростью и положением.

КЕВ COMBIVERT S6, осуществляет управление для асинхронных двигателей переменного тока, а так же для синхронных сервоприводов. Кроме того, контроллер привода обеспечивает оптимальную производительность в момент вращения, скорости и управлении положением. Модульный тип привода и одинаковый типоразмер, обеспечивают удобный монтаж для всего диапазона изделий. КЕВ COMBIVERT S6 предлагает современный функционал для связи различных устройств и обеспечения безопасности системы, при решении любых задач, отвечающий всем требованиям современных сервоприводов.

В таблице 2 указаны параметры преобразователей частоты COMBIVERT F5.

Таблица 2 – Параметры моделей серии COMBIVERT F5

Модель Корпус преобразователя		Basic	Compact	Multi		SCL		ASCL
		B	C	A	A/K	E		H
		ABDE	BDEGHR	A	DEGHRUWP	A	DEGHRUWP	DEGHRUWP
Режим работы	Управление без обратной связи	•	•	•	•	–	–	•
	Управление с обратной связью	–	–	•	•	•	•	•
	Управление без датчика	–	–	–	–	•	•	•
	Режим AC Servo	–	–	•	•	•	•	•
	Режим управления вектором поля	–	–	•	•	•	•	•
	Векторный режим без датчика	•	•	•	•	–	–	•
	U/f режим	•	•	•	•	–	–	•

Продолжение таблицы 2

Модель Корпус преобразователя		Basic	Compact	Multi		SCL		ASCL	
		B	C	A	A/K	E		H	
		ABDE	BDEGHR	A	DEGHRUWP	A	DEGHRUWP	DEGHRUWP	
Плата управления	Источник питания	внутрен.	внутрен.	внешн.	внутрен.	внешн.	внутрен.	внутрен.	
	Уровень напряжения (max 100 мА)	24VDC	24VDC	–	24VDC	–	24VDC	24VDC	
	внешний источник 24 В	–	•	•	•	•	•	•	
	Время выборки входов/выходов	2 ms	2 ms	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	
	Количество клемм	17	29	17	29	17	29	29	
	Съемные клеммники	•	•	•	•	•	•	•	
Входы	Аналоговые	Количество	1	2	1	2	1	2	2
		харак.-ка 0...10V; ±10V	•	•	•	•	•	•	•
		0...20 мА/4...20 мА	–	•	–	•	–	•	•
		Со свободным потенциалом	(1 пол. земл.)	•	•	•	•	•	•
		Разрешение	11 bit	12 bit	11 bit	12 bit	11 bit	12 bit	12 bit
		Быстрое время выборки	–	250 μs	250 μs	250 μs	250 μs	250 μs	250 μs
		Режим сохранения	•	•	•	•	•	•	•
	Цифровые	Количество	5	8	5	8	5	8	8
		характеристика	PNP	PNP/NPN	PNP	PNP/NPN	PNP	PNP/NPN	PNP/NPN
		программно переключаемые	– (13...30 VDC)	• (10...30 VDC)	– (13...30 VDC)	• (10...30VDC)	– (13...30 VDC)	• (13...30VDC)	• (13...30VDC)
Выходы	Цифр.	Количество	–	2	2	2	2	2	
		открытый коллектор (max. 50 мА)	–	•	•	•	•	•	•
	Реле	Количество	2	2	1	2	1	2	2
		Сухой контакт (30VDC/1A)	•	•	•	•	•	•	•
	Аналог.	Количество	1	2	1	2	1	2	2
		харак.-ка 0...10V; ±10V	•	•	•	•	•	•	•
			(5мА)	2x(5мА)	(5мА)	2x(5мА)	(5мА)	2x(5мА)	2x(5мА)
	Разрешение	11 bit							
Плата обратной связи		–	–	стандарт	опция	стандарт	опция	опция	
	2 входа	–	–	•	•	•	•	•	
	Позиционирование по 2 входу	–	–	•	•	•	•	•	
	TTL выход	–	–	•	•	•	•	•	
	Аналоговый датчик	–	–	Резольвер	Резольвер	Резольвер	Резольвер	Резольвер	
					Sin/Cos		Sin/Cos		
					Тахогенер.-р		Тахогенер.-р		
	Цифровой датчик	–	–	TTL	TTL	TTL	TTL	TTL	
UVW					UVW				
Инциатор					Инциатор				

1.4 Особенности преобразователей частоты HITACHI

Компания Hitachi Ltd. была основана в 1910 году в Японии. Изначально компания занималась производством электродвигателей. Сегодня Hitachi Ltd. – это финансово-промышленная группа, в состав которой входит более 1100 компаний по всему миру. Деятельность компании разделяется на несколько направлений, в том числе – электроника и промышленная техника.

Компания Hitachi начала производство преобразователей частоты с 1979 года и в настоящее время является одним из мировых лидеров в этой отрасли. Преобразователи Hitachi разработаны с учетом возможностей электросетей и международных стандартов, таких как CE и UL. В ПЧ Hitachi используются инновационные компоненты, такие как ISPM модуль, передовое бессенсорное векторное управление (БВУ).

Прогрессивное решение фирмы HITACHI в сфере управления электроприводами в составе комплексной автоматики, которые требуют высокого крутящего момента, а также стабилизации скорости вращения двигателя в диапазоне регулирования. Это преобразователи частоты с широким спектром применения в управлении асинхронными двигателями.

Например, серия Hitachi WJ200. Это серия ПЧ обеспечивает превосходную производительность и удобства для пользователя. Преобразователь Hitachi WJ200 компактный, с полностью векторным управлением, может использоваться в системах электропривода номинальной мощностью от 0,2 до 15 кВт. WJ200 выпускается как с однофазным, так и трехфазным выходом. В преобразователе частоты имеется встроенная функция автоматической настройки (автотюнинг) для организации простого безвекторного управления, что позволяет реализовать высокий пусковой момент до 200% или более. Также в преобразователе частоты Hitachi WJ200 имеет встроенные функции EasySequence, которые обеспечивают функциональность по автоматизации управления, сравнимую с ПЛК.

Hitachi SJ200 – мощный преобразователь со встроенным фильтром, обладающий улучшенной технологией ISPM с векторным управлением. Отличные характеристики работы и конструкция обеспечивают высокий крутящий момент для использования в тяжелых условиях эксплуатации. ПЧ SJ200 имеет очень компактные габариты для преобразователя своего класса и подходит для различного применения в различных отраслях промышленности, в том числе для металлообрабатывающей. Диапазон выходной мощности преобразователя SJ200 от 0,2 до 7,5 кВт. Обеспечивается пусковой момент 200% от номинального, PID-регулирование и автоматическое регулирование напряжения. ПЧ SJ200 оборудован встроенным блоком торможения, потенциометром и фильтром электромагнитных помех (EMC). Также этот ПЧ имеет встроенный интерфейс RS485 и вход для подключения термистора двигателя.

SJ200 соответствует стандартам CE, UL, cUL и c-Tick. Модель имеет встроенную автоматическую функцию энергосбережения и возможность безсенсорного векторного регулирования (SLV).

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

ПЧ Hitachi SJ300 – один из самых мощных и компактных преобразователей в своем классе. Применяется как в металлургическом производстве, так и машиностроительной промышленности. Преобразователь частоты с функцией полного векторного контроля. Функция "Улучшенный бессенсорный векторный контроль" обеспечивает более 200% пускового момента и полный момент на частоте близкой к нулевой. Параметры частотных преобразователей серии Hitachi SJ300 даны в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры моделей серии Hitachi SJ300 мощность до 18,5 кВт

Инвертор SJ300		400В/ 3 фазы								
Модель		007HFE	015HFE	022HFE	037HFE	055HFE	075HFE	110HFE	150HFE	185HFE
Степень защиты		IP20 (NEMA1)								
Макс. мощность применяемого двигателя (4 Полюса)		0,75	1,5	2,2	3,7	5,5	7,5	11	15	18,5
Входное напряжение		3 фазы 380-480В (±10%)/50 Гц/60Гц (±5%)								
Выходное напряжение		3 фазы 380-480В (в зависимости от напряжения питания)								
Номинальный выходной ток (А)		2,5	3,8	5,3	8,6	12	16	23	32	38
Метод управления		Высокочастотный ШИМ								
Диапазон выходной частоты		0,1 - 400Гц								
Точность установки частоты		При цифровой установке: ±0,01% от макс. частоты, при аналоговой установке: ±0,02% от максимальной частоты								
Шаг изменения частоты		При цифровой установке: 0,01 Гц. При аналоговой установке: (Макс. частота/4000)								
Характеристика напряжение/частота		Базовая частота может быть установлена в диапазоне 30-400Гц, v/f (линейная, квадратичная), бессенсорный векторный контроль								
Точность поддержания скорости		±0,5% (при бессенсорном векторном контроле)								
Перегрузка по току		150% в течение 60 сек, 200% в течение 0,5 сек.								
Время ускорения/замедления		0,01-3600,0 сек. (при линейной и нелинейной характеристиках разгона/замедления)								
Пусковой момент		200%/0,5 Гц (в режиме бессенсорного векторного контроля), 150%/0 Гц (при использовании двигателей на класс ниже)								
Торможение	Динамическое торможение с исп. вн. торм. резистора	Тормозной резистор встроен в пч						Использование внешнего модуля торможения		
	Торможение постоянным током	Торможение активизируется при заданной частоте или при подаче внешнего управляющего сигнала (частота, время торможения и тормозной момент)								
Входной терминал	Стандартное управление частотой	Установка выходной частоты клавишами ВВЕРХ/ВНИЗ на пульте оператора								
	Установка выходной частоты внешним управляющим сигналом	0~ +10В, -10В ~ +10В, (входное сопротивление 100Ом) 0-20 мА, 4~20мА, (входное сопротивление 100 Ом)								
	Установка выходной частоты с внешнего порта	Интерфейс RS485/RS422								
	Стандартное управление запуском	Клавишами RUN/STOP на встроенном пульте оператора								
	Запуск/остановка в прямом и обратном направлении внешним сигналом	Клеммы FW, RV (замыканием/размыканием) трехпроводное управление. Аналоговым сигналом +/- 10В по входу 02								
Программируемые дискретные входы		8 произвольно настраиваемых клемм (RV, CF1 - CF4, JG, DB, SET, 2 CH, FRS, EXT, USP, CS, SFT, AT, SET3, RS, STA, STP, F/R, PID, PIDC, UP/DWN, UDC, SF1- SF7, LOAD, TL, TRQ1, TRQ2, P/PI, NON)								

Продолжение таблицы 3

Выходной терминал	Программируемые выходы	5 произвольно программируемых выходов с открытым коллектором (RUN, FA1, AC0, AC1, AC2, AC3, FA3, IP, UV, TRQ OL, OTQ, FA2, AL, OD)
	Аналоговые выходы	0-10В, 4-20мА (линейные), импульсный (отображение выходного тока, вращающего момента, выходного напряжения, мощности)
Рабочие функции	Основные функции	Выбор метода управления (5 различных вариантов), установка произвольной вольт-частотной характеристики по 7 контрольным точкам, установка базовой и максимальной частот, установка резонансных частот, 16-ти ступенчатый многоскоростной режим, 2-х стадийный разгон/замедление, установка характеристик разгона/замедления, ручная настройка повышения момента, работа на выбеге и остановка, функция внешнего управления электронным потенциометром установки частоты, ПИД-регулятор, 3-х позиционное управление запуском/остановкой, энергосберегающий режим, настройка аналоговых входов и выходов, установка стартовой частоты, установка несущей частоты (ШИМ), электронная защита двигателя, установка диапазона рабочих частот, автоматический перезапуск после
	Функции контроля и управления	Функция AVR (автоматической стабилизации напряжения в звене постоянного тока), Характеристика разгона/замедления, Автонастройка, Управление 2-мя двигателями в режиме бессенсорного векторного контроля
	Дисплей	Выходная частота, Выходной ток, Момент двигателя, Преобразованное значение частоты, Журнал ошибок, Состояние клемм I/O, Выходная мощность, Выходное напряжение
Диапазон несущей частоты		0,5-15 кГц
Функции защиты		Защита от перегрузки по току, от повышенного и пониженного напряжения, Электронная термозащита двигателя, Защита от перегрева, от короткого замыкания, от мгновенного отключения питания, Защита от ошибки USP, от неполнофазного режима работы, Защита от перегрузки резистора BRD, от ошибки CT, от внешнего отключения, от сбоя в дополнительном оборудовании, от ошибки связи
Функции отображения		Цифровой 4-х разрядный светодиодный дисплей (стандартная комплектация) / Пульт дистанционного управления DRW (на 6 языках: английский, немецкий, французский, испанский, итальянский, португальский)
Условия	Температура окружающей среды (Хранения)	от - 10 до +40 °С (до +50°С) (от -20до +65 °С)
	Влажность воздуха	5 + 90 %, без конденсата
	Уровень вибрации	Не более 5,9 m/s ² (0,6 G), 10 + 55 Гц
	Место эксплуатации	Высота не более 1000 м, в помещении свободном от коррозионных газов и пыли
Дополнительное оснащение		Фильтр электромагнитной совместимости, Входные/выходные дроссели, дроссели для звена постоянного тока, устройство динамического торможения (>18,5 кВт), Тормозной резистор, синус-фильтр

Hitachi SJ700 – это один из самых универсальных среди преобразователей частоты. Программируемый функционал позволяет адаптировать ПЧ к выполнению многих типов задач. Диапазон мощностей ПЧ SJ700 – до 400 кВт. Бессенсорное векторное управление позволяет обеспечить оптимальный крутящий момент и контролировать скорость вращения даже при высокой нагрузке. У ПЧ SJ700 имеются разные интерфейсы промышленных сетей, что позволяет интегрировать его в разнообразные системы (такие как Profibus, DeviceNet и CANopen). Модель ПЧ SJ700 также снабжена встроенным блоком торможения (до 22 кВт), фильтром электромагнитных помех (ЕМС) и функцией подавления скачков тока и напряжения при переходных процессах работы системы.

1.5 Особенности преобразователей частоты LS Industrial Systems

С марта 2005 г. компания LG Industrial Systems Co., Ltd. (Южная Корея) сменила название и логотип. Компания была основана в 1974 г, а в 1995 году объединилась с компаниями Goldstar Instrument & Electric Co., Ltd. и Goldstar Electric Machinery Co., Ltd.

Компания LS Industrial Systems успешно развивается и расширяет свои производственные мощности, как в Корее, так и в других странах, в настоящее время является одним из лидеров по производству промышленного электрооборудования и систем автоматизации. Компания располагает всемирной сетью офисов по работе с покупателями. Служба по работе с покупателями обеспечивает технической информацией, оперативно консультирует и предоставляет техническое обслуживание клиентам из любой страны.

ПЧ LS Industrial Systems преобразуют одно- или трехфазного напряжения с постоянной частотой 50 Гц в трехфазное напряжение переменной частотой в диапазоне от 0,2 до 400 Гц. Это свойство делает возможным их широкое применение для плавного регулирования скорости любых АД, в том числе в приводе насосов, компрессоров, лифтов, подъемников и других механизмов.

Модельный ряд инверторов LS представлен несколькими сериями. Такими, например, как: IE5, IC5, IG5A, IS5, IS7, IP5A, IV5. Каждая из них имеет свои области оптимального применения.

LSiS7 – самый быстрый и точный из них. Это ПЧ с полным векторным управлением. Мощность преобразователей 0,75160 кВт, класс защиты до IP54.

Общие характеристики преобразователей частоты LS IS:

- Пространственно-векторное ШИМ управление;
- Увеличение момента на малых скоростях до 150%;
- Изменяемая частота модуляции до 15 КГц;
- Рассчитаны на работу с высоким пусковым моментом;
- Встроенный ПД или ПИД-регулятор;
- Встроенный или внешний коммутирующий тормозной IGBT-транзистор;
- Программируемая характеристика В/Гц;
- 8 программируемых скоростей;
- Программируемые входы/выходы;
- Энергосберегающая функция;
- Компенсация проскальзывания;
- Множество защитных функций;
- Чтение и запись с отсоединяемого пульта управления

В таблице 4 даны параметры моделей серии LS iS7.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Таблица 4 – Параметры моделей серии LS iS7

Модель: SV □□□iS7-4 □		008	015	022	037	055	075	110	150	185	220	300	370	450	550	750	900	1100	1320	1600	
Мощность двигателя	(кВт)	0.75	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37	45	55	75	90	110	132	160	
Выходные параметры	Нагрузочная способность (кВА)	1.9	3	4.5	6.1	9.1	12.2	17.5	22.9	29.7	34.3	46	57	69	84	116	139	170	201	248	
	Ток при полной нагрузке (СТ) (А)	2.5	4	6	8	12	16	24	30	39	45	61	75	91	110	152	183	223	264	325	
	Напряжение (В)	4	6	8	12	16	24	30	39	45	61	75	97	110	152	183	223	264	325	370	
	Частота (Гц)	Три фазы, 380 – 480 В																			
Входные параметры	Частота (Гц)	0,01 – 400 Гц (Векторное управление без датчика: 0.01 – 300 Гц; Векторное управление с датчиком: 0.01 – 120 Гц)																			
	Ток при полной нагрузке (СТ) (А)	4.3	7.2	10.6	15.4	21	25.4	39	44	57	57	69	83	113	154	195	195	239	286	362	
Управление	Способ управления	V/F-управление, V/F-управление с обратной связью (энкодер), компенсация скольжения, векторное управление с датчиком / без датчика																			
	Дискретность настройки частоты	Цифровая: 0.01 Гц / Аналоговая: 0.06 Гц (Макс. частота: 60 Гц)																			
	Точность настройки частоты	Цифровая: 0.01 % от макс. частоты на выходе / Аналоговая: 0.1 % от макс. частоты на выходе																			
	V/F характеристика	Линейная • Квадратичная • Заданная пользователем V/F																			
Способы управления	Допустимая перегрузка	СТ номинальный ток: 150% время работы 1 минута, УТ номинальный ток: 110 % время работы: 1 минута																			
	Формирование момента	Автоматическое • Ручное																			
	Пульт управления	Графический ЖК дисплей • Выбор языка (6 вариантов)																			
	Источники задания пусковых команд	Нуль управления • Многофункциональные входы • Опция коммуникации																			
Входной сигнал	Задание частоты	Аналоговый сигнал: 0 – 10 В / 0 – 10 В / 0 – 20 мА / Цифровой сигнал: пульт управления																			
	Функции управления	ПИД контроль • Увеличение / уменьшение частоты • 3-х проводное регулирование • Торможение постоянным током • Ограничение частоты • Второй двигатель • Автостарт • Компенсация скольжения • Байпас • Компенсация скольжения • Поиск скорости и т.д.																			
Выходной сигнал	Многофункциональные клеммы (P1 – P8)	Возможность выбора RMP / RPN логики																			
	Многофункциональное реле	8 перепрограммируемых входов																			
Защитные функции	Выходной сигнал	Выход сообщения об ошибке и состоянии преобразователя (И.О. Н.З.) Менее – 250 В, 1 А / Менее – 30 В, 1А – 24 В (Менее чем 50 мА)																			
	Отключение выхода	0 – 10 В = (менее 20 мА): частота, ток, напряжение, напряжение постоянного тока																			
Класс защиты	Сигнализация	Перенапряжение • Пониженное напряжение • Перегрузка по току • Замыкание на землю • Перегрев инвертора • Перегрев двигателя • Защита от перегрузки • Ошибка коммуникации • Потеря контроля скорости • Отказ вентилятора • Внешний сбой и т.д.																			
	Опции	Защита от опрокидывания двигателя • Перегрузка • Ошибка энкодера • Выход из строя вентилятора • Потеря связи с пультом																			
Другое	Платы, клавиатура, кабель	Потеря контроля скорости																			
	Платы коммуникации	IP21 (0,75 – 75 кВт), IP20 (90 – 160 кВт), IP54 (0,75 – 22 кВт), UL Тип 1 (Опция)																			
		Клавиатура с ЖК (IP21) • Плата расширения входов/выходов I/O • Плата энкодера • Плата PLE • Кабель для клавиатуры (2м / 3м)																			
		Платы расширения интерфейса Profibus-DP, DeviceNet, Modbus TCP, Rnet, LonWorks, CANopen, EtherNet/IP																			
		Встроенный тормозной резистор (0,75 – 22 кВт) • Встроенный интерфейс RS-485 (протокол коммуникации LS Bus / Modbus RTU)																			

1.6 Особенности преобразователей частоты «Эффективные системы»

Компания «Эффективные системы» – крупный отечественный производитель преобразователей напряжения, устройств плавного пуска, средств для автоматизации производства и энергосберегающего оборудования.

Благодаря построенной технологической базе, отлаженной системе производства оборудования и использованию комплектующих от ведущих мировых производителей WESTCODE, IXYS и INFINEON продукция компании не уступает продукции ведущих мировых марок и поставляется на многие промышленные предприятия России, страны СНГ и зарубежья. Компания выпускает преобразователи частоты следующих серий: ES022, ES024, ES025, ES026.

В таблице 5 представлены характеристики этих преобразователей.

Таблица 5 – Параметры преобразователей частоты серий ES

Серия		ES021	ES022	ES024	ES025	ES026
Способ управления	по амплитудно-частотной характеристике	линейная, с понижением момента трех степеней, настраиваемая пользователем	линейная, с понижением момента степени 2.0	линейная, с понижением момента трех степеней, настраиваемая пользователем	линейная, с понижением момента трех степеней, настраиваемая пользователем	линейная, с понижением момента трех степеней, настраиваемая пользователем
	векторный без обратной связи	-	+	+	+	+
	векторный с обратной связью	-	-	+	-	+

Продолжение таблицы 5

Серия		ES021	ES022	ES024	ES025	ES026
Точность задания частоты		±0,1% f _{макс} аналоговая ±0,01 Гц цифровая	±0,1% f _{макс} аналоговая ±0,01 Гц цифровая	±0,1% f _{макс} аналоговая ±0,01 Гц цифровая	±0,1% f _{макс} аналоговая ±0,01 Гц цифровая	±0,1% f _{макс} аналоговая ±0,01 Гц цифровая
Глубина регулирования скорости		1:100	1:100 (векторный без обратной связи)	1:100 (векторный без обратной связи) 1:1000 (векторный с обратной связью)	1:100 (векторный без обратной связи)	1:100 (векторный без обратной связи) 1:1000 (векторный с обратной связью)
Точность поддержания скорости		±1%	±0,5%	±0,5% (векторный без обратной связи) ±0,02% (векторный с обратной связью)	±0,5% (векторный без обратной связи)	±0,5% (векторный без обратной связи) ±0,02% (векторный с обратной связью)
Пусковой момент		150% при 0,5 Гц	150% при 0,5 Гц	150% при 0,5 Гц (векторный без обратной связи) 180% при 0 Гц (векторный с обратной связью)	150% при 0,5 Гц (векторный без обратной связи)	150% при 0,5 Гц (векторный без обратной связи) 180% при 0 Гц (векторный с обратной связью)
Перегрузочная способность		тип А: 150% - 1 мин, 180% - 10 с тип F: 120% - 1 мин, 150% - 10 с	150% - 1 мин, 180% - 10 с	150% - 1 мин, 180% - 10 с	тип А: 150% - 1 мин, 180% - 10 с тип F: 120% - 1 мин, 150% - 10 с	150% - 1 мин, 180% - 10 с
Последовательный порт		RS485	RS485	RS485/RS232 (опция)	RS485	RS485/RS232 (опция)
Протокол связи		ModBus	ModBus	ModBus	ModBus	ModBus
Режимы ускорения/замедления		Линейный	Линейный	Линейный; S-образный	Линейный	Линейный; S-образный
Торможение	постоянным током	+	+	+	+	+
	динамическое	до 15 кВт встроенный блок торможения	до 15 кВт встроенный блок торможения	до 15 кВт встроенный блок торможения	до 15 кВт встроенный блок торможения	до 15 кВт встроенный блок торможения
Тип управляющих входов	аналоговые	0-10В 0-10В/4-20мА	0-10В 0-10В/4-20мА	0-10В 0-10В/4-20мА -10-10В (опция) 0-10В/4-20мА (опция)	-10-10В 0-10В/4-20мА	0-10В 0-10В/4-20мА -10-10В (опция) 0-10В/4-20мА (опция)
	программируемые «сухой контакт»	4	4	5 3 дополнительных (опция)	7	5 3 дополнительных (опция)
	импульсные	1 (0 - 50 кГц)	-	1 (0 - 50 кГц) 1 дополнительный (опция)	1 (0 - 50 кГц)	1 (0 - 50 кГц) 1 дополнительный (опция)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ

Лист

18

1.7 Особенности преобразователей частоты компании ОВЕН

Отечественная компания ОВЕН была основана в 1991 году. Эффективность системы менеджмента компании на соответствие международным стандартам подтверждена сертификатом ISO 9001-2001.

В 2010 в ассортименте выпускаемой продукции появились преобразователи частоты ОВЕН ПЧВ.

ОВЕН сегодня:

- 28 лет на рынке средств автоматизации.
- Собственное производство с современным оснащением для серийного выпуска приборов.
- Продукция ОВЕН работает на тысячах предприятий России и стран СНГ.
- Более 140 региональных дилеров – во всех регионах РФ и странах СНГ.
- Сеть региональных сервисных центров.
- Более 150 вузов России оснащены приборами ОВЕН.
- Бесплатная техподдержка: 24 × 7.

Компания ОВЕН выпускает две линейки преобразователей частоты – ПЧВ1/ПЧВ2 и ПЧВ3. Общепромышленная линейка частотников ПЧВ1/ПЧВ2 включает 5 модификаций с однофазным входом мощностью 0,18...2,2 кВт и 12 модификаций с трехфазным входом (0,37...22 кВт). ПЧВ3 – векторные преобразователи частоты для насосов и вентиляторов.

Универсальная линейка частотных преобразователей ПЧВ1/ПЧВ2 имеет большой набор функций для решения основных задач частотного управления. Поэтому может быть использована для управления электроприводами на базе АД в любых отраслях промышленности и ЖКХ. Основные функциональные возможности:

- Автоматическая адаптация двигателя без вращения;
- Плавный пуск и останов двигателя, в том числе отложенный запуск и пуск под нагрузкой по S-образной характеристике разгона;
- Вольт-частотный или векторный алгоритмы управления;
- Автоматическая оптимизация энергопотребления, обеспечивающая высокий уровень энергоэффективности;
- Компенсация нагрузки и скольжения;
- Полная функциональная и аппаратная диагностика и защита работы ПЧВ;
- Встроенный сетевой дроссель и дроссель в звене постоянного тока;
- Встроенный ПИ-регулятор для управления в замкнутом контуре;
- Встроенный ПЛК;
- Возможность работы с внешними инкрементальными энкодерами, в том числе для поддержания малых частот вращения с большой точностью;
- Возможность динамического торможения, в том числе с применением тормозных резисторов;

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

- Гибкая структура управления с возможностью одновременного управления по физическим входам и по интерфейсу RS-485, что обеспечивает удобную интеграцию в современные системы управления и диспетчеризации;
 - Простая настройка в русскоязычном конфигураторе или с использованием локальной панели оператора. Быстрые меню и готовые конфигурации под типовые задачи;
 - Диапазон регулирования до 1:1000;
 - Точность поддержания скорости до 0,1% от фактической;
 - Точность поддержания момента до 0,5% от фактического.
- Параметры ПЧВ1, 2 даны в таблицах 6–8.

Таблица 6 – Технические характеристики управления ПЧВ1, 2

Характеристика	Значение
Принцип управления	Скалярный (U/f) или векторный (V)
Выходная частота, Гц	0 ... 400 (U/f), 0 ... 200 (V)
Шаг установки частоты, Гц	0,1
Шаг изменения выходной частоты, Гц	0,1
Частота коммутации инвертора, кГц	2 ... 16
Компенсация крутящего момента, %	Автоматическая
Стартовая компенсация до 5 Гц, (%)	150
Компенсация скольжения от номинального, (%)	Автоматическая от минус 400 до 399.
Фиксированная частота, Гц	0,1 ... 400
Уровень защиты по выходному току от номинального, (%)	50 ... 200
Момент резисторного торможения, (%)	20...120
Вольт-частотная характеристика, U/f	Программируемая, до 5 точек

Таблица 7 – Характеристики источников сигналов управления ПЧВ1,2

Характеристика	Значение	
Установка частоты	Управление с ЛПО	Посредством кнопок «БОЛЬШЕ/МЕНЬШЕ»
	Внешние задания	0 ~ 10 В, 4 - 20 мА, порт (RS-485)
Управление режимами	ЛПО	Посредством кнопок
	Цифровые входы	Вперед / Стоп; Реверс / Стоп; Работа / Стоп; Вперед / Реверс; Фиксированная частота; Счетчики
Выходные цифровые сигналы	Готовность; Работа; Пределы тока/ задания; Тормоз; Логика ПЛК; Предупреждение/авария.	
Аналоговый выходной сигнал	Выходная частота; Задание; ОС; Ток АД; Мощность АД; Задание по RS-485	
Встроенные функции	ААД; АОЭ; АПВ; Запуск с хода; Контроль перенапряжения; Компенсация нагрузки/скольжения	
	S образная кривая разгона/замедления	
Защитные функции	Контроль напряжения сети/цепи АД; Перегрузка/перегрев ПЧВ/АД; Изоляция/пробой ПЧВ/АД	

Таблица 8 – Основные технические характеристики ПЧВ1, 2

Характеристика	Значение
Питание от сети (клеммы L1, L2, L3)	
Перегрузочная способность по моменту, (%):	
- длительно;	110
- 60 сек;	150
- 1 сек	160
Выходные характеристики (U, V, W)	
Выходное напряжение, (%)	0 – 100 от напряжения питания
Частота выходного сигнала, Гц	0 ... 400 (скалярное управление); 0 ... 200 (векторное управление).
Количество коммутаций нагрузки к выходу	Без ограничений
Время разгона / замедления, сек	0,05 ... 3600
Цифровые входы	
Количество цифровых входов	5
Логика	PNP или NPN
Уровень напряжения, В	+0 ... 24
Максимальное напряжение на входе, В	+28
Входное сопротивление, кОм	≈ 4
Цифровой вход 29 - вход термистора (pnp)	Отказ: > 2,9 кОм; норма: < 800 Ом
Аналоговые входы	
Количество аналоговых входов	2
Режимы	Клемма 53: напряжение или ток Клемма 60: ток
Рабочий уровень напряжения, В	+0 ... 10
Максимально- допустимое напряжение, В	20
Входное сопротивление, кОм	~ 10
Рабочий уровень тока, мА	+0 ... 20; +4 ... 20
Максимально-допустимый ток, мА	29
Входное сопротивление, Ом	~ 200
Относительная погрешность входов, %	± 0,5
Разрешение аналоговых входов, бит	12
Аналоговый/цифровой выход	
Количество программируемых выходов	1
Диапазон тока нагрузки, мА	+0 ... 20; +4 ... 20
Максимальное сопротивление нагрузки, Ом	500
Максимальное напряжение на нагрузке, В	+17
Относительная погрешность, %	± 0,4
Разрешающая способность, бит	12

Выводы по разделу один

В данном разделе были проанализированы возможности, технические характеристики и области применения преобразователей частоты российских и иностранных производителей. Проведенный анализ будет полезен при выборе преобразователя частоты для электропривода главного движения горизонтально-фрезерного станка модели 6Н82Г.

2 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 6Н82Г

2.1 Назначение и область применения

Горизонтальный консольно-фрезерный станок 6Н82Г был изготовлен Горьковским заводом фрезерных станков. Он предназначен для обработки различных изделий небольших и средних размеров из цветных металлов, стали, чугуна, а также пластмасс. В основном работа ведется дисковыми, торцовыми, цилиндрическими, угловыми, модульными и фасонными фрезами, специальными фрезами в условиях индивидуального и серийного производства. На станке обрабатываются вертикальные и горизонтальные плоскости, пазы, углы, рамки и тому подобное. Также возможно выполнение сверлильных и расточных работ. Высокая жесткость станка в сочетании с мощным приводом обеспечивают обработку изделий на скоростных режимах резания с использованием фрезы с пластинами из быстрорежущей стали, а также из твердых и сверхтвердых материалов. Класс точности станка – Н. Допустимый вес обрабатываемых изделий до 250 кг.

2.2 Описание конструкции станка

Основные узлы консольного горизонтально-фрезерного станка 6Н82Г показаны на рисунке 1.

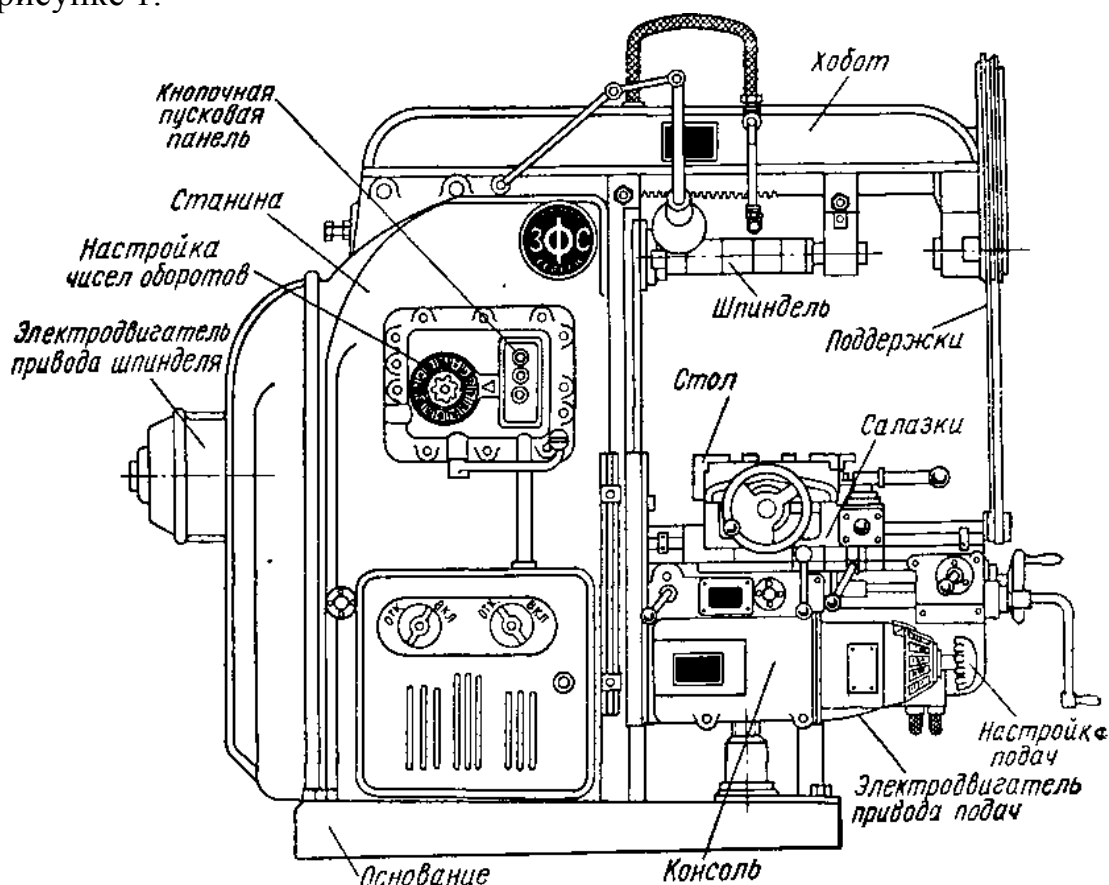


Рисунок 1 – Основные узлы горизонтального фрезерного станка 6Н82Г

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ

Лист

22

Основание станка отливается из серого чугуна и точно прострагивается с обеих сторон. На одну сторону основания устанавливается и закрепляется болтами станина станка; другая сторона прилегает к полу. В основании имеется корыто для охлаждающей жидкости, которая стекает по трубкам со стола. На основании смонтирован электронасос для подачи охлаждающей жидкости к инструменту.

Станина служит для крепления всех узлов и механизмов станка. Некоторые узлы станка (коробка скоростей, электродвигатель с ременной передачей, механизм передачи движения к коробке подач и шпиндель станка) расположены внутри станины. Другие узлы станка (консоль, коробка подач, хобот, стол, насос для подачи охлаждающей жидкости) находятся на наружных поверхностях станины.

Станина имеет коробчатую форму и усилена изнутри ребрами; на передней стенке ее расположены вертикальные направляющие (выполненные в виде «ласточкина хвоста») для консоли, а наверху – горизонтальные направляющие для хобота.

Станина является основной частью фрезерного станка и изготавливается точно по чертежу и техническим условиям. Она отливается из качественного чугуна и тщательно обрабатывается.

Хобот служит для правильной установки и поддержки фрезерной оправки. Хобот установлен в горизонтальных направляющих на верхней части станины и может быть закреплен на любом расстоянии от ее зеркала, то есть с различным вылетом. Для увеличения жесткости при обработке тяжелых деталей и при больших сечениях стружки применяют поддержки, которые связывают хобот с консолью.

Консоль представляет собой жесткую чугунную отливку, установленную на вертикальных направляющих станины. Консоль перемещается по вертикальным направляющим станины и несет горизонтальные направляющие для салазок. Она поддерживается стойкой, в которой расположен телескопический винт для подъема и опускания консоли. Жесткость конструкции консоли и точность ее направляющих имеют первостепенное значение для работы станка. В консоли находятся два болта, которыми крепятся поддержки, связывающие стол станка с хоботом для лучшей устойчивости при больших нагрузках.

Салазки являются промежуточным звеном между консолью и столом станка. По верхним направляющим салазок движется стол в продольном направлении, а сами салазки перемещаются в поперечном направлении по верхним направляющим консоли.

Стол монтируется на направляющих салазок и перемещается в продольном направлении. На столе укрепляются заготовки, зажимные и другие приспособления, для чего рабочая поверхность стола имеет продольные Т-образные пазы.

Перемещение стола, салазок и консоли сообщает заготовке продольную, поперечную и вертикальную подачи по отношению к фрезе.

Станок имеет как ручную, так и механическую подачу стола, салазок и консоли.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Для установочных перемещений при наладке и для холостых перебегов стола можно применять ручную или механическую подачу, а для рабочих подач – только механическую.

Кроме рабочих подач стол имеет быстрый ход (ускоренное перемещение) во всех трех направлениях. Быстрый ход предусмотрен для подвода заготовки к фрезе, а также для обратного перемещения стола.

Быстрый ход осуществляется с одной постоянной скоростью, а рабочие подачи имеют несколько ступеней, которые можно устанавливать при помощи коробки подач в зависимости от характера обработки, материала фрезы и заготовки.

Шпиндель. Для вращения режущего инструмента служит шпиндель, который получает движение от коробки скоростей. От точности изготовления шпинделя, от его прочности и жесткости зависит точность вращения оправки с надетой фрезой. Шпиндели фрезерных станков изготавливают из легированной стали марки 40Х и подвергают термической обработке. Шпиндель изготавливают пустотелым.

Для точной его работы применяют точные подшипники. У станков 6Н82Г имеются три подшипниковые опоры: по диаметрам шеек 65П1 и 90Н1 надеты роликоподшипники, а по диаметру 50П – шарикоподшипник.

Привод шпинделя осуществляется от электродвигателя, расположенного в станине станка. Вращение на шпиндель станка передается через шкив и ременную передачу. Двигатель расположен внутри станины, благодаря чему повышается безопасность работы и сокращается площадь, занимаемая станком.

Привод подач стола осуществляется от электродвигателя, расположенного в консоли станка, через коробку подач.

На станке имеются отдельные электродвигатели для привода коробки скоростей и для привода коробки подач.

Коробка скоростей предназначена для передачи вращения от шкива шпинделя и для изменения числа его оборотов при помощи переключения зубчатых колес.

Коробка подач служит для изменения величины подач стола в вертикальном, продольном и поперечном направлениях.

Кинематическая схема горизонтального фрезерного станка 6Н82Г приведена на чертеже 13.03.02.2020.054.02.00 КЗ.

Цепь главного движения. Шпиндель получает вращение от фланцевого электродвигателя мощностью 7 кВт с 1440 об/мин через упругую соединительную муфту и зубчатые колеса механизма пятываловой коробки скоростей, сообщающие шпинделю 18 различных чисел оборотов в пределах от 30 до 1500 об/мин.

От вала I вращение передается валу II зубчатой парой 26 : 54; далее валу III через зубчатые пары 16 : 39 или 19 : 36, или 22 : 33; валу IV через зубчатые пары 18 : 47 или 28 : 37 или 39 : 26; валу V (шпинделю) через зубчатые пары 19 : 71 или 82 : 38.

На рисунке 2 показано расположение составных частей горизонтального фрезерного станка 6Н82Г.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

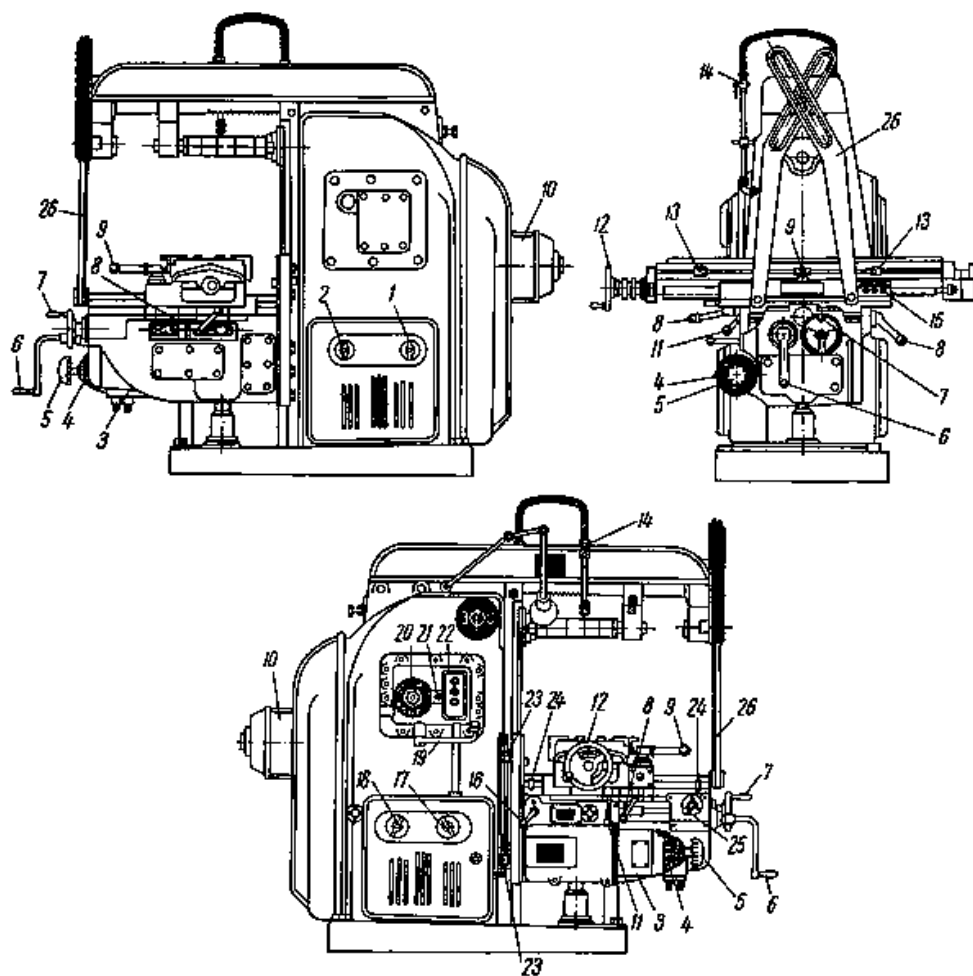


Рисунок 2 – Расположение составных частей горизонтального фрезерного станка 6H82Г

- 1 – включение насоса охлаждающей жидкости;
- 2 – реверсирование вращения шпинделя (влево-вправо);
- 3 – электродвигатель привода стола;
- 4 – лимб с нанесенными величинами подач;
- 5 – грибок переключения подач;
- 6 – рукоятка ручного вертикального перемещения стола;
- 7 – маховичок ручного поперечного перемещения стола;
- 8 – рукоятка зажима салазок на консоли;
- 9 – рукоятка включения продольного хода стола;
- 10 – электродвигатель привода шпинделя;
- 11 – дублирующая рукоятка включения продольного хода стола;
- 12 – маховичок ручного продольного перемещения стола;
- 13 – кулачки автоматического выключения продольной подачи стола;
- 14 – кран охлаждающей жидкости;
- 15 – кнопочная пусковая панель на передней стороне салазок;
- 16 – дублирующая рукоятка включения поперечной и вертикальной подач;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ

Лист

25

- 17 – включение освещения станка;
- 18 – включение станка;
- 19 – рукоятка переключения скоростей шпинделя;
- 20 – лимб с нанесенными числами оборотов;
- 21 – указатель коробки скоростей;
- 22 – кнопочная пусковая панель на коробке переключения скоростей шпинделя;
- 23 – кулачки автоматического выключения вертикальной подачи стола;
- 24 – кулачки автоматического выключения поперечной подачи стола;
- 25 – рукоятка включения поперечной и вертикальной подачи стола;
- 26 – поддержка консоли.

2.3 Основные технические характеристики станка

Основные технические характеристики станка 6Н82Г приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Основные технические характеристики станка 6Н82Г

Наименование параметра	Параметр
Основные параметры станка	
Класс точности по ГОСТ 8-71 и ГОСТ 8-82	Н
Размеры рабочей поверхности стола (длина x ширина), мм	1250 x 320
Наименьшее и наибольшее расстояние от оси шпинделя до стола, мм (При ручном перемещении и снятом нижнем ограничительном кулачке)	30..400
Расстояние от оси шпинделя до хобота, мм	155
Максимальная нагрузка на стол (по центру), кг	250
Рабочий стол	
Число Т-образных пазов Размеры Т-образных пазов	3
Наибольшее перемещение стола продольное от руки/ от двигателя (ось X), мм	700
Наибольшее перемещение стола поперечное от руки/ от двигателя (ось Y), мм	250
Наибольшее перемещение стола вертикальное от руки/ от двигателя (ось Z), мм	450
Наибольший угол поворота стола, град	нет
Цена одного деления шкалы поворота стола, град	нет

Продолжение таблицы 9

Наименование параметра	Параметр
Рабочий стол	
Перемещение стола на одно деление лимба (продольное - ось X, поперечное - ось Y), мм	0,05
Перемещение стола на одно деление лимба (вертикальное - ось Z), мм	0,05
Перемещение стола на один оборот лимба продольное и поперечное, мм	6
Перемещение стола на один оборот лимба вертикальное, мм	2
Шпиндель	
Частота вращения шпинделя, об/мин	30 – 1500
Количество скоростей шпинделя	18
Эскиз конца шпинделя	ГОСТ 836-72
Конус шпинделя	50
Механика станка	
Быстрый ход стола продольный (ось X), м/мин	3
Быстрый ход стола поперечный (ось Y), м/мин	3
Быстрый ход стола вертикальный (ось Z), м/мин	1
Число ступеней рабочих подач стола	18
Пределы рабочих подач. Продольных (ось X), мм/мин	25 – 1250
Пределы рабочих подач. Поперечных (ось Y), мм/мин	25 – 1250
Пределы рабочих подач. Вертикальных (ось Z), мм/мин	8,3 – 416,6
Привод	
Электродвигатель привода главного движения, кВт	7
Электродвигатель привода подач, кВт	1,7
Электродвигатель зажима инструмента, кВт/ об/мин	нет
Габарит и масса станка	
Габариты станка (длина ширина высота), мм	2260x1745x1660
Масса станка, кг	2700

2.4 Электрооборудование станка

2.4.1 Общие сведения

Электрооборудование станка предназначено для питания от сети трехфазного тока напряжением 380 В с частотой 50 Гц.

В электрической схеме станка (чертеж 13.03.02.2020.054.03.00 ЭЗ) предусмотрены: питание цепи управления от сети напряжением 127 В, питание цепи местного освещения от сети напряжением 36 В, нулевая защита всех электродвигателей, а также защита от коротких замыканий плавкими предохранителями и от перегрузок при помощи тепловых реле.

Вся пусковая электроаппаратура установлена в двух нишах станины станка.

В каждой нише имеется по две панели с электроаппаратурой; четыре панели составляют комплект панелей управления станка, имеющий общую монтажную схему.

Для подключения электрооборудования к сети и его отключения имеется вводный выключатель, рукоятка которого расположена на дверке левой ниши.

Управление электродвигателем шпинделя – кнопочное. Выбор направления вращения шпинделя производится реверсивным переключателем *SA1*, который устанавливает нужное вращение двигателя шпинделя.

Управление электродвигателем подачи производится от двух командоаппаратов.

Командоаппарат продольной подачи SQ1 состоит из двух конечных выключателей: для включения правого и левого ходов стола.

Командоаппарат поперечной и вертикальной подач SQ2 также состоит из двух конечных выключателей. Рукоятка командоаппарата *SQ2* имеет пять положений: назад, вниз, вперед, вверх и среднее нейтральное.

Для выполнения на станке разных режимов работы в электросхеме имеется переключатель *SA2* на три положения рукоятки. При первом положении – «Автоматический цикл» – выполняются только автоматические циклы продольного хода стола, при втором положении – «Подача от рукояток» – производится нормальная работа станка и при третьем положении – «Круглый стол» – производится работа круглым столом, который как приспособление может быть установлен на столе станка.

Управление вращением круглого стола происходит при одностороннем вращении двигателя подачи.

Электронасос для охлаждающей жидкости управляется от выключателя *S1*.

Выключатель *S2* служит для отключения местного освещения станка.

Специальный электромагнит *K1* постоянного тока служит для привода фрикционной муфты быстрого хода. Одновременно с включением быстрого хода электромагнит отключает кулачковую муфту подачи.

Питание электромагнита *K1* выполняется от селенового выпрямителя *UZ1*, основное назначение которого – давать подмагничивающий ток двигателю шпинделя при торможении.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Вводный выключатель *QF1* и реверсивный переключатель *SA1* предназначены для отключения ненагруженных цепей, поэтому при пользовании этими аппаратами электродвигатель шпинделя необходимо предварительно отключить кнопкой «Стоп».

2.4.2 Работа электросхемы при ручном управлении

Переключатель управления *SA2* должен быть установлен в положении «Подача от рукояток».

После выбора направления вращения шпинделя переключателем *SA1* рукоятку вводного выключателя *QF1* необходимо установить в положение «Включено». При этом будет подано напряжение сети на клеммы магнитного пускателя *KM1*.

От нажатия кнопки «Шпиндель» магнитный пускатель *KM1* включается, и двигатель шпинделя будет вращаться.

При включенном пускателе *KM1* рукояткой командоаппарата *SQ1* (или *SQ2*) можно включить движение стола со скоростью рабочей подачи.

Для получения движения стола вправо (или назад, вниз) включается пускатель *KM3*, при левом ходе (или ходах вперед, вверх) работает пускатель *KM4* двигателя подачи.

Движение стола со скоростью быстрого хода происходит только при нажатой кнопке «Быстро», которая включает пускатель *KM5* электромагнита быстрого хода.

Быстрым ходом стола можно пользоваться как при включенном, так и при отключенном двигателях шпинделя. При отключенном шпинделе быстрый ход осуществляется благодаря шунтированию контакта *KM1* 12-28 контактом *KM5* при нажатии кнопки «Быстро».

Автоматический останов двигателя подачи при движении стола (консоли или салазок) происходит при переводе концевым кулачком рукоятки командоаппарата *SQ1* (или *SQ2*) в нейтральное положение, при этом разрывается цепь питания пускателя *KM3* (или *KM4*), и двигатель останавливается.

2.4.3 Работа электросхемы при автоматическом управлении

Автоматическое управление применяется только для продольного хода стола.

На станке можно выполнять следующие автоматические циклы:

- правый скачкообразный с реверсом
- левый скачкообразный с реверсом
- маятниковый

При маятниковом цикле рабочая подача стола автоматически чередуется с быстрым ходом в каждом направлении.

Для работы на автоматическом цикле переключатель *SA2* должен быть установлен в положение «Автоматический цикл».

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Кроме того, необходимо также сделать механическое переключение валика, имеющегося в салазках станка, из положения «Ручное управление» в положение «Автоматический цикл». При последнем положении валика кулачковая муфта продольного хода заперта, и конечный выключатель *SQ4* нажат. Это обеспечивает управление продольным движением стола только от командоаппаратов *SQ2* и *SQ3* при заблокированных поперечной и вертикальной подачах.

Для объяснения работы схемы в автоматическом цикле разберем выполнение правого скачкообразного цикла с реверсом. Этот цикл состоит из автоматических переключений:

- с быстрого хода вправо на подачу вправо
- с подачи вправо на быстрый ход влево
- с быстрого хода влево на «Стоп»

Для получения быстрого хода стола в начале цикла нужно предварительно убедиться в том, что командоаппарат *SQ3*, управляющий работой пускателя *KM5* при автоматических циклах, находится в не нажатом состоянии, т. е. через его контакт 43-26 происходит питание пускателя *KM5*.

Если контакт *SQ3* 43-26 не закрыт, то необходимо сделать поворот звездочки с восемью выступами, сидящей на валу рукоятки командоаппарата 1КА на один выступ, после чего контакт *SQ3* 43-26 закроется.

При повороте рукоятки командоаппарата *SQ1* вправо включится быстрый ход стола вправо, так как произойдет включение пускателей *KM3* для двигателя подачи и *KM5* для электромагнита.

Отключение быстрого хода происходит, когда в нужной точке пути стола откидной кулачок сделает поворот звездочки на один выступ, при этом контакт 43-26 командоаппарата *SQ3* раскроется, электромагнит *K1* будет отключен, и стол продолжит движение со скоростью рабочей подачи.

Для переключения движения в нужной точке пути с рабочей подачи вправо на быстрый ход влево в пазу стола должны быть установлены рядом два кулачка:

- кулачок № 1 для перевода рукоятки командоаппарата из положения вправо в положение влево
- кулачок № 3 (откидной) для отключения подачи вправо и включения быстрого хода

Когда кулачок № 1 переводит рукоятку командоаппарата *SQ1* в положение влево, то перед моментом раскрытия контакта 15-16 от нажатия кулачка № 3 на звездочку с выступами в командоаппарате *SQ3* контакт 43-26 уже закрывается, что обеспечивает питание пускателя ПП по цепи 15-42-43-25-16 при раскрытом контакте 15-16 командоаппарата *SQ1* (см. диаграмму переключателя *SQ3* на чертеже 3).

После перевода рукоятки в положение влево кулачок 3 повернет звездочку на один выступ и в командоаппарате *SQ3* раскроется контакт 43-26, отключая пускатель *KM3* – подача вправо. Закрытие нормально закрытого контакта пускателя *KM3* 22-18 замыкает цепь питания пускателя *KM4*, и двигатель реверсируется.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Одновременно контакт *SQ3* 43-26 включает пускатель *KM5*, и стол идет быстро влево. Остановка быстрого хода влево происходит при переводе кулачком № 2 рукоятки командоаппарата *SQ1* в нейтральное положение, в котором отключаются двигатель подачи и электромагнит *K1*.

Наладку на автоматические циклы следует производить без обрабатываемой детали, так как ошибки при наладке могут привести к включению быстрого хода вместо подачи, что может вызвать поломку инструмента.

Работа схемы при остальных автоматических циклах аналогична вышеописанной.

2.4.4 Импульсное включение двигателей

Для получения быстрого сцепления зубьев зубчатых колес при переключениях скоростей шпинделя предусмотрен кратковременный поворот двигателя шпинделя.

Для указанной цели имеется кнопка «Толчок», при нажатии которой двигатель шпинделя получает кратковременное вращение. Кратковременность включения пускателя *KM1* происходит благодаря тому, что при его включении получает питание реле *K2*, которое, становясь на самопитание, разрывает своим контактом 33-27 цепь питания пускателя *KM1*.

При переключениях подачи также имеется возможность кратковременного включения двигателя подачи с помощью конечного выключателя *SQ5*, который включает двигатель в то время, когда ручка переключения находится в выдвинутом положении.

2.4.5 Торможение шпинделя

Электропривод шпинделя имеет динамическое торможение двигателя, которое благодаря плавно нарастающему тормозному моменту лучше обеспечивает сохранность механизма при эксплуатации, чем другие способы торможения.

Для выполнения динамического торможения установлено следующее электрооборудование:

1. Селеновый выпрямитель *UZ1*, соединенный со специальной обмоткой трансформатора *T1*. Магнитный пускатель *KM2* для включения постоянного тока в обмотку статора двигателя на время торможения.
2. Промежуточное реле *KV*, имеющее катушку для напряжения сети трехфазного тока.

При нажатии кнопки «Стоп» ее нормально закрытый контакт отключает пускатель *KM1*, и статор двигателя от сети отключается. В отключенной обмотке статора затухающее поле ротора наводит напряжение, приблизительно равное напряжению сети.

Во избежание пробоя селенового выпрямителя, он включается в цепь статора только после снижения наведенного напряжения до малой величины.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Контроль исчезновения наведенного напряжения выполняет реле напряжения *KV*. Когда реле *KV* обесточивается, оно своим нормально закрытым контактом 23-41 замыкает цепь питания пускателя *KM2*, который подает в обмотку статора постоянный подмагничивающий ток, чем обеспечивается торможение двигателя.

После остановки шпинделя кнопку «Стоп» отпускают, при этом пускатель *KM2* отключает селеновый выпрямитель от статора.

Процесс торможения двигателя длится при наибольшей включенной скорости шпинделя 1600 об/мин 3–5 секунд.

2.4.6 Блокировки станка

Электросхема имеет ряд блокировок, которые введены для обеспечения правильной эксплуатации станка и его электрооборудования:

1. Одновременное включение рукояток командоаппаратов *SQ1* и *SQ2* вызывает остановку двигателя подачи, так как совместная работа двух подач не допускается кинематикой станка
2. В положении переключателя *SA2* «Автоматический цикл» исключены работа поперечной и вертикальной подач и управление от кнопки «Быстро»
3. В положении переключателя *SA2* «Круглый стол» работа продольной, поперечной и вертикальной подач невозможна
4. В положении переключателя *SA2* «Подача от рукояток» нормально замкнутые контакты в реверсивном пускателе двигателя подачи зашунтированы для получения принудительного реверсирования двигателя подачи в случае «прилипания» якоря к неподвижному сердечнику магнита в пускателе
5. Не допускается рабочая подача во всех направлениях, а также вращение круглого стола при не включенном двигателе шпинделя.

2.5 Обоснование модернизации

В настоящей работе поставлена задача модернизировать привод главного движения консольного горизонтально-фрезерного станка 6Н82Г, путем установки частотно-регулируемого электропривода (ЭП).

В результате этого будет обеспечен плавный пуск, что повысит долговечность двигателя путем ликвидации рывков в механической части и чрезмерного нагрева; бесступенчатое, плавное изменение частоты вращения шпинделя во всем диапазоне. При этом регулировочные характеристики имеют высокую жесткость, а АД сохраняет большую перегрузочную способность. Также частотное управление является экономичным, так как обеспечивает регулирование скорости АД без больших потерь мощности в роторной цепи, ухудшающих КПД ЭП и приводящих к необходимости завышения мощности АД. Частота вращения, а, следовательно, и скорость резания будет более стабильной, не зависящей от колебаний питающего напряжения и частоты.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Все вышеизложенное повысит надёжность и производительность и увеличит срок службы оборудования.

Выводы по разделу два

В данном разделе ВКР рассматривается назначение, конструкция, техническая характеристика и электрооборудование горизонтально-фрезерного станка 6Н82Г, а также приводится обоснование модернизации привода подачи.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

3 РАСЧЁТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ

3.1 Расчет мощности двигателя

Выбор мощности электродвигателя для привода главного движения фрезерного станка производится по расчетной, исходя из технических показателей, наибольшей нагрузке, возможной на данном станке.

В руководстве по эксплуатации [19] в качестве предельных режимов фрезерования рекомендованы следующие режимы работы:

а) Работа торцевыми фрезами по стали.

Данные режущего инструмента:

- диаметр фрезы $d = 150$ мм;
- число зубьев фрезы $z = 14$.

Условия обработки заготовки:

- глубина фрезерования $t = 4 \dots 5$ мм;
- подача на один зуб фрезы $s_z = 0,28$ мм;
- ширина фрезерования $B = 100$ мм;
- подача $s_m = 160$ мм/мин;
- скорость вращения $n = 37,5$ об/мин;
- скорость резания $V_p = 19$ м/мин;
- мощность ~ 6 кВт.

б) Работа цилиндрическими наборными фрезами по чугуну.

Данные режущего инструмента:

- диаметр фрезы $d = 90$ мм;
- число зубьев фрезы $z = 8$.

Условия обработки заготовки:

- глубина фрезерования $t = 10 \dots 12$ мм;
- подача на один зуб фрезы $s_z = 0,4$ мм;
- ширина фрезерования $B = 110$ мм;
- подача $s_m = 150$ мм/мин;
- скорость вращения $n = 47,5$ об/мин;
- скорость резания $V_p = 14$ м/мин;
- мощность ~ 6 кВт.

в) Работа торцевыми фрезами по чугуну.

Данные режущего инструмента:

- диаметр фрезы – $d = 200$ мм;
- число зубьев фрезы – $z = 16$.

Условия обработки заготовки:

- глубина фрезерования – $t = 9$ мм;
- подача на один зуб фрезы – $s_z = 0,31$ мм;
- ширина фрезерования – $B = 100$ мм;
- подача – $s_m = 300$ мм/мин;
- скорость вращения – $n = 63$ об/мин;
- скорость резания $V_p = 40$ м/мин.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

– мощность ~ 7 кВт.

Для расчетов возьмем последний режим, как наиболее тяжелый.

Мощность электродвигателя главного движения определяется по формуле:

$$P_{дв} = \frac{P_{эф}}{\eta}, \quad (1)$$

где $P_{эф}$ – полезная мощность резания;

η – КПД главного движения (для станков с вращательным главным движением $\eta = 0,75 \dots 0,85$).

Мощность резания (эффективная), кВт, определяется по формуле:

$$P_{эф} = F_z \cdot V_p \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

где F_z – окружная сила, Н, главная составляющая силы резания при фрезеровании;

V_p – скорость резания, м/мин.

Скорость резания $V_p = 40$ м/мин. Найдем главную составляющую силы резания – окружную силу по формуле:

$$F_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{d^q \cdot n^w} \times K_{мп}, \quad (3)$$

где C_p – постоянный коэффициент (табличное значение);

t – глубина резания, мм;

S_z – подача на зуб фрезы, мм;

B – ширина фрезерования, мм;

z – число зубьев фрезы;

d – диаметр фрезы, мм;

n – частота вращения фрезы, об/мин;

$K_{мп}$ – поправочный коэффициент;

x, y, u, q, w – показатели степеней (табличные значения).

Обрабатываемый материал – серый чугун.

Тип режущего инструмента – дисковая фреза из быстрорежущей стали. Тогда:

$C_p = 50$; $t = 9$ мм; $S_z = 0,31$ мм; $B = 100$ мм; $z = 16$; $d = 200$ мм; $n = 63$ об/мин;

$K_{мп} = 0,8$; $x = 0,9$; $y = 0,72$; $u = 1,14$; $q = 1,14$; $w = 0$.

$$F_z = \frac{10 \cdot 50 \cdot 9^{0,9} \cdot 0,31^{0,72} \cdot 100^{1,14} \cdot 16}{200^{1,14} \cdot 63^0} \times 0,8 = 9028 \text{ Н.}$$

Мощность резания (эффективная):

$$P_{эф} = \frac{9028 \times 40}{1000 \times 60} = 6,0 \text{ кВт.}$$

Мощность электродвигателя:

$$P_{дв} = \frac{6,0}{0,85} = 7,06 \text{ кВт.}$$

3.2 Выбор двигателя

Выбираем из каталогов трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии АДЧР132S4 мощностью $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт, удовлетворяющий условию $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$. Параметры двигателя даны в таблице 10.

Таблица 10 – Основные технические данные АДЧР132S4

Номинальн. мощн., кВт	Ном. ток, А при 380В	Номинальн. момент, Н·м	Ном. скор., об/мин	Макс скор., об/мин	Номинальн. частота, Гц	КПД, %	Cosφ	S, %	$m_k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$	$m_n = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$k_{\text{дв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	Дин. момент инерц., кг·м ²
7,5	15,3	49	1452	3000 (4500)	50	87,5	0,85	3,2	3,3	2,4	7,0	0,032

Рассчитаем номинальную угловую скорость вращения:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 1452}{30} = 152 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (4)$$

Максимальный момент:

$$M_{\text{max}} = m_k \times M_{\text{ном}} = 3,3 \times 49 = 161,7 \text{ Н·м.} \quad (5)$$

3.3 Построение нагрузочной диаграммы электропривода

Произведем расчет электромагнитного момента двигателя на каждом этапе работы для построения нагрузочной диаграммы электропривода. Сначала найдем динамический момент и момент холостого хода. Динамический момент рассчитаем по формуле:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где ε – допустимое ускорение, $\varepsilon = 125 \text{ рад/с}^2$;

J_{Σ} – приведённый момент инерции на валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = 1,1 \cdot J_{\text{д}} + J_{\text{м}} = 1,1 \cdot 0,032 + 0,005 = 0,04 \text{ кг·м}^2, \quad (7)$$

где $J_{\text{д}} = 0,032 \text{ кг·м}^2$ – момент инерции двигателя;

$J_{\text{м}} = 0,005 \text{ кг·м}^2$ – приведённый момент инерции механизма.

$M_{\text{дин}} = 0,04 \times 125 = 5,0 \text{ Н·м.}$

Момент холостого хода зависит от многих факторов и не остается постоянным при различных скоростях. Но так как его величина не превышает 10–15% от номинального момента двигателя, рассчитаем по упрощенной формуле:

$$M_{\text{хх}} \approx 0,6 \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \cdot M_{\text{од}} = 0,6 \cdot \frac{1-0,9}{0,9} \cdot 49 = 3,3 \text{ Н·м.} \quad (8)$$

Электромагнитный момент двигателя при фрезеровании:

$$M_{\phi} = \frac{F_z \cdot d}{2 \cdot i_p \cdot \eta} = \frac{9028 \cdot 0,2}{2 \cdot 23 \cdot 0,85} = 46,18 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (9)$$

Угловую скорость ротора определим по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot i_p = \frac{\pi \cdot 63}{30} \cdot 2 = 13,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (10)$$

Определим момент и время каждого участка работы привода:

1. Пуск привода:

$$M_1 = M_{xx} + M_{дин} = 3,3 + 5,0 = 8,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (11)$$

$$t_1 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{13,2}{125} = 0,11 \text{ с}. \quad (12)$$

2. Ускоренный подвод детали:

$$M_2 = M_{xx} = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{l_1}{v_m} = \frac{0,36}{0,05} = 7,2 \text{ с}. \quad (14)$$

3. Фрезерование заготовки:

$$M_3 = M_{\phi} = 46,18 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (15)$$

$$t_3 = \frac{l_2 + l_3 + l_4}{s_m} = \frac{0,012 + 0,32 + 0,005}{0,005} = 67,4 \text{ с}. \quad (16)$$

4. Ускоренный отвод детали:

$$M_4 = M_{xx} = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (17)$$

$$t_4 = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{v_m} = \frac{0,36 + 0,012 + 0,32 + 0,005}{0,05} = 13,94 \text{ с}. \quad (18)$$

5. Торможение привода:

$$M_5 = M_{xx} - M_{дин} = 3,3 - 5,0 = -1,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (19)$$

$$t_5 = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{13,2}{125} = 0,11 \text{ с}. \quad (20)$$

По данным расчетов построим нагрузочную и скоростную диаграммы, которые представлены на рисунке 3.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

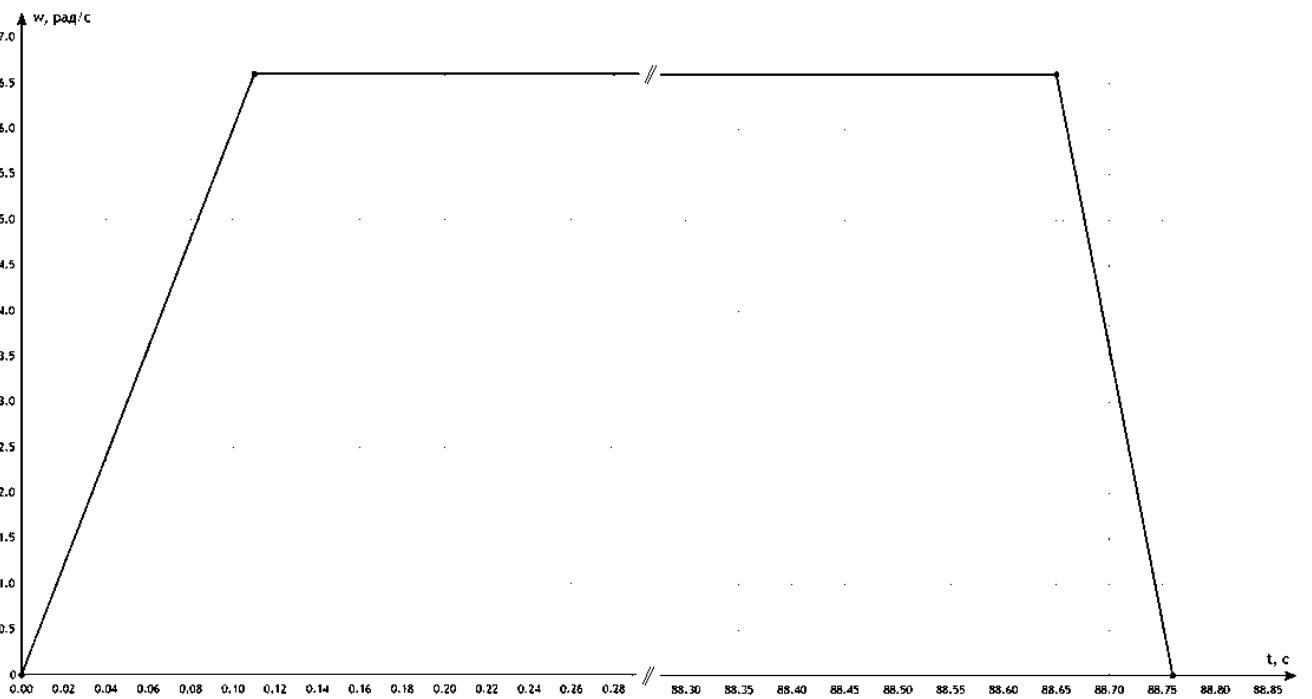
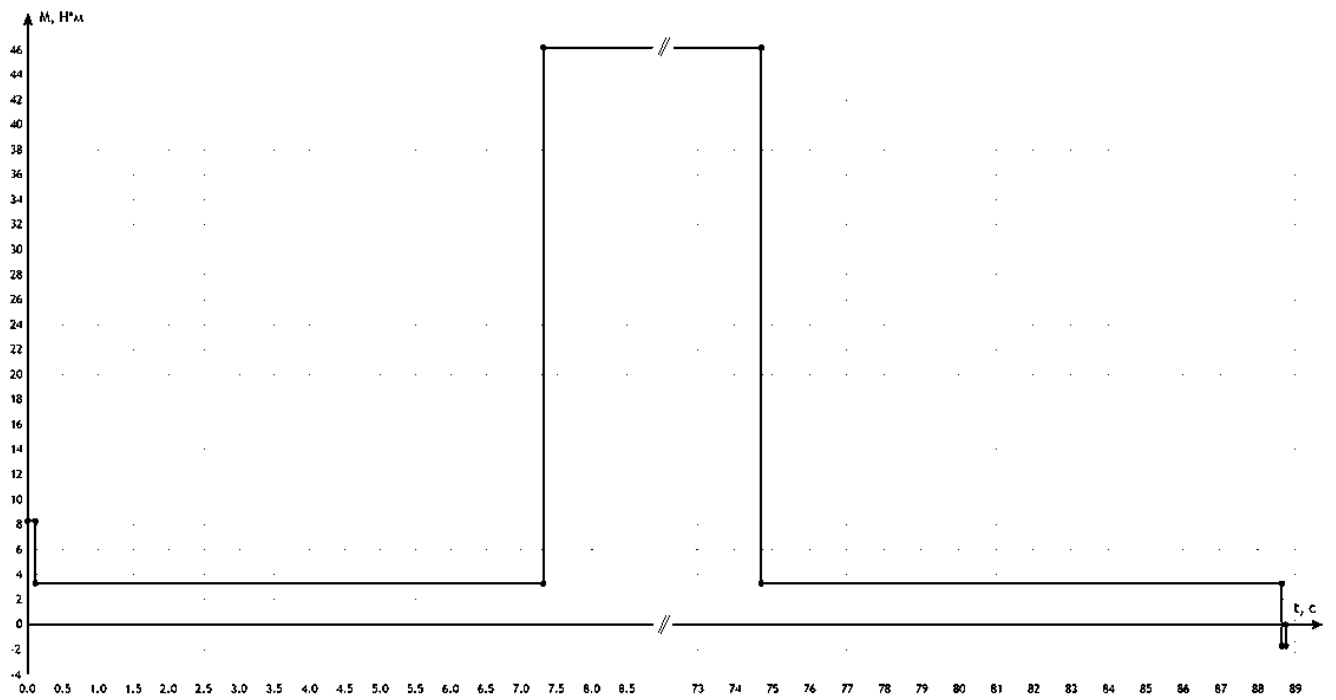


Рисунок 3 – Нагрузочная и скоростная диаграммы

Проведем проверку двигателя по нагреву.

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (21)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ

Лист

38

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{7,7^2 \cdot 0,11 + 3,3^2 \cdot 7,2 + 46,18^2 \cdot 67,4 + 3,3^2 \cdot 13,94 + (-1,1)^2 \cdot 0,11}{0,11 + 7,2 + 67,4 + 13,94 + 0,11}} = 40,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{\text{э}} = 40,3 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 49 \text{ Н} \cdot \text{м} = M_{\text{ном.}}$$

Проведем проверку двигателя по перегрузочной способности:

$$M_{\text{max}} < M_{\text{дон}} = 2 \cdot 0,9^2 \cdot M_{\text{ном.}} \quad (22)$$

$$M_{\text{max}} = 46,18 \text{ Н} \cdot \text{м} < 2 \cdot 0,9^2 \cdot 49 = 79,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Выводы по разделу три

В данном разделе был проведен расчет мощности двигателя, в соответствии с которым был проведен выбор электродвигателя. Построены нагрузочные и скоростная диаграммы.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

4 ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Формулирование требований к электроприводу

Для выбора привода подачи необходимо сформулировать следующие требования [10], предъявляемые к приводу:

- Напряжение питающей сети;
- Напряжение на выходе преобразователя;
- Мощность преобразователя;
- Диапазон регулирования скорости;
- Возможность применения обратных связей;
- Наличие встроенной логики или использование дополнительных устройств автоматики.

Горизонтально-фрезерный станок получает питание от промышленной трёхфазной сети напряжением 380 В. Номинальное напряжение двигателя 380 В, следовательно, преобразователь частоты должен обеспечивать выходное номинальное напряжение не менее 380 В. При выбранном двигателе мощностью 7,5 кВт, ПЧ также должен иметь номинальную мощность не меньше 7,5 кВт. Диапазон регулирования скорости должен быть не меньше 1:50. Привод должен иметь обратную связь по технологическому параметру. Желательно также чтобы привод мог обеспечивать реализацию автоматики или иметь возможность соединения с микропроцессорными устройствами.

4.2 Выбор преобразователя частоты

Учитывая требования, предъявляемые к приводу и обзор преобразователей частоты в первой части ВКР, останавливаем свой выбор на преобразователе компании ОВЕН. Данный преобразователь обеспечивает все необходимые режимы работы двигателя, диапазон регулирования. Кроме того, данный преобразователь производится в России, а производитель имеет большое количество сервисных центров по всей России, что существенно облегчит обслуживание приборов, как по гарантии, так и при коммерческом ремонте. Исходя из этого, выбираем ПЧ марки ОВЕН ПЧВ203-7К5-В на номинальную мощность 7,5 кВт и входное трехфазное напряжение 380 В (рисунок 4). Электрические характеристики приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Электрические характеристики ОВЕН ПЧВ203-7К5-В

Параметр	Значение
Входное переменное напряжение, В	380–480
Номинальный входной ток, А	24,8
Выходное напряжение (U, V, W), %	0...100 (U _{ВХ})
Номинальный выходной ток, А	15,3
Выходная частота, Гц	0...200 Гц(VC), 0...400 (U/F)
Мощность, подключаемого АД, кВт	7,5



Рисунок 4 – Преобразователь частоты ОВЕН ПЧВ2

Информация об исполнении отображена в структуре условного обозначения прибора (рисунок 5).

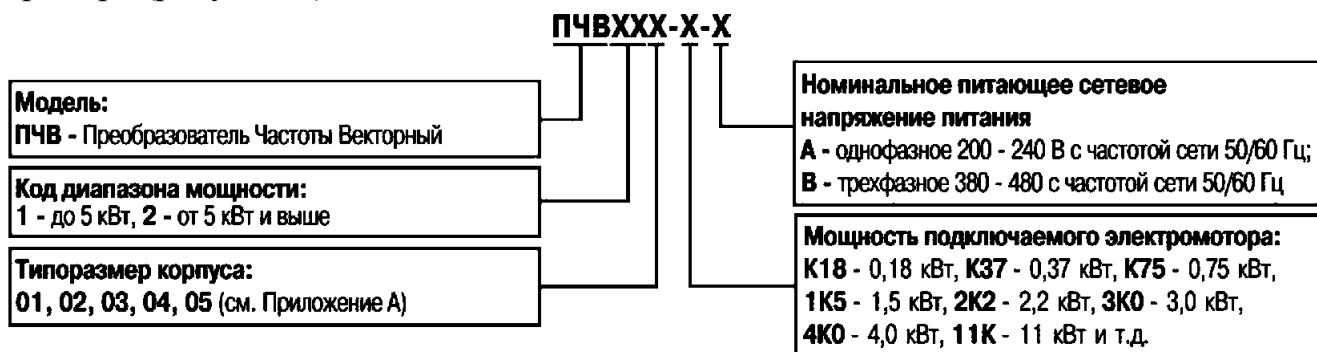


Рисунок 5 – Структура условного обозначения преобразователей ОВЕН

Преобразователь частоты ПЧВ2 изготавливается в пластмассовом корпусе.

Чертеж корпуса с направлениями габаритных измерений показаны на рисунке 6, а величины размеров в таблице 12.

Вес ОВЕН ПЧВ203-7К5-В – 3,0 кг.

Таблица 12 – Габаритные и присоединительные размеры ПЧВ2

А	а	В	в	С
176 мм	166,4 мм	75 мм	59 мм	168 мм

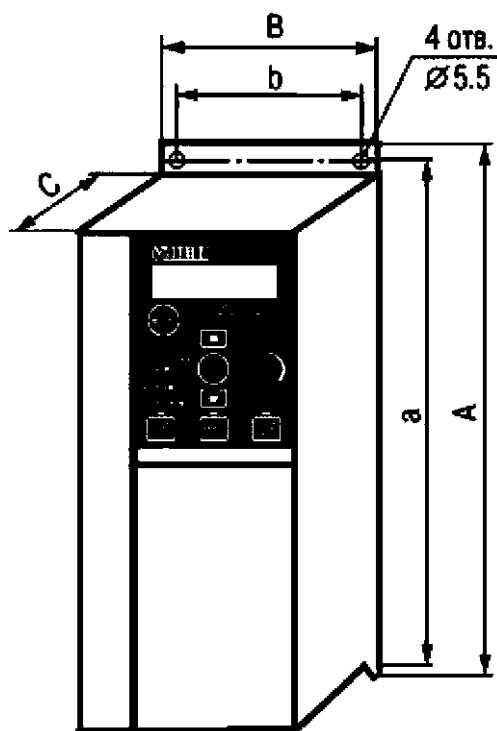


Рисунок 6 – Габаритные размеры ПЧ ОВЕН ПЧВ203-7К5-В

Выводы по разделу четыре

В данном разделе сформулированы требования к электроприводу главного движения горизонтально-фрезерного станка и был проведен выбор преобразователя частоты, удовлетворяющего всем этим требованиям, из рассмотренных в разделе один этой работы.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

5 СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПРИВОДА

5.1 Статический расчёт привода

Механические характеристики двигателя при частотном регулировании рассчитывают по формулам (23) или (24) и (25):

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1H}^2 \cdot \left(\frac{r_2'}{s_x}\right) \cdot h^2}{f_1^* \cdot \omega_0 \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s_x}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot (f_1^*)^2 \right]}, \quad (23)$$

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1H}^2 \cdot r_2' \cdot s_x \cdot h^2}{f_1^* \cdot \omega_0 \cdot \left[(r_1 \cdot s_x + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \cdot (f_1^*)^2 \right]}, \quad (24)$$

где $m_1 = 3$ – число фаз статора асинхронного двигателя;

$U_{1H} = 220$ В – величина номинального напряжения;

$h = U_{1x} / U_{1H}$ – относительное напряжение на статоре двигателя;

U_{1x} – величина питающего напряжения статора двигателя;

s_x – скольжение при заданной частоте;

$f_1^* = f_1 / f_H$ – относительная частота питающего напряжения;

f_1 – частота питающего напряжения на статоре двигателя;

f_H – номинальная частота питающего напряжения.

$$\omega_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_{\Pi}} \cdot (1-s) = \omega_0 \cdot f_1^* \cdot (1-s) \quad (25)$$

где ω_x – угловая частота вращения при заданной частоте;

p_{Π} – число пар полюсов.

Для расчета характеристик асинхронного двигателя пользуются схемами замещения [16]. На рисунке 7 представлена Т-образная схема замещения, где:

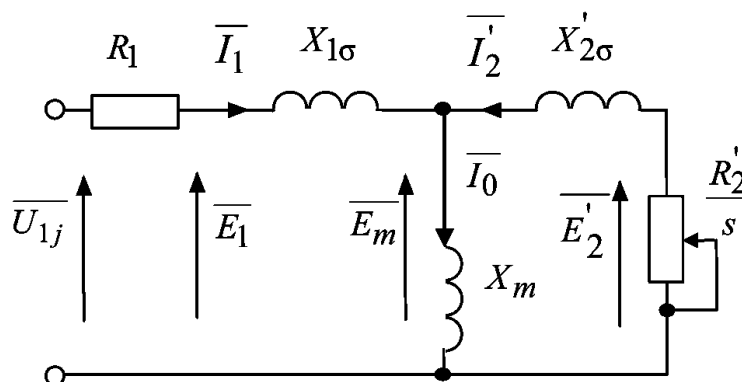


Рисунок 7 – Схема замещения асинхронного двигателя

U_{ij} – фазное напряжение обмотки статора;
 R_1 – активное сопротивление обмотки статора;
 $X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
 I_1 – ток обмотки статора;
 E_1 – ЭДС обмотки статора;
 R'_2 – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;
 $X'_{2\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора.

X_m – главное индуктивное сопротивление;
 E_m – ЭДС от главного магнитного потока машины;
 E'_2 – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

Определим номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1\phi H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1\phi H} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,85} = 15,3 \text{ А.} \quad (26)$$

Ток статора двигателя при частичной нагрузке:

$$I_{1\psi} = \frac{p^* P_H}{m_1 \cdot U_{1\phi H} \cdot \eta_{p^*} \cdot \cos \varphi_{p^*}} = \frac{0,75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,82} = 11,88 \text{ А,} \quad (27)$$

где $p^* = P / P_H = 0,75$ о. е. – коэффициент загрузки двигателя (P – мощность двигателя при частичной нагрузке, кВт);

η_{p^*} – КПД при частичной нагрузке, о. е. ($\eta_{p^*} \approx \eta_H$);

$\cos \varphi_{p^*} = 0,965 \times \cos \varphi_H = 0,82$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о. е.

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1\psi}^2 - [p^* I_{1\psi} (1 - s_N) / (1 - p^* s_N)]^2}{1 - [p^* (1 - s_N) / (1 - p^* s_N)]^2}}, \quad (28)$$

где $s_N = 0,032$ – номинальное скольжение.

$$I_0 = \sqrt{\frac{11,88^2 - [0,75 \cdot 11,88 \cdot (1 - 0,032) / (1 - 0,75 \cdot 0,032)]^2}{1 - [0,75(1 - 0,032) / (1 - 0,75 \cdot 0,032)]^2}} = 5,1 \text{ А.}$$

Критическое скольжение:

$$s_k = s_N \cdot \frac{m_k + \sqrt{(m_k)^2 - [1 - 2 \cdot s_N \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_N \cdot \beta \cdot (m_k - 1)}. \quad (29)$$

где $\beta = 0,6 \dots 2,5$ – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора. Значение β принимается, ориентируясь на соотношение сопротивлений подобных двигателей. Принимаем $\beta = 1,3$.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

$$s_k = 0,032 \cdot \frac{3,3 + \sqrt{3,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,032 \cdot 1,3 \cdot (3,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,032 \cdot 1,3 \cdot (3,3 - 1)} = 0,256.$$

Определим коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{5,1}{2 \cdot 7 \cdot 15,3} = 1,0238. \quad (30)$$

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot U_{1H}^2 (1 - s_N)}{2 \cdot C_1 \cdot m_k \cdot P_N} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,032)}{2 \cdot 1,0238 \cdot 3,3 \cdot 7500} = 2,773. \quad (31)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_k) \cdot C_1} = \frac{2,773}{(1,3 + 1/0,256) \cdot 1,0238} = 0,52 \text{ Ом}. \quad (32)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \times R_2' \times \beta = 1,0238 \times 0,52 \times 1,3 = 0,69 \text{ Ом}. \quad (33)$$

Определяем параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0,256^2) - 1,3^2} = 3,684. \quad (34)$$

Находим индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$X_{KH} = \gamma \times C_1 \times R_2' = 3,6840 \times 1,0238 \times 0,52 = 1,96 \text{ Ом}. \quad (35)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки рассчитаем по следующему выражению:

$$X_{1\sigma H} = 0,42 \times X_{KH} = 0,42 \times 1,96 = 0,83 \text{ Ом}. \quad (36)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, рассчитаем по формуле:

$$X_{2\sigma H} = 0,58 \times X_{KH} / C_1 = 0,58 \times 1,96 / 1,0238 = 1,13 \text{ Ом}. \quad (37)$$

ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, находим по формуле:

$$E_m = \sqrt{(U_{1N} \cdot \cos \varphi_{1N} - R_1 \cdot I_{1N})^2 + (U_{1N} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1N}} - X_{1\sigma N} \cdot I_{1N})^2}. \quad (38)$$

$$E_m = \sqrt{(220 \cdot 0,85 - 0,69 \cdot 15,3)^2 + (220 \sqrt{1 - 0,85^2} - 0,823 \cdot 15,3)^2} = 204,46 \text{ В}.$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания равно:

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

$$X_{\mu} = E_m / I_0 = 204,46 / 5,1 = 40,1 \text{ Ом.} \quad (39)$$

Индуктивность рассеяния статора, находим по формуле:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,83}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,64 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (40)$$

Индуктивность рассеяния ротора, находим по формуле:

$$L'_{2\sigma} = \frac{x'_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1,13}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (41)$$

Индуктивность взаимной индукции статора и ротора:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{40,1}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,128 \text{ Гн.} \quad (42)$$

Результаты вычислений сведем в таблицу 13.

Таблица 13 – Параметры схемы замещения электродвигателя АДЧР132S4

Параметр	R_1 , Ом	R'_2 , Ом	$X_{1\delta n}$, Ом	$X'_{2\delta n}$, Ом	$X_{кн}$, Ом	X_{μ} , Ом	$L_{1\delta}$, мГн	$L'_{2\delta}$, мГн	L_{μ} , мГн
Значение	0,69	0,52	0,83	1,13	1,96	40,1	2,64	3,6	128

Используя соотношения (24), (25) в программе Matlab рассчитываем и строим механические характеристики привода для частот 10, 20, 30, 40 и 50 Гц. Для этих частот найдем f_l^* :

$$f_{l(10)}^* = 10 / 50 = 0,2; \quad f_{l(20)}^* = 20 / 50 = 0,4; \quad f_{l(30)}^* = 30 / 50 = 0,6;$$

$$f_{l(40)}^* = 40 / 50 = 0,8; \quad f_{l(50)}^* = 50 / 50 = 1;$$

Для определения значения величины напряжения, подводимого к статору при соответствующей ей частоте, воспользуемся соотношением:

$$\frac{U_{1\Phi H}}{f_{1H}} = \frac{U_{1x}}{f_1}. \quad (43)$$

Из этого выражения получаем значение величины питающего напряжения для соответствующей ей частоты:

$$U_{1x} = \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot U_{1\Phi H}. \quad (44)$$

По этому уравнению находим, что для частот 10, 20, 30 и 40 Гц питающие напряжения будут соответственно равны 44, 88, 132, 176 В.

Для питающих напряжений 44, 88, 132, 176 В найдем значения h .

$$h = U_{1x} / U_{1H}. \quad (45)$$

Следовательно, $h_{(10)} = 0,2$; $h_{(20)} = 0,4$; $h_{(30)} = 0,6$; $h_{(40)} = 0,8$; $h_{(50)} = 1$.

Введем данные в формулу (24):

$$M = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,5 \cdot s_x \cdot h^2}{f_1^* \cdot 157,08 \cdot \left[(0,69 \cdot s_x + 0,5)^2 + (1,11 + 0,823)^2 \cdot (f_1^*)^2 \right]} = \frac{462,18 \cdot s_x \cdot h^2}{f_1^* \cdot \left[(0,69 \cdot s_x + 0,5)^2 + (2 \cdot f_1^*)^2 \right]}$$

На рисунке 8 приведен скрипт вычисления в программе MATLAB, а на рисунке 9 показаны расчетные механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании $U_s / f_s = \text{const}$.

```
>> s=[0.001:0.005:1];f=1;h=1;[y1]=157*f*(1-s);[x1]=462*h.^2*s./(((0.69*s+0.5).^2+(1.933*f*s).^2)*f);
>> s=[0.001:0.005:1];f=0.8;h=0.8;[y2]=157*f*(1-s);[x2]=462*h.^2*s./(((0.69*s+0.5).^2+(1.933*f*s).^2)*f);
>> s=[0.001:0.005:1];f=0.6;h=0.6;[y3]=157*f*(1-s);[x3]=462*h.^2*s./(((0.69*s+0.5).^2+(1.933*f*s).^2)*f);
>> s=[0.001:0.005:1];f=0.4;h=0.4;[y4]=157*f*(1-s);[x4]=462*h.^2*s./(((0.69*s+0.5).^2+(1.933*f*s).^2)*f);
>> s=[0.001:0.005:1];f=0.2;h=0.2;[y5]=157*f*(1-s);[x5]=462*h.^2*s./(((0.69*s+0.5).^2+(1.933*f*s).^2)*f);
>> plot(x1,y1,x2,y2,x3,y3,x4,y4,x5,y5),grid
>> xlabel('M(H*m)'),ylabel('w(rad/c)')
```

Рисунок 8 – Скрипт вычисления механических характеристик

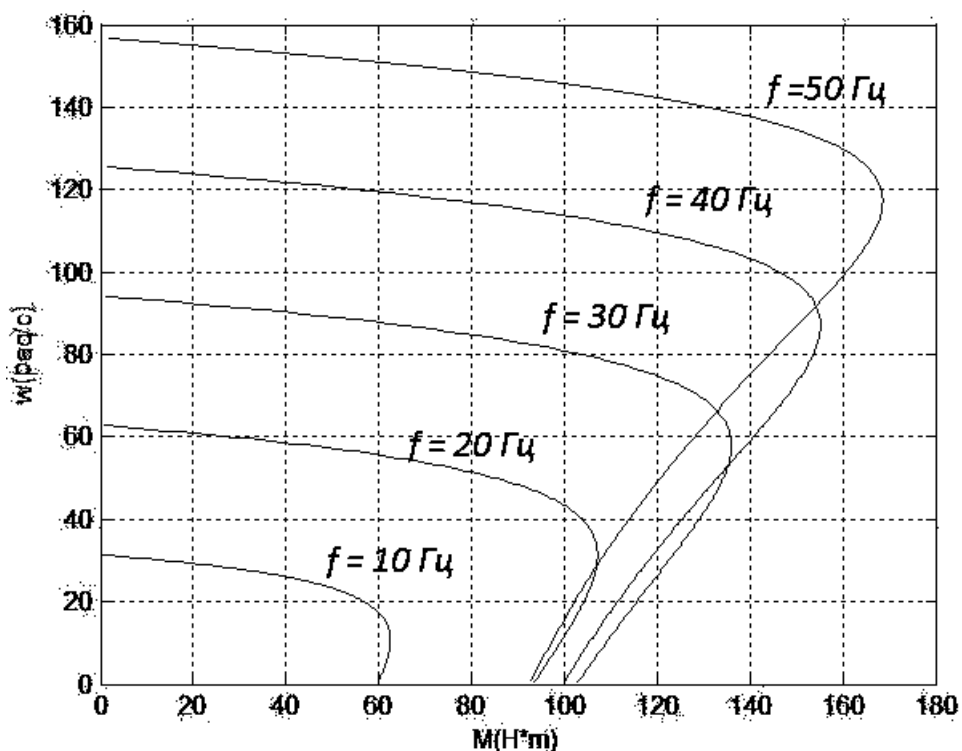


Рисунок 9 – Статические механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании $U_s / f_s = \text{const}$

Из приведенных характеристик видно, что при снижении частоты уменьшается величина критического момента и снижается жесткость характеристик. Это объясняется тем, что с ростом нагрузки происходит падение напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки. А это приводит к уменьшению маг-

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

нитного потока λ , значит, к снижению электромагнитного момента. Для сохранения постоянства критического момента двигателя необходимо величину питающего напряжения на статоре в процессе регулирования уменьшать в меньшей степени, чем частоту. Для построения механических характеристик при $M_k = \text{const}$ вычислим относительные величины напряжения на статоре двигателя при изменении частоты, используя формулу:

$$M_k = \frac{m_1 \cdot U_{1H}^2 \cdot h^2}{2 \cdot f_1^* \cdot \omega_n \cdot \left(\Gamma_1 \pm \sqrt{\Gamma_1^2 + (J_1^* \cdot (x_1 + x_2))^2} \right)^2} \quad (46)$$

В ходе расчета получаем:

- 1) при $f_{S(10)}^* = 0.2$ величина $h_{(10)} = 0.32$;
- 2) при $f_{S(20)}^* = 0.4$ величина $h_{(20)} = 0.50$;
- 2) при $f_{S(30)}^* = 0.6$ величина $h_{(30)} = 0.67$;
- 2) при $f_{S(40)}^* = 0.8$ величина $h_{(40)} = 0.83$.

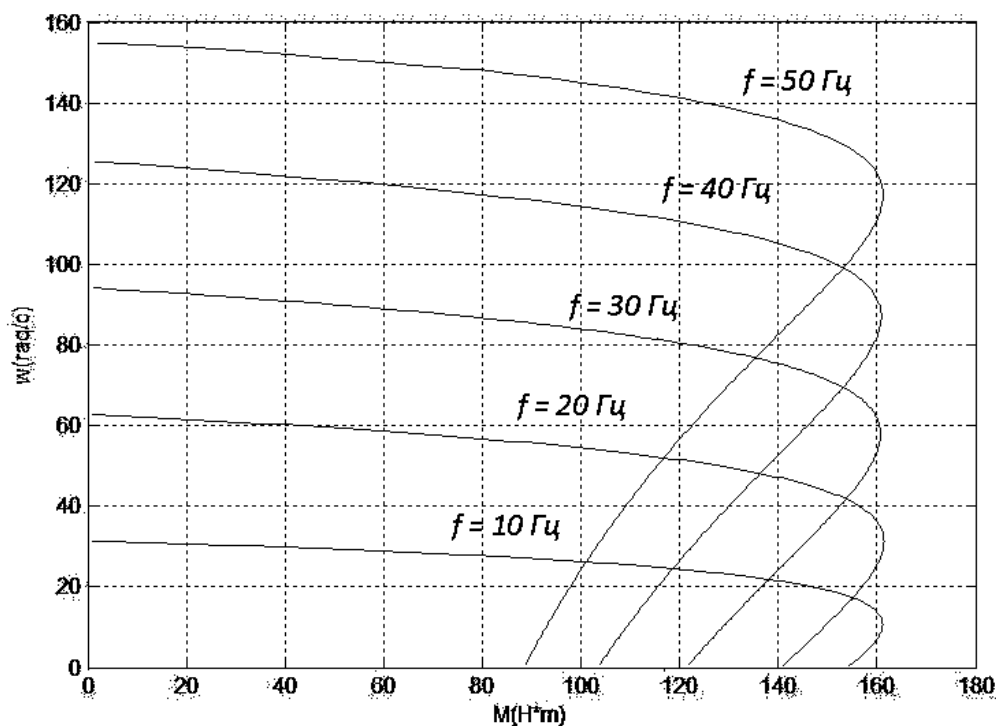


Рисунок 10 – Механические характеристики двигателя с Ir-компенсацией

По механическим характеристикам (рисунок 10) мы видим, что использование IR-компенсации обеспечивает постоянный критический момент на валу двигателя. Перегрузочная способность двигателя остается постоянной, а жесткость соответствует жесткости естественной характеристики закона частотного регулирования.

5.2 Расчёт динамических характеристик привода

5.2.1 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя.

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя:

$$k_H = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\phi}}{U_{УП\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,113, \quad (47)$$

где $U_{УП\max} = 10$ В – максимальное значение напряжения управления.

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_H = 0,5 / f_H = 0,5 / 8 \times 10^3 = 6,25 \times 10^{-5} \text{ с}, \quad (48)$$

где f_H – несущая частота инвертора, Гц.

Расчет параметров двигателя.

Эквивалентная индуктивность обмоток:

– статора:

$$L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 2,64 + 128 = 130,64 \text{ мГн} = 0,13064 \text{ Гн}. \quad (49)$$

– ротора:

$$L'_2 = L'_{2\delta} + L_\mu = 3,6 + 128 = 131,6 \text{ мГн} = 0,1316 \text{ Гн}. \quad (50)$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = \frac{L_\mu}{L_1 + L'_2} = \frac{0,128}{0,13064 + 0,1316} = 0,497\% \quad (51)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$R_\Sigma = R_1 + R'_2 \times \frac{L_1}{L'_2} = 0,69 + 0,32 \times \frac{0,13064}{0,1316} = 1,102 \text{ Ом}. \quad (52)$$

Электромагнитные постоянные времени:

$$T_{H1} = \frac{L_1}{R_\Sigma} = \frac{0,13064}{1,102} = 0,1185 \text{ мс} \quad (53)$$

$$T_{H2} = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,1316}{0,32} = 0,411 \text{ мс} \quad (54)$$

Эквивалентный момент инерции привода (7).

$$J_\Sigma = 0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

5.2.2 Структурная схема линейризованной непрерывной САУ ЭП

Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 11.

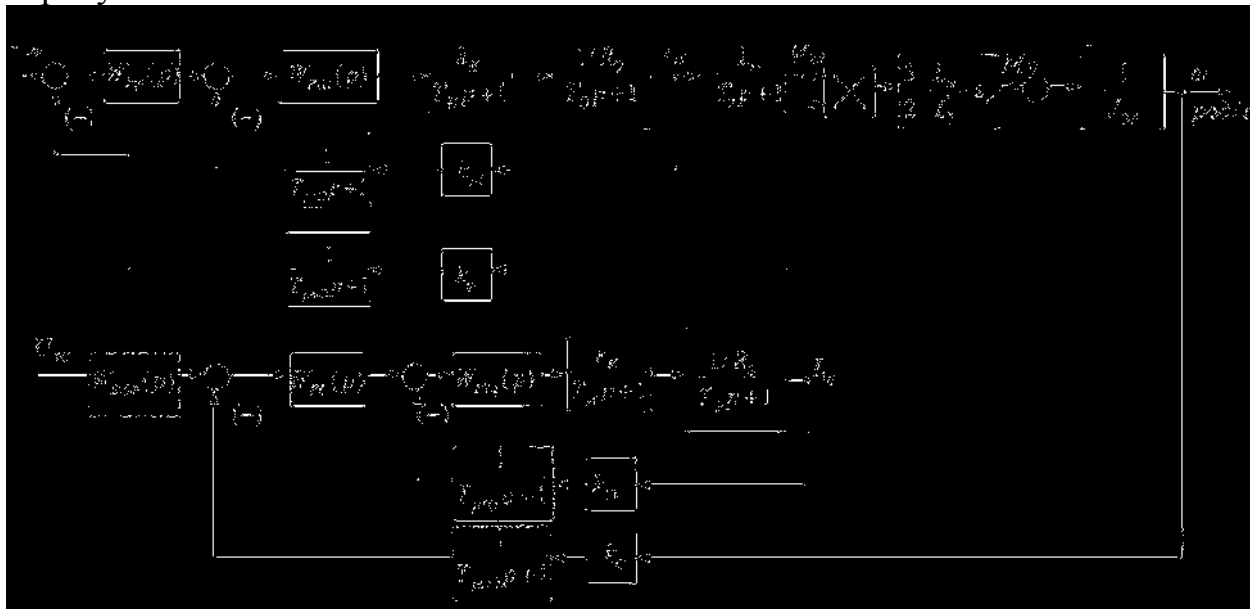


Рисунок 11 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ РЭП частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Обозначения, принятые на схеме:

- $W(p)_{PT}$, $W(p)_{PC}$, $W(p)_{PC}$ – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости соответственно.
- Коэффициент обратной связи по току, который находится по формуле:

$$k_T = \frac{U_{3T\max}}{I_{1U\max}} \quad (55)$$

где $I_{1U\max}$ – максимально допустимое значение тока;

$$U_{3T\max} = 10 \text{ В.}$$

Максимально допустимое значение тока:

$$I_{1U\max} = \sqrt{2} \times \sqrt{I_{3U\max}^2 + I_{3\omega\max}^2} \quad (56)$$

$$I_{1U\max} = \sqrt{2} \times \sqrt{17,324^2 + 5,1^2} = 23,414 \text{ А.}$$

Тогда коэффициент обратной связи по току:

$$k_T = 10 / 23,414 = 0,427.$$

- Малая постоянная времени цепи обратной связи по току:

$$T_{\mu TO} = T_{CT} / 3, \quad (57)$$

где T_{CT} – период сглаживания результатов измерения тока:

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

$$T_{CT} = n_T / f_{\text{ШИМ}}, \quad (58)$$

где $n_T = 8$ – количество измерений;

$$f_{\text{ШИМ}} = 8 \times 10^3 \text{ Гц.}$$

$$T_{\mu T0} = (8 / 8 \times 10^3) / 3 = 3,33 \times 10^{-4} \text{ с.}$$

- Коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора:

$$k_{\Psi} = \frac{U_{3\Psi\text{макс}}}{\Psi_{2\text{ХН}}} = \frac{10}{0,8956} = 11,166 \quad (59)$$

где $\Psi_{2\text{ХН}}$ – номинальное потокосцепление двигателя, Вб;

$$U_{3\Psi\text{макс}} = 10 \text{ В.}$$

$$k_{\omega} = \frac{U_{3\omega\text{макс}}}{\omega_{\text{ЭПмакс}}} = \frac{10}{152} = 0,06579 \quad (60)$$

где Z_p – число пар полюсов.

$$M_{\text{ЭИН}} = 1,088 \times M_{\text{дв.н}} = 1,088 \times 49 = 53,312 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (61)$$

$$k_{\Psi} = \frac{U_{3\Psi\text{макс}}}{\Psi_{2\text{ХН}}} = \frac{10}{0,8956} = 11,166$$

$$k_{\Psi} = 10 / 0,8956 = 11,166.$$

- Малая постоянная времени цепи обратной связи по потокосцеплению:

$$T_{c\Psi} = \frac{L_{\text{р}}}{R_{\text{р}}} = \frac{0,0006}{3} = 0,0002 \text{ с} \quad (62)$$

где $T_{c\Psi}$ – период расчета потокосцепления:

$$T_{c\Psi} = \left(16 \times \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} \right) \times n_{\Psi} \quad (63)$$

$$n_{\Psi} \geq 3.$$

$$T_{c\Psi} = \left(16 \times \frac{1}{8000} \right) \times 3 = 0,0006 \text{ с}$$

$$T_{\mu\Psi0} = 0,006 / 3 = 0,002 \text{ с.}$$

- Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_{\omega} = \frac{U_{3\omega\text{макс}}}{\omega_{\text{ЭПмакс}}} = \frac{10}{152} = 0,06579 \quad (64)$$

где $U_{3\omega\text{макс}} = 10 \text{ В}$, $\omega_{\text{ЭПмакс}} = 152 \text{ рад/с}$.

- Малая постоянная времени цепи обратной связи по скорости:

$$T_{\mu\omega0} = T_{c\omega} / 3, \quad (65)$$

где $T_{c\omega}$ – период расчета скорости:

$$T_{\text{сц}} = \left(1,5 \times \frac{1}{20000}\right) \times n_c \quad (66)$$

$n_c \geq 3$.

$$T_{\text{сц}} = \left(1,5 \times \frac{1}{20000}\right) \times 3 = 0,000225 \text{ с.}$$

$$T_{\mu C0} = 0,006 / 3 = 0,002 \text{ с.}$$

5.2.3 Оптимизация контура регулирования тока

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи ОС (обратной связи). Структурная схема контура тока с инерционной ОС и полной компенсацией внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя приведена на рисунке 12. Схемы контуров токов I_{1x} и I_{1y} одинаковые.

В схеме на рисунке 12 приняты следующие обозначения:

U_{3T} – напряжение задания на ток, В;

$T_{\mu TP}$ – малая постоянная времени в прямом канале, с;

$$T_{\mu TP} = T_{\text{и}} = 6,25 \times 10^{-5} \text{ с.} \quad (67)$$

$T_{\mu TO}$ – малая постоянная времени в цепи обратной связи, с.

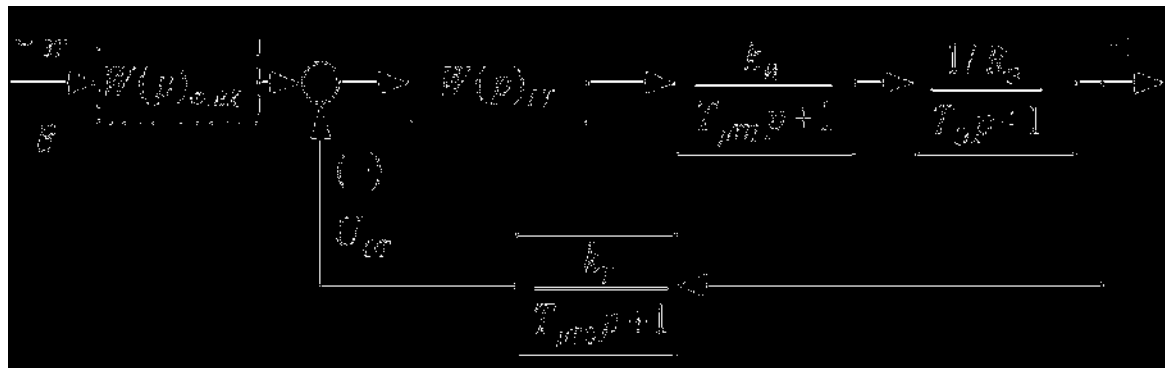


Рисунок 12 – Структурная схема контура тока

Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W_{PI}(p) = k_{PT} \times \frac{1 + a_T p}{T_{\mu TP} p} \quad (68)$$

где k_{PT} – коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{PT} = \frac{k_n \times k_{\text{и}}}{k_{\text{и}} \times k_{\text{и}} \times \omega_{\text{и}} \times (T_{\mu TP} \omega_{\text{и}} + T_{\mu TO} \omega_{\text{и}})} \quad (69)$$

где $a_T = 2$ – коэффициент оптимизации.

$$k_{PT} = \frac{0,0052 \times 1,182}{31,113 \times 0,427 \times 2 \times (0,625 + 3,333) \times 10^{-4}} = 0,584$$

Постоянная времени регулятора тока: $T_{PT} = T_{\mathcal{E}} = 0,0052$ с.

$$W(p)_{PT} = 0,534 \times \frac{0,0052p + 1}{0,0052p}$$

Контур тока имеет следующие передаточные функции.
Разомкнутого контура:

$$W(p)_{\text{РАЗ.Т}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТП}} \cdot T_{\mu\text{ТО}} \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p}; \quad (70)$$

Замкнутого контура:

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТП}} \cdot T_{\mu\text{ТО}} \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p + 1}, \quad (71)$$

где $T_{\mu\text{ТЭ}}$ – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока.

$$T_{\mu\text{ТЭ}} = T_{\mu\text{ТП}} + T_{\mu\text{ТО}} = 0,0000625 + 0,0003333 \approx 0,000396 \text{ с.} \quad (72)$$

5.2.4 Оптимизация контура регулирования потокосцепления

Контур регулирования потокосцепления имеет относительно большую инерционность в цепи ОС.

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка.

$$W(p)_{\text{ОС}} \approx \frac{k_{\text{ОС}}}{T_{\text{ТЭ}} \cdot p + 1} = \frac{2,342}{0,000792p + 1} \quad (73)$$

где $T_{\text{ТЭ}}$ – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

$$T_{\text{ТЭ}} = a_T \times T_{\mu\text{ТЭ}} = 2 \times 0,000396 = 0,000792 \text{ с.} \quad (74)$$

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 13.

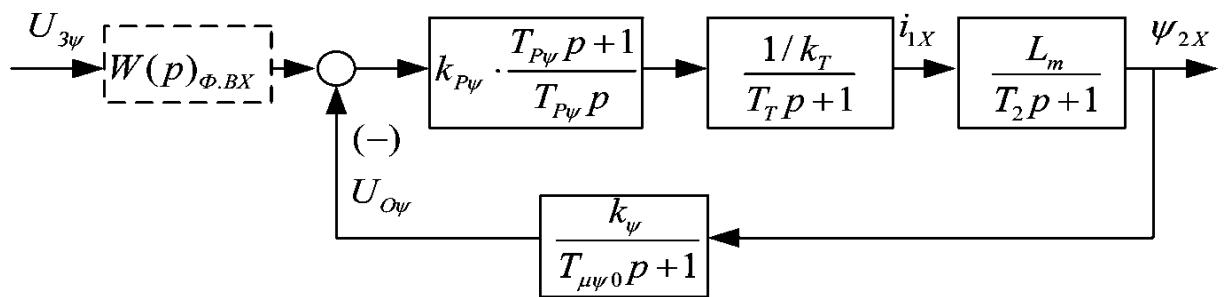


Рисунок 13 – Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором
 Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления:

$$W(p)_{PI} = k_{P\psi} \times \frac{T_{P\psi} \cdot p + 1}{T_{P\psi} \cdot p} \quad (75)$$

где $k_{P\psi}$ – коэффициент усиления регулятора потокосцепления:

$$k_{P\psi} = \frac{T_2 \times k_T}{I_{\psi} \times k_{\psi}} \times \frac{1}{a_{\psi} \times (T_T + T_{\mu\psi 0})} \quad (76)$$

где $a_{\psi} = 2$ – коэффициент оптимизации.

$$k_{P\psi} = \frac{0,253 \times 0,427}{0,128 \times 11,166 \times 2 \times (0,000792 + 0,002)} = 13,54$$

$$T_{P\psi} = T_2 = 0,253.$$

$$W(p)_{PI} = 13,54 \times \frac{0,253p + 1}{0,253p}$$

Контур потокосцепления с ПИ-регулятором, настроенный таким образом, имеет следующие передаточные функции.

Разомкнутого контура:

$$W(p)_{РАЗ.\psi} = \frac{1}{a_{\psi} \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p^3 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p}; \quad (77)$$

Замкнутого контура:

$$W(p)_{ЗАМ.\psi} = \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\mu\psi 0} \cdot p + 1)}{a_{\psi} \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p^3 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p + 1} \approx$$

$$\frac{1}{a_{\psi} \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p^3 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p + 1} \quad (78)$$

где $T_{\mu\psi\Omega}$ – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

$$T_{\mu\psi\Omega} = T_T + T_{\mu\psi\Omega} = 0,000792 + 0,002 \approx 0,00279 \text{ с.} \quad (79)$$

5.2.5 Оптимизация контура регулирования скорости

Контур регулирования скорости имеет относительно большую инерционность в цепи ОС.

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка.

$$W_{\text{опт}}(p) = \frac{k_{\text{опт}}}{T_{\text{опт}}p + 1} = \frac{2,242}{0,0000792p + 1} \quad (80)$$

где T_T – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

$$T_T = a_T \times T_{\mu\text{тЭ}} = 2 \times 0,000396 = 0,000792 \text{ с.} \quad (81)$$

Структурная схема контура скорости с инерционной ОС и ПИ-регулятором приведена на рисунке 14.

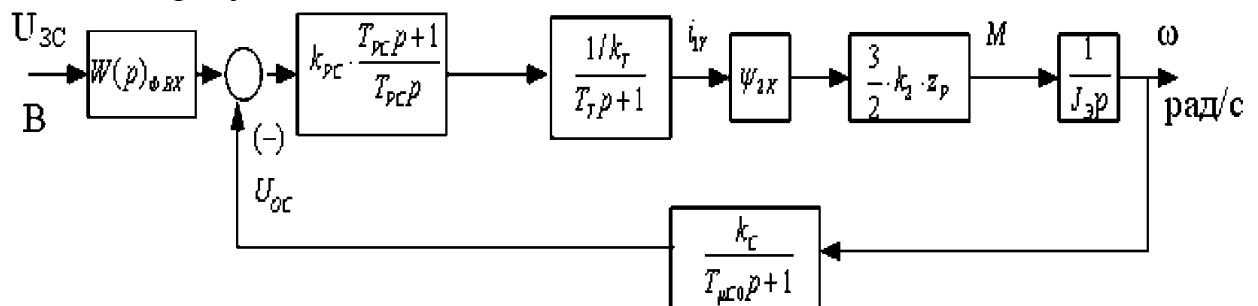


Рисунок 14 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором
Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = k_{\text{PC}} \times \frac{T_{\text{PC}} \cdot p + 1}{T_{\text{PC}} \cdot p} \quad (82)$$

где k_{PC} – коэффициент усиления регулятора скорости:

$$k_{\text{PC}} = \frac{k_2 \times k_T}{\frac{3}{2} \times z_p \times \frac{1}{k_T} \times k_c \times \psi_{2x}} \times a_c \times (T_T + T_{\mu\text{тЭ}}) \quad (83)$$

где $a_c = 2$ – коэффициент оптимизации.

$$k_{\text{PC}} = \frac{0,04 \times 0,427}{2 \times 2 \times \frac{0,128}{0,132} \times 0,066 \times 0,896} \times \frac{1}{2 \times (0,000792 + 0,002)} = 17,79$$

$$T_{\text{PC}} = b_C \times a_C \times (T_T + T_{\mu C0}) = 2 \times 2 \times (0,000792 + 0,002) = 0,011$$

$$W(p)_{\text{PC}} = 17,79 \times \frac{0,011p + 1}{0,011p}$$

Оптимизированный контур скорости с ПИ-регулятором имеет следующие передаточные функции.

Разомкнутого контура:

$$W(p)_{\text{РАЗ.С}} = \frac{a_C \cdot b_C \cdot T_{\mu CЭ} \cdot p + 1}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu C0} \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^2} \quad (84)$$

Замкнутого контура:

$$W(p)_{\text{РАЗ.С}} = \frac{1}{k_C} \cdot \frac{(a_C \cdot b_C \cdot T_{\mu CЭ} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu C0} \cdot p + 1)}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu C0} \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu CЭ} \cdot p + 1} \quad (85)$$

где $T_{\mu CЭ}$ – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

$$T_{\mu CЭ} = T_T + T_{\mu C0} = 0,000792 + 0,002 \approx 0,00279 \text{ с.} \quad (86)$$

Оптимизированный контур при отработке ступенчатых управляющих воздействий обеспечивает высокое быстродействие при перерегулировании в общем случае более 43%. Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на симметричный оптимум.

5.2.6 Построение имитационной модели и моделирование переходных процессов

С помощью программы Matlab в пакете Simulink собираем имитационную модель системы и производим моделирование переходных процессов скорости и тока. Имитационная модель, собранная в программе, представлена на рисунке 15. Графики переходных процессов на рисунках 16–19 в пояснительной записке и на плакате.

Темп изменения выходного сигнала задатчика интенсивности (ЗИ) определяется уровнем ограничения Q нелинейного элемента (НЭ) и постоянной времени $T_{\text{ЗИ}}$ интегратора (И). Постоянная времени интегрирующего звена ЗИ:

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{\text{ЗИ}}} \times \frac{1}{a_{\text{ЗИ}}}$$

(87)

где $\varepsilon = 125 \text{ рад} / \text{с}^2$ – заданное ускорение;

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

k_{oc} – коэффициент обратной связи по скорости:
 $k_{oc} = 10 / 152 = 0,066$.

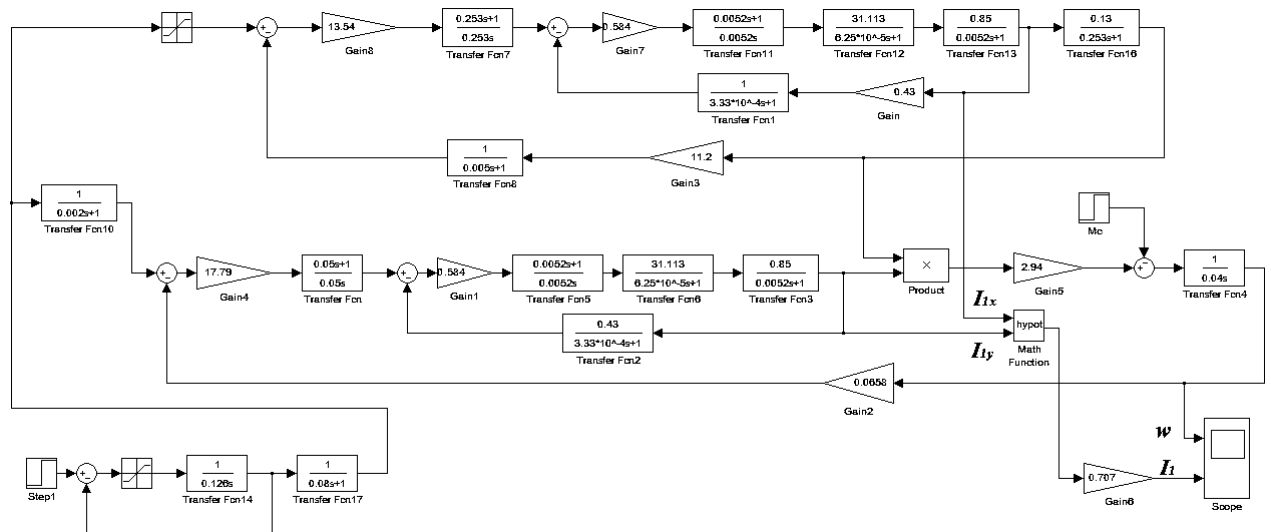
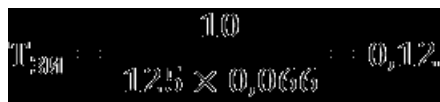


Рисунок 15 – Имитационная модель непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

На рисунках 16 и 18 показаны характеристики скорости и тока соответственно в моменты пуска, наброса нагрузки и вхождения в заданную скорость.

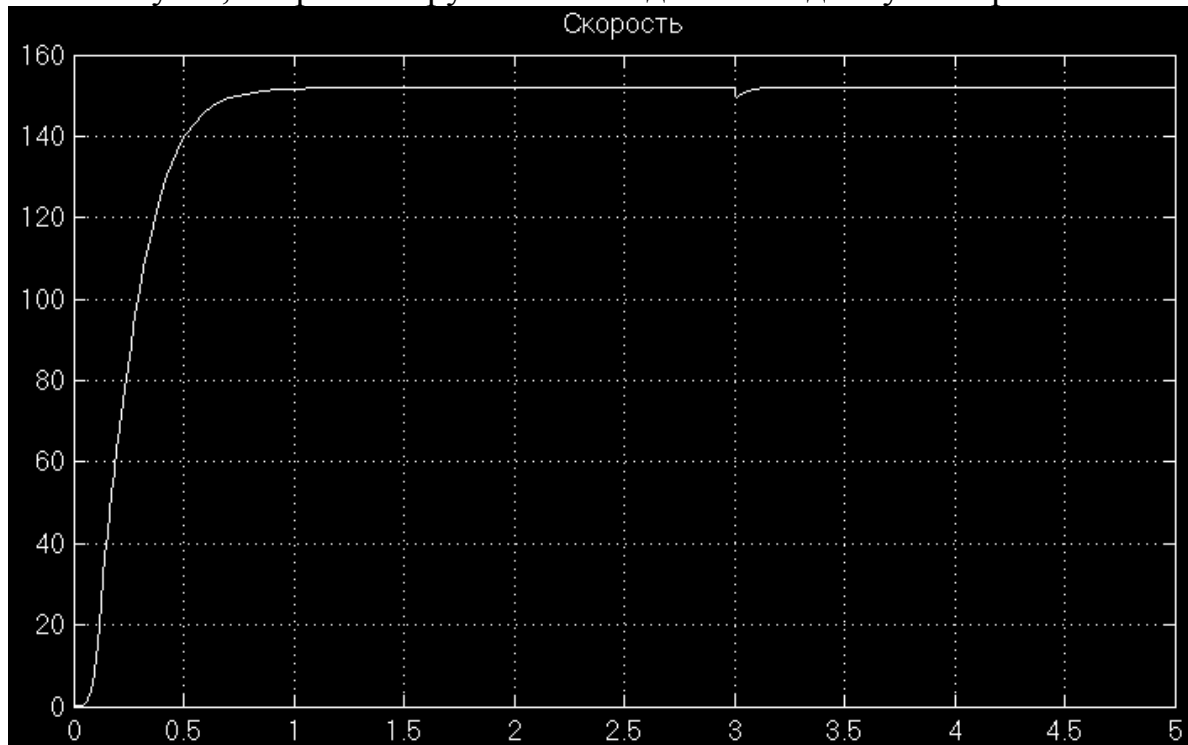


Рисунок 16 – Динамические характеристики скорости

Скорость при пуске обрабатывается с перерегулированием равным нулю. Время пуска – 0,8 с.

Максимальное отклонение скорости при изменении нагрузки составляет (рисунок 17):

$$h_{\omega} = \frac{\omega_{зад} - \omega_{min}}{\omega_{зад}} \cdot 100\% = \frac{152 - 149}{152} \cdot 100\% = 1,97\% \quad (88)$$

Время переходного процесса при набросе нагрузки – 0,15 с.

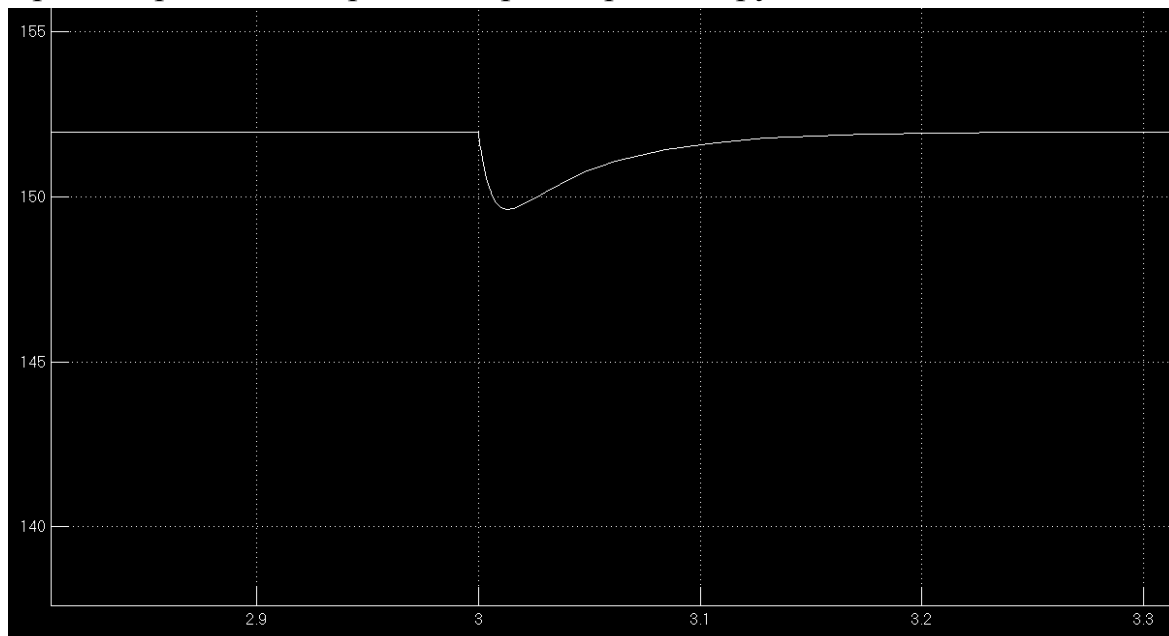


Рисунок 17 – Характеристика скорости в момент наброса нагрузки

Пусковой ток (рисунок 18) равен 36,2 А, что почти в 3 раза меньше, чем пусковой ток ($I_{п}=15,3\text{А}\times 7=107,1\text{А}$) на который рассчитан двигатель. Время переходного процесса тока при пуске – 0,6 с.

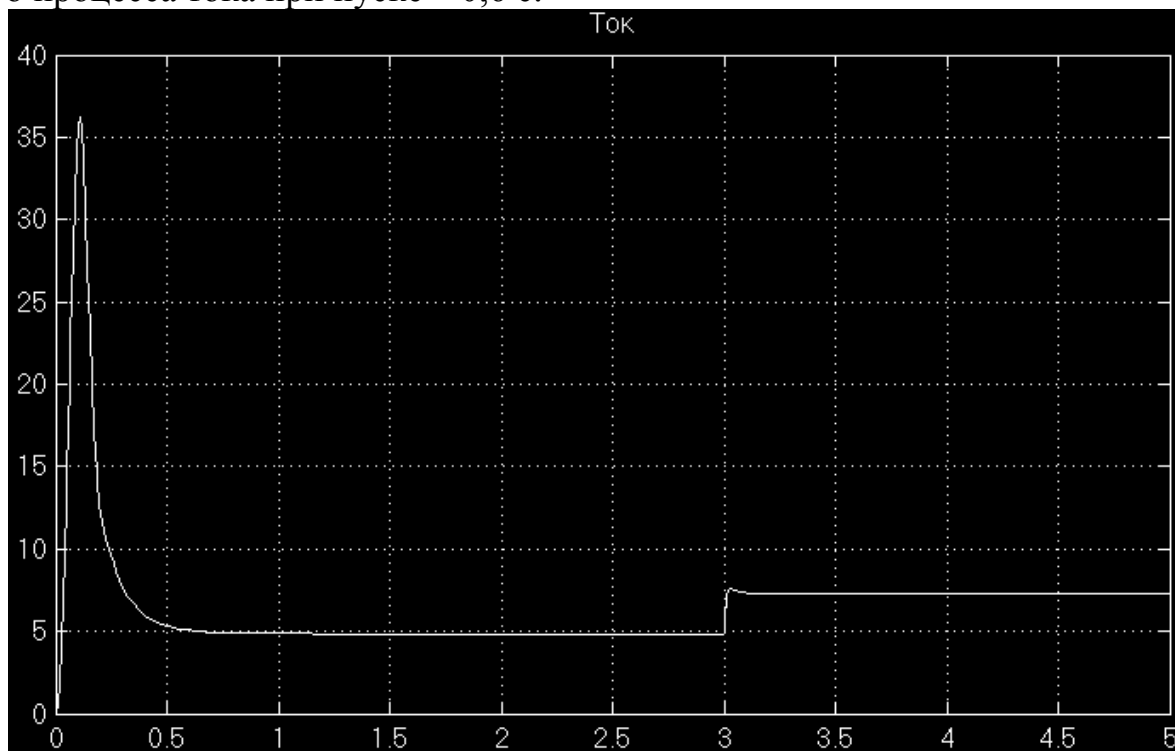


Рисунок 18 – Динамические характеристики тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ

Лист

58

Перерегулирование по току при набросе нагрузки составляет:

$$\Delta I_{\text{уст}} \cdot \frac{I_{\text{уст}}}{I_{\text{уст}}} \times 100\% = \frac{7,59 - 7,25}{7,25} \times 100\% = 4,69\% \quad (89)$$

Время переходного процесса при набросе нагрузки (рисунок 19) – 0.15 с.

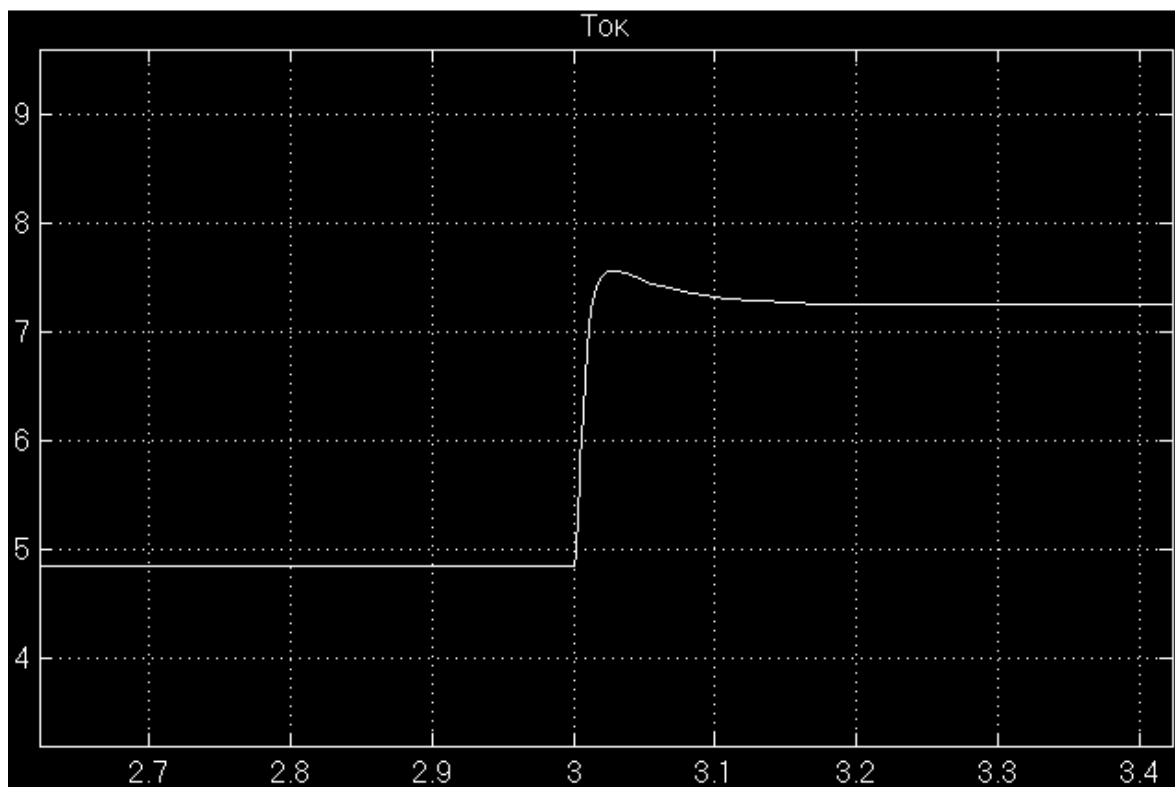


Рисунок 19 – Характеристика тока в момент наброса нагрузки

Выводы по разделу пять

В пятом разделе ВКР были проведены статический и динамический расчеты электропривода. Для этого были проведены синтез регуляторов преобразованных токов статора, синтез регулятора угловой скорости, синтез регулятора электромагнитного момента, расчёт параметров структурной схемы привода, расчёт передаточных звеньев структурной схемы, моделирование переходных процессов.

6 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

6.1 Общие положения

Систематическая работа в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в различных секторах и сферах экономики России началась после принятия федерального закона РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Руководителям предприятий необходимо находить пути снижения энергопотребления. Ни для кого не секрет что частотный преобразователь в наши дни является неотъемлемым атрибутом области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Для определения экономической эффективности модернизации сопоставим варианты электроприводов старого с прямым пуском и нового с преобразователем частоты. Для этого определим технико-экономические показатели:

- производительность оборудования;
- капитальные затраты;
- эксплуатационные расходы.

6.2 Оценка годовой производительности станка

Проведем оценку показателей качества с точки зрения производительности.

Отличия прямого пуска и применение преобразователя частоты указаны в таблице 14.

Таблица 14 – Отличия между разными методами пуска электродвигателей

Метод пуска	Прямое включение	Частотно-регулируемый привод
Управление скоростью/моментом	нет	да
Возможность использования эффективных трансмиссий	нет	да
Уменьшение пускового тока	нет	да
Защита электродвигателя	с дополнительными приспособлениями	да
Эффективность	99%	95–97%
Повышение коэффициента мощности	нет	при условии фильтрации гармоник
Потенциал экономии энергии в процессе работы	нет	высокий

Прямое включение электродвигателей это наиболее простой способ, но и наименее эффективный в плане управления ускорением, моментом на валу двигателя и защиты двигателя от перегрузок в целом.

Кроме того, пусковые токи при прямом включении двигателя в 5–7 раз превышают номинальные значения. Работа двигателя с частотным преобразователем наиболее эффективна, как в плане защиты двигателя, управления ускорением и моментом, так и в плане экономии электрической энергии. Более детальное сравнение этих двух основных методов приводиться в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнение двух основных методов работы электродвигателей

работа двигателя от сети	работа двигателя от ПЧ
Возможна только одна скорость или, при смене полюсов двигателя, несколько фиксированных скоростей вращения. Невозможно управлять разгоном, время разгона зависит от характеристики двигателя и момента нагрузки.	Бесступенчатое регулирование скорости двигателя. Управляемый разгон, время разгона регулируется.
Невозможно управлять торможением, время замедления зависит от соответствующего момента и момента нагрузки.	Три способа остановки: 1. управляемое замедление, время замедления регулируется (с тормозным модулем) 2. Торможение постоянным током 3. Движения по инерции (модулями выключено)
Реверсирование возможно только переключением фаз - дополнительные затраты на коммутационное оборудование.	Управляемое реверсирование благодаря электронному реверсированию вращающегося поля без дополнительных затрат.
Фиксированный пусковой момент (определяется двигателем). Высокий пусковой ток.	Регулирование пускового момента U/f - характеристикой ПЧ. Ограничение пускового тока, ток зависит от разгона и момента нагрузки.
Дополнительные функции (например, защита двигателя, плавный старт, торможение постоянным током) требуют дополнительных затрат.	ПЧ выполняет дополнительные функции (регистрация тока и напряжения, управляющие функции и т.д.)

Безусловно, с технической точки зрения частотно-регулируемый привод предпочтительнее прямого включения электродвигателя.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что применение двигателя АДЧР132S4 и ПЧ Овен ПЧВ203 в системе привода главного движения должен повысить производительность станка, на котором он будет установлен, за счет факторов снижающим затраты и повышающим эффективность внедрения ПЧ:

- экономия электроэнергии;
- снижение затрат на текущее обслуживание привода;
- увеличение ресурса электродвигателя.

6.3 Определение капитальных затрат

Капитальные затраты включают в себя стоимость привода, затраты на монтаж, накладные расходы и прочие расходы (заготовительно-складские, транспортные и др.).

Капитальные затраты на приобретение и установку новой системы привода определяются по следующей формуле:

$$Z_k = C_{об} + P_{тр} + Z_{с-м} + Z_{пр}, \quad (90)$$

где Z_k – капитальные затраты;

$C_{об}$ – цена оборудования;

$P_{тр}$ – транспортные расходы;

$Z_{с-м}$ – строительно-монтажные затраты;

$Z_{пр}$ – прочие затраты.

Стоимость АДЧР132S4 и ПЧ Овен ПЧВ203 на 01.06.2020г. приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Стоимость нового оборудования

Оборудование	Стоимость, руб.
Электродвигатель АДЧР132S4У3	28720
Преобразователь частоты Овен ПЧВ203-7К5-В	40440
Итого ($K_{об.1}$)	69160

Стоимость транспортных расходов рассчитываем с учетом того, что они составляют (5 – 10) % от стоимости оборудования:

$$P_{тр} = 0,05 \times C_{об}. \quad (91)$$

Стоимость строительно-монтажных работ рассчитываем с учетом того, что они составляют (15 – 25) % от стоимости оборудования:

$$Z_{с-м} = 0,15 \times C_{об}. \quad (92)$$

Стоимость прочих расходов рассчитываем с учетом того, что они составляют (5 – 10) % от стоимости оборудования:

$$Z_{пр} = 0,1 \times C_{об}. \quad (93)$$

Тогда капитальные затраты на покупку и установку привода с ПЧ:

$$Z_{к\text{ пч}} = C_{об} + 0,05 C_{об} + 0,15 C_{об} + 0,1 C_{об} = 1,3 C_{об} = 1,3 \times 69160 = 89908 \text{ руб.}$$

Капитальные затраты на установленный двигатель с прямым пуском:

$$Z_{к\text{ пч}} = 1,3 \times 10670 = 13871 \text{ руб.}$$

6.4 Определение эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы включают в себя: затраты на потребляемую электроэнергию, затраты на текущий и капитальный ремонты, зарплату персонала, обслуживающего оборудование, отчисления в различные фонды и прочие расходы:

$$P_{\text{экспл}} = P_{\text{эн}} + Z_{\text{рм}} + Z_{\text{обсл}}, \quad (94)$$

где $P_{\text{эн}}$ – расходы на электроэнергию, руб. в год;

$Z_{\text{рм}}$ – затраты на ремонты, руб. в год;

$Z_{\text{обсл}}$ – затраты на обслуживание, руб. в год.

Расчет затрат на электроэнергию.

Расходы на электроэнергию определяются количеством электроэнергии, потреблённой за год, номинальной мощностью двигателя, а также стоимостью электроэнергии.

Расходы на электроэнергию определим по формуле:

$$P_{\text{эн}} = N \times C_{\text{эн}}, \quad (95)$$

где N – количество потребляемой электрической энергии, кВт·ч в год;

$C_{\text{эн}}$ – стоимость электроэнергии, руб. за кВт·ч.

В целях упрощения расчета, проведем вычисления с использованием одноставочного тарифа, $C_{\text{эн}} = 3,9$ руб./кВт·ч.

Количество потребляемой электроэнергии определяем по формуле:

$$N = P_{\text{ном}} \times T_{\text{р}} \times K_{\text{э}} \times K_{\text{исп}}, \quad (96)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

$T_{\text{р}}$ – период работы оборудования, за год, при работе в 2 смены,

$T = 5000$ ч;

$K_{\text{э}}$ – коэффициент экономичности эл.оборудования: для ПЧ $K_{\text{э}} = 0,6-0,8$.

$K_{\text{исп}}$ – коэффициент использования:

$$K_{\text{исп}} = \frac{ПВ \cdot t_{\text{раб}}}{t_{\text{см}}}, \quad (97)$$

где ПВ – продолжительность включения установки, о.е.;

$t_{\text{раб}}$ – продолжительность работы установки за смену, $t_{\text{раб}} = 8$ ч;

$t_{\text{см}}$ – число рабочих часов в смену, $t_{\text{см}} = 8$ ч.

$K_{\text{исп}} = 1 \times 8 / 8 = 1$.

Количество потребляемой электрической энергии привода с ПЧ:

$N_{\text{ПЧ}} = 7,5 \times 5000 \times 1 \times 0,75 = 28125$ кВт·ч/год.

Расходы на электроэнергию составят:

$P_{\text{эн пч}} = 28125 \times 3,9 = 109687,5$ руб.

Количество потребляемой электрической энергии привода с прямым пуском:

$N_{\text{ПП}} = 7,0 \times 5000 \times 1 \times 1 = 35000$ кВт·ч/год.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

Расходы на электроэнергию составят:

$$P_{\text{ЭН ПП}} = 35000 \times 3,9 = 136500 \text{ руб.}$$

Затраты на капитальный и текущий ремонты.

$$Z_{\text{рм}} = K_{\text{зтр}} \times Z_{\text{к}}, \quad (98)$$

где $K_{\text{зтр}}$ – коэффициент, учитывающий затраты на текущие ремонты.

$$Z_{\text{рм ПЧ}} = 0,1 \times 89908 = 8990,8 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{рм ПП}} = 0,2 \times 13871 = 2774,8 \text{ руб.}$$

Определение затрат на обслуживание.

В затраты на обслуживание входит основная и дополнительная зарплата обслуживающего персонала. Эти составляющие определять не целесообразно, потому что количество обслуживающего персонала и его профессиональный уровень не изменяется. Соответственно, нет необходимости определять и взносы в пенсионный фонд, и отчисления в фонд социального страхования, и в фонд обязательного медицинского страхования.

В таком случае общие эксплуатационные расходы по будут равны:

$$P_{\text{экспл ПЧ}} = P_{\text{ЭН ПЧ}} + Z_{\text{рм ПЧ}} = 109687,5 + 8990,8 = 118678,3 \text{ руб./год};$$

$$P_{\text{экспл ПП}} = P_{\text{ЭН ПП}} + Z_{\text{рм ПП}} = 136500 + 2774,8 = 139274,8 \text{ руб./год.}$$

Разница между общими эксплуатационными расходами электропривода с ПП и электропривода с ПЧ составляет:

$$P_{\text{экспл ПП}} - P_{\text{экспл ПЧ}} = 139274,8 - 118678,3 = 20596,5 \text{ руб./год.}$$

6.5 Определение приведенных затрат по вариантам систем электроприводов и экономического эффекта от использования нового оборудования

Экономическую эффективность инвестиционного проекта оценим по следующим показателям:

- а) чистая приведенная стоимость (чистый дисконтированный доход), NPV;
- б) расчетный срок окупаемости стартовых инвестиций.

Приведенные затраты – показатель сравнительной экономической эффективности капитальных вложений, применяемый при выборе лучшего из вариантов решения технических и хозяйственных задач. При сравнении возможных вариантов решения лучшим при прочих равных условиях считается вариант, требующий минимума приведенных затрат.

Определим приведенные затраты по формуле:

$$Z_{\text{пр}} = K_{\text{н}} \times Z_{\text{к}} + P_{\text{экспл}}, \quad (99)$$

где $K_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент экономической эффективности, $K_{\text{н}} = 0,15$.

$$Z_{\text{пр ПЧ}} = 0,15 \times 89908 + 118678,3 = 132164,5.$$

$$Z_{\text{пр ПП}} = 0,15 \times 13871 + 139274,8 = 141355,45.$$

Приведенные затраты для привода с преобразователем частоты меньше, чем приведенные затраты для привода с прямым пуском.

Экономический эффект от использования нового электропривода:

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

$$\Delta_{\text{эф}} = Z_{\text{пр пп}} - Z_{\text{пр пч}} \quad (100)$$

$$\Delta_{\text{эф}} = 141355,45 - 132164,5 = 9190,95 \text{ руб./год.}$$

6.6 Определение экономической эффективности использования предварительно выбранной системы электропривода

Чистый дисконтированный (приведенный) доход NPV определяется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^{t_{\text{сл.об}}} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - Z_{\text{к}} \quad (101)$$

где $t_{\text{сл.об}}$ – срок службы оборудования, г.;

r – ставка дисконтирования (принимается – 10%);

CF_t – доход, приток наличности, руб. в год.

Доход определяем в соответствии со следующей формулой:

$$CF_t = \Delta_{\text{эф}} \times (1 - N_c) + O_{\text{амор.}} \quad (102)$$

где $\Delta_{\text{эф}}$ – экономический эффект при внедрении привода с ПЧ, руб. в год;
 N_c – налоговая ставка (20%);

$O_{\text{амор.}}$ – амортизационные отчисления, руб. в год.

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле:

$$O_{\text{амор.}} = \frac{Z_{\text{к}}}{T_{\text{сл.об}}} \quad (103)$$

$$O_{\text{амор.}} = 89908 / 10 = 8990,8 \text{ руб./год.}$$

$$CF_t = 9190,95 \times (1 - 0,2) + 8990,8 = 16343,56 \text{ руб./год.}$$

Принимаем $CF_1 = CF_2 = \dots = CF_t$ и вычисляем чистый дисконтированный (приведенный) доход по формуле (101):

$$NPV = \sum_{t=1}^{10} \frac{16343,56}{(1+0,1)^t} - 89908 = 130516,1 \text{ руб.}$$

Так как $NPV \gg 0$, то проект экономически целесообразный.

Расчетный срок окупаемости определим по формуле:

$$T_{\text{окуп.}} = (Z_{\text{к}} - Z_{\text{ликв}}) / CF_t \quad (104)$$

где $Z_{\text{ликв.}}$ – ликвидационная стоимость (0% от капитальных вложений), руб.

Вычисляем примерный срок окупаемости внедренного оборудования:

$$T_{\text{окуп.}} = (89908 - 0) / 16343,56 = 5,5 \text{ лет.}$$

$T_{\text{окуп.}} > T_n = 3$, но учитывая, что $T_{\text{окуп.}} < T_{\text{сл.об.}} = 10$ лет и новое оборудование обладает более лучшими характеристиками и является более надежным, чем заменяемый, проект можно считать экономически целесообразным.

Выводы по разделу шесть

В данном разделе был проведен экономический анализ целесообразности приобретения и внедрения преобразователя частоты в систему привода главного движения фрезерного станка. Для этого была проведена оценка годовой производительности станка, рассчитаны капитальные затраты на оборудование, определена экономическая эффективность использования выбранной системы электропривода и срок окупаемости оборудования. Проведенные расчеты доказывают целесообразность внедрения новой системы электропривода, в частности, небольшой срок окупаемости капиталовложений. В тоже время новый электропривод, обладающий лучшими характеристиками и высокой надежностью должен повысить производительность станка, на котором он будет установлен, за счет экономии времени на технологическое обслуживание, то есть за счет времени бесперебойной работы оборудования.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

7.1 Социальное значение безопасности жизнедеятельности

Сохранение жизни и здоровья каждого работника является одной из приоритетных задач для любого работодателя. Выполнению этой задачи способствует обеспечение производственной среды с оптимальными условиями труда для каждого работника.

Условия труда, соответствующие оптимальному уровню, являются не только основополагающим фактором любого вида деятельности, но и представляют собой залог высокой работоспособности и соответственно высокой производительности труда персонала.

Проведем анализ условий труда персонала при фрезеровании изделий с разработкой рекомендаций по их улучшению.

Для достижения этой цели необходимо решить ряд взаимосвязанных задач, дать характеристику социальному значению безопасности жизнедеятельности, рассмотреть опасные и вредные производственные факторы при фрезеровании изделий, технические и организационные меры по уменьшению их влияния на человека, оценить пожарную безопасность в цехе, оценить процесс механической обработки металлов как источник загрязнения окружающей среды.

Результатом индустриализации общества явилось превращение биосферы в техносферу. Под действием человека сформировалось новое состояние природы, которое советский ученый Г.Ф. Хельми назвал биотехносферой или техносферой.

В таблице 17 приведены основные термины.

Таблица 17 – Основные термины

Термин	Значение
Техносфера	Совокупность антропогенных объектов, созданных из полностью утративших свойства природной среды частей биосферы при использовании человеком различных видов техники и технологий. В отличие от биосферы техносфера не саморегулирующаяся и не самоуправляющаяся организованная система, а очень сложный конгломерат многих подсистем, которыми управляет человек. Созданная человеком техносфера в конечном счете сама начинает активно влиять на безопасность его жизнедеятельности, становясь со временем опасным фактором существования современной цивилизации. То есть, техносфера, изначально предназначенная для повышения производительности труда и комфортности жизни и отдыха, сама способна генерировать целый ряд негативных факторов, представляющих угрозы и опасности для 13 человека и общества. Примерами таких опасностей являются случаи травматизма, профессиональных заболеваний и гибели людей на производстве, промышленные аварии, ДТП, различные транспортные катастрофы и т.д

Продолжение таблицы 18

Условия взаимодействия системы «человек-среда обитания»	Характеристика условий
Чрезвычайно опасные (сверх экстремальные)	Условия жизнедеятельности человека, когда потоки высоких уровней за короткий промежуток времени могут нанести травму с частичной или полной потерей трудоспособности (инвалидности) или привести к летальному исходу. Состояние самой среды обитания может быть близким к кризисному, либо оно находится на стадии экологической или техногенной катастрофы со всеми вытекающими из этого негативными для биосферы и человека последствиями. Подобное состояние обычно рассматривается как чрезвычайная ситуация (ЧС).

7.2 Опасные и вредные производственные факторы при фрезеровании изделий

Производственные помещения, в которых происходит фрезерование, должны соответствовать требованиям СНиП II-89-90 и санитарным нормам проектирования промышленных предприятий СН 245-71. Бытовые помещения должны соответствовать требованиям СНиП II-92-76. По ГОСТ 12.4.009-83 все помещения должны оборудоваться средствами пожаротушения.

Работа на фрезерных станках может сопровождаться наличием ряда вредных и опасных производственных факторов. Они приводятся в таблице 19.

Таблица 19 – Вредные и опасные производственных факторы при фрезеровании изделий

Фактор	Тип	Последствия воздействия
Повышенное напряжение электрической сети	Опасный	Возможность получения травм различной степени тяжести при несоблюдении требований электробезопасности
Повышенная температура поверхностей обрабатываемых деталей и инструмента	Опасный	Возможность получения термического ожога различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы
Повышенный уровень вибрации	Вредный	Возможность получения профессионального заболевания различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы
Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся изделия, заготовки, материалы, отлетающие кусочки металла,	Опасный	Возможность получения травм различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы

Продолжение таблицы 19

Фактор	Тип	Последствия воздействия
Повышенное напряжение электрической сети	Опасный	Возможность получения травм различной степени тяжести при несоблюдении требований электробезопасности
Повышенная температура поверхностей обрабатываемых деталей и инструмента	Опасный	Возможность получения термического ожога различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы
Повышенный уровень вибрации	Вредный	Возможность получения профессионального заболевания различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы
Движущиеся машины и механизмы, передвигающиеся изделия, заготовки, материалы, отлетающие кусочки металла,	Опасный	Возможность получения травм различной степени тяжести при несоблюдении требований безопасной работы

Примерная оценка факторов рабочей среды представлена в таблице 20. Класс условий труда может меняться от 2-го до 3-го в зависимости от конкретных условий цеха, а также от количества и качества внедряемых мероприятий по улучшению условий труда

Таблица 20 – Оценка условий труда фрезеровщика по степени вредности

Фактор	Класс условий труда		
	Оптимальный	Допустимый	Вредный
Химический		+	
Шум			+
Вибрация общая		+	
Вибрация локальная		+	
Микроклимат		+	
Световая среда			+
Тяжесть труда	+		
Напряженность труда		+	

7.3 Разработка технических и организационных мер по уменьшению влияния опасных и вредных факторов на человека

7.3.1 Электробезопасность

Произведем расчет совмещенного ЗУ (заземляющего устройства) для цеховой трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ, подсоединенной к электросети с изолированной нейтралью.

Общая длина кабельных линий, подключенных к сети $l_{каб} = 40$ км; общая длина кабельных линий, подключенных к сети ЛЭП $l_{лэп} = 70$ км; естественное сопротивление – $R_e = 30$ Ом.

Минимальные размеры арматуры, применяемые для монтажа заземляющих устройств (рисунок 20):

- а) полоса 12x4 мм (для горизонтальных электродов);
- б) уголок 10x10x4 мм (для горизонтальных электродов), 50x50x4 мм (для вертикальных электродов);
- в) круглая сталь – $\phi 10$ мм;
- г) стальная труба (толщина стенки) – 3,5 мм.

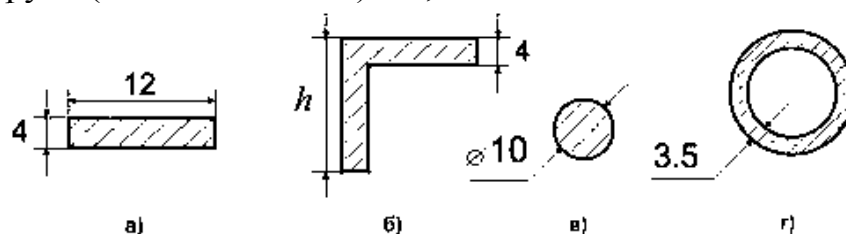


Рисунок 20 – Минимальные размеры арматуры для ЗУ

Длина заземляющего стержня должна быть не меньше 1,5–2 м.

Расстояния между заземляющими стержнями берется из соотношения их длины (рисунок 21), то есть: $a = 1 \times L$; $a = 2 \times L$; $a = 3 \times L$.

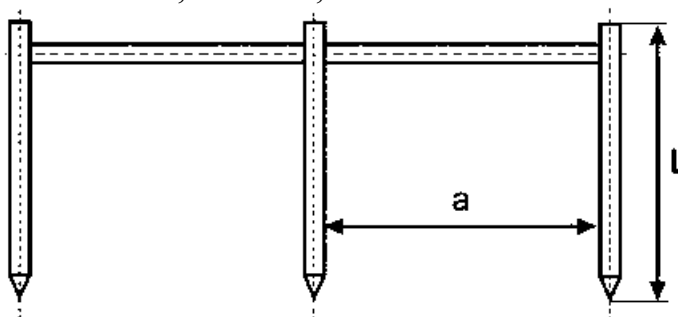


Рисунок 21 – Расстояния между заземляющими стержнями

Принимаем: замкнутый контур ЗУ (рисунок 22); грунт – суглинок; вертикальный электрод – уголок со стороной $b = 100$ мм, горизонтальный электрод – труба диаметром $d_T = 24$ мм; длина вертикальных электродов $l_b = 4$ м; количество вертикальных электродов $n_b = 10$ шт; расстояние между электродами $a_b = 12$ м; расстояние от поверхности до ЗУ $H_0 = 0,9$ м.

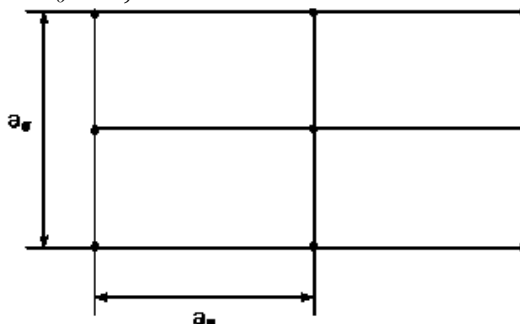


Рисунок 22 – Схема расположения электродов ЗУ

На рисунке 23 показаны схемы вертикального и горизонтального электродов и их положение относительно поверхности земли.

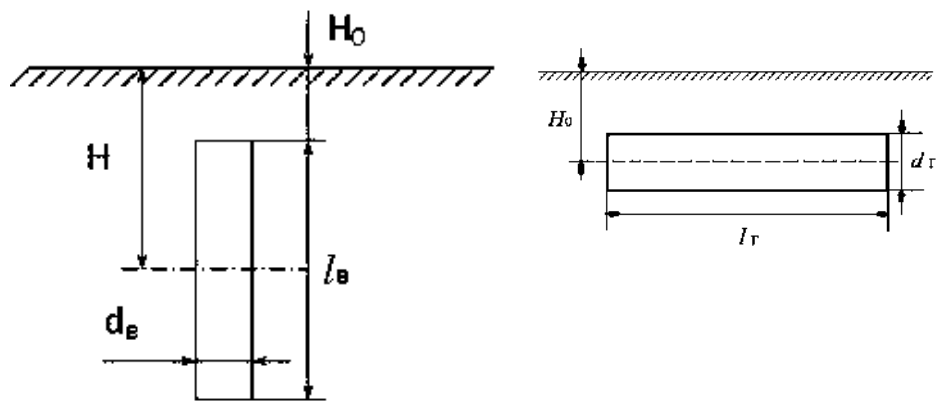


Рисунок 23 – Вертикальный и горизонтальный электроды

Расчетный ток замыкания на землю:

$$I_3 = \frac{U_{л} \cdot (35 \cdot l_{каб} + l_{воз})}{350} = \frac{6 \cdot (35 \cdot 40 + 70)}{350} = 25,2 \text{ А.} \quad (105)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение сети, кВ.

Расчетное удельное сопротивление грунта:

$$\rho_{расч} = \rho_{табл} \cdot \psi = 100 \cdot 1,5 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (106)$$

где $\rho_{табл.} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление суглинистого грунта [21];

$\psi = 1,5$ – климатический коэффициент, принятый для суглинистого грунта.

Определим необходимость искусственного заземлителя и вычисление его требуемого сопротивления. Сопротивление ЗУ R_3 :

$$R_3 = \frac{0,25 \times \rho}{l_3} = \frac{0,25 \times 150}{25,2} = 1,49 \text{ Ом.} \quad (107)$$

$30 = R_e > R_3 = 1,49$, следовательно, нужен искусственный заземлитель. Его требуемое сопротивление:

$$R_u \leq \frac{R_e \cdot R_3}{R_e - R_3} \leq \frac{30 \cdot 1,49}{30 - 1,49} \leq 1,57 \text{ Ом.} \quad (108)$$

Расчетное значение сопротивления вертикального электрода $R_в$, Ом:

$$R_{в} = \frac{\rho_{расч}}{2 \times n \times l_{в}} \times \left(\ln \frac{2 \times l_{в}}{d_{в}} + \frac{1}{2} \times \ln \frac{4 \times H + l_{в}}{4 \times H - l_{в}} \right) \quad (109)$$

где $d_{в} = 0,95 \times b$ – для уголка.

$d_{в} = 0,95 \times 100 = 95 \text{ мм} = 0,095 \text{ м}$.

Определим расстояние от поверхности земли до середины вертикального электрода:

$$H = H_0 + 0,5 \times l_B = 0,9 + 0,5 \times 4 = 2,9 \text{ м.} \quad (110)$$

Тогда:

$$R_{гв} = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 4} \times \left(\ln \frac{2 \times 4}{0,024} + \frac{1}{2} \times \ln \frac{4 \times 2,9 + 4}{4 \times 2,9 - 4} \right) = 28,61 \text{ Ом.}$$

Определим длину горизонтальных электродов для замкнутого контура ЗУ:

$$l_2 = n_B \times a_B = 10 \times 12 = 120 \text{ м.} \quad (111)$$

Расчетное значение сопротивления горизонтального электрода:

$$R_{гг} = \frac{\rho_{гг}}{2 \times \pi \times d_г} \times \ln \frac{l_2}{d_г \times \eta_г} \quad (112)$$

$$R_{гг} = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 120} \times \ln \frac{120}{0,024 \times 0,9} = 2,67 \text{ Ом.}$$

Расчетное сопротивление группового заземлителя R , Ом:

$$R = \frac{R_{гв} \times R_{гг}}{R_{гв} + R_{гг}} \quad (113)$$

Коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов по табличным данным равны: $\eta_B = 0,76$, $\eta_Г = 0,56$.

$$R = \frac{28,61 \times 2,67}{28,61 \times 0,56 + 2,67 \times 0,76 \times 10} = 2,1 \text{ Ом.}$$

$2,1 \text{ Ом} = R > R_u \leq 1,57 \text{ Ом}$, следовательно, нужно увеличить количество вертикальных электродов.

Принимаем $n = 16$. Тогда:

$$l_2 = 16 \times 12 = 192 \text{ м.}$$

Коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов в этом случае равны $\eta_B = 0,73$, $\eta_Г = 0,49$.

Тогда:

$$R_{гв} = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 16} \times \left(\ln \frac{2 \times 16}{0,024} + \frac{1}{2} \times \ln \frac{16 \times 2,9 + 16}{16 \times 2,9 - 16} \right) = 1,8 \text{ Ом.}$$

$$R_{гг} = \frac{150}{2 \times 3,14 \times 192} \times \ln \frac{192}{0,024 \times 0,9} = 1,47 \text{ Ом.}$$

$1,47 \text{ Ом} = R < R_u \leq 1,57 \text{ Ом}$. Следовательно, расчет проведен правильно.

Общее сопротивление комбинированного заземляющего устройства:

$$R_k = R_e \cdot R / (R_e + R) \leq R_з. \quad (114)$$

$$R_k = 30 \times 1,47 / (30 + 1,47) = 1,40 \text{ Ом} < 1,49 \text{ Ом.}$$

На рисунке 24 приведена схема использования совмещенного ЗУ в системе защитного ЭУ напряжением до и свыше 1 кВ, где:

- 1 – заземляющий проводник;
- 2 – горизонтальный заземлитель;
- 3 – вертикальный заземлитель;
- 4 – естественный заземлитель;
- ЭУ1 – высоковольтная ЭУ;
- ЭУ2 – низковольтная ЭУ.

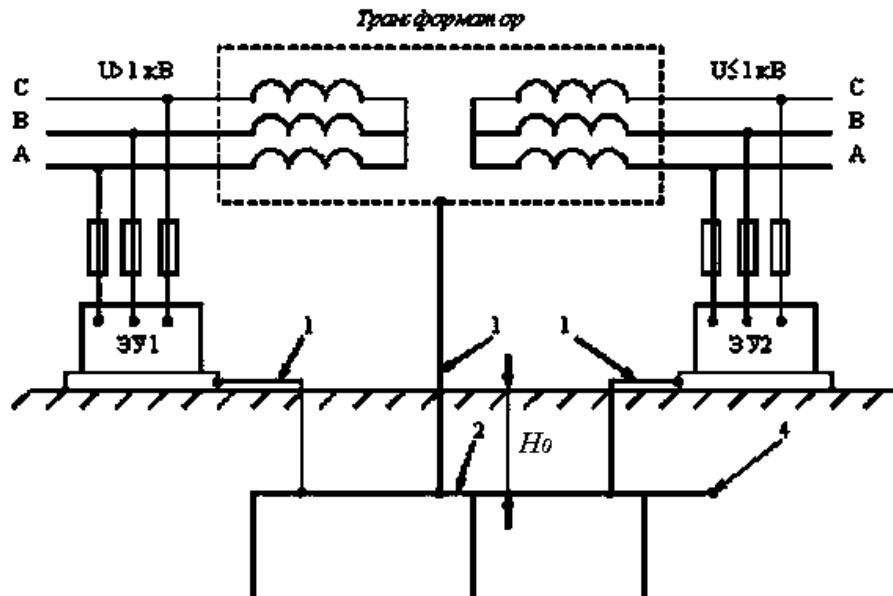


Рисунок 24 – Схема использования совмещенного ЗУ в системе защитного ЭУ

Конструктивные решения:

- присоединение корпусов электромашин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т.п., металлических корпусов передвижных и переносных ЭУ и ЗУ при помощи заземляющего проводника сечением не менее 10 мм².

- расположение ЗУ, как правило, в непосредственной близости от ЭУ. Оно должно быть из естественных и искусственных заземлителей. При этом в качестве естественных заземлителей следует использовать проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов и смесей), обсадные трубы скважин, металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей, и другие элементы. Для искусственных заземлителей следует применять только стальные заземлители.

7.3.2 Меры по уменьшению опасности травмирования от движущихся частей станка

В таблице 21 приведен перечень корректирующих мероприятий.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74

Таблица 21 – Перечень корректирующих мероприятий

Опасности	Мероприятия по снижению уровней профессиональных рисков
Механические опасности	
Опасность падения из-за потери равновесия, в том числе при спотыкании	Механизация работ при складировании и транспортировании сырья и материалов. Нанесение на производственное оборудование, органы управления и контроля, элементы конструкций, коммуникаций и на другие объекты сигнальных цветов и знаков безопасности. Применение нескользящих поверхностей пола
Опасность травмирования, в том числе падающими или выбрасываемыми предметами, движущимися частями оборудования	Ограждение элементов производственного оборудования от воздействия движущихся частей, а также разлетающихся предметов, включая наличие фиксаторов, блокировок, герметизирующих и других элементов. Применение средств индивидуальной защиты.
Опасность разрезания, отрезания от воздействия острых кромок при контакте с незащищенными участками тела	
Опасность падения груза	

7.3.3 Меры защиты от шумов и вибрации

Для снижения уровня производственного шума цеха в помещениях малой высоты (до 6 м) потолок и верхнюю часть стен облицовывают звукопоглощающими материалами. При высоте помещений 6–9 м устраивают подвесные «звукопоглощающие потолки» (звукопоглощающие материалы монтируют с зазором от потолочных конструкций 2–3 м). В помещениях, имеющих вытянутую, форму в плане, используются подвесные кулисные звукопоглотители. Их выполняют в виде перфорированного параллелепипеда, заполненного звукопоглощающим материалом. Такие конструкции не только поглощают звук, но и препятствуют его распространению по цеху.

Часто причиной вибраций является неуравновешенность режущего инструмента. Это может привести к выкрашиванию зубьев и даже к их поломке. Поэтому при установке фрез необходимо контролировать их колебания в плоскости, перпендикулярной оси вращения (радиальные биения), что осуществляют с помощью индикатора, который располагают на стойке, закрепленной на столе станка. Нужно иметь в виду, что причиной указанных биений может быть затупление или неправильная заточка фрезы, неправильная установка фрезы или оправки, наличие дефектов на посадочных поверхностях. Для снижения вибраций на рабочих местах фрезерных станков используют фрезы с неравномерным окружным шагом зубьев, а также обеспечивают оптимальные их геометрические размеры для данного режима обработки. Возможна установка виброгасителей.

Соблюдение правил техники безопасности во многом способствует улучшению пожарной безопасности на производстве. Кроме того, существуют специальные противопожарные правила, которые следует выполнять каждому работающему на производстве.

Пожары происходят в результате неосторожного обращения с огнем, небрежности рабочего и по другим причинам. Огнеопасные материалы (бензин, керосин, растворители, масляные тряпки, обтирочные материалы и др.) необходимо хранить в специально отведенных для этого местах. Курить у станка и бросать окурки на пол воспрещается. По окончании работы или при перерывах в работе надо обязательно выключить все электродвигатели станка и местное освещение. Станочник не должен сам исправлять повреждения в электрооборудовании и электропроводке станка. При любых неисправностях электрооборудования (перегреве или остановке электродвигателя, перегорании предохранителей и др.) ему следует немедленно вызывать электротехника, доложить непосредственному руководителю.

Причины пожаров электрического характера:

- пробой электроизоляции;
- токи короткого замыкания и перегрузок;
- плохие контакты в местах соединения проводов;
- электрическая дуга, возникающая между контактами коммутационных аппаратов.

Для защиты проводников от перегрузок и токов короткого замыкания применяются плавкие вставки, автоматы отключения, контакторы. Для уменьшения вероятности возгорания электроизоляции следует применять электроизоляционные материалы с более высоким классом нагревостойкости.

В случае возникновения пожара надо выключить все электродвигатели и по ближайшему телефону или специальным сигналом вызвать пожарную команду. До ее прибытия следует тушить пожар собственными силами, применяя огнетушители, песок, брезент и другие средства.

Горящие бензин, керосин, нефть, смазочные масла следует тушить пенными огнетушителями. Нельзя разбивать и открывать окна при пожаре. Это способствует воздухообмену в помещении, а, следовательно, и горению. Для проведения мероприятий по охране от пожаров промышленных предприятий организуются добровольные пожарные дружины из числа рабочих, инженерно-технических работников и служащих.

На добровольную пожарную дружину возлагается:

- осуществление контроля за выполнением и соблюдением в цехе противопожарного режима;
- надзор за исправным состоянием первичных средств пожаротушения;
- вызов пожарных команд в случае возникновения пожара и принятие немедленных мер к тушению пожара имеющимися в цехе средствами.

На каждом предприятии инженерно-техническим персоналом должны быть разработаны цеховые (объектовые) противопожарные инструкции. В инструкции

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

предусматриваются общие меры пожарной безопасности, противопожарный режим, специальные мероприятия в зависимости от технического процесса, способы вызова пожарной охраны и т. д.

На промышленных предприятиях должна проводиться повседневная пожарно-профилактическая работа.

Она заключается в проведении комплекса мероприятий, обеспечивающих пожарную безопасность предприятия:

- устранение причин, могущих вызвать возникновение пожара;
- осуществление мероприятий, ограничивающих распространение пожара в случае его возникновения;
- создание условий для успешной эвакуации людей и имущества при пожаре;
- проведение мероприятий, обеспечивающих успешную ликвидацию пожара местными силами и средствами в первоначальный момент его возникновения.

Непосредственная ответственность за состояние пожарной безопасности и соблюдение правил противопожарного режима на отдельных объектах (цех, участок, склад и т. д.) возлагается на начальников объектов.

Помещения металлообрабатывающих цехов должны быть обеспечены средствами пожаротушения в соответствии с Примерными нормами первичных средств пожаротушения на действующих промышленных предприятиях и складах. Простейшие средства пожаротушения – огнетушители, ящики с песком и лопатами – всегда должны располагаться в определенных местах и быть готовы к использованию.

Для тушения очага возгорания в цехах металлообработки чаще всего применяют ручные воздушно-пенные огнетушители ОВП-3 или ОВП-5. На крупных предприятиях используют передвижные установки с огнетушителями типа ОВП-100 и стационарные воздушно-пенные огнетушители. На небольших площадях загорания (до 1м²) используют химические пенные огнетушители (например, ОХП-10).

Углекислотные огнетушители дают возможность ликвидировать источник загорания на установках, находящихся под напряжением. Чаще всего используют огнетушители ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8. Углекислотные огнетушители генерируют углекислоту в виде пены, жидкости и газа с низкой температурой. Обволакивая источник загорания, она способствует снижению его температуры и ликвидации очага возгорания.

Для подачи в очаг загорания порошковых составов используют огнетушитель типа ОПС-10. Он состоит из корпуса с огнегасящим порошком. Снаружи корпуса в верхней его части смонтирован баллон с азотом под давлением. Для приведения устройств в действие открывают вентиль и струя порошка направляется в очаг загорания.

Горящие металлы (раскаленную проводку при коротком замыкании) тушат песком, смазочные масла – пеной или распыленной водой, бензин или керосин – пеной. При загорании магния и его сплавов также должны применяться песок и порошковые составы. Использовать углекислоту для тушения магния нельзя, так

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

как в ее атмосфере он горит. Тушить песком или порошковыми составами следует титан и цинк. Воду для тушения титана и цинка применять нельзя.

Во время пожара необходимо соблюдать спокойствие и выполнять распоряжения администрации и работников пожарной охраны.

7.5 Процесс механической обработки металлов как источник загрязнения окружающей среды

Современное машиностроение развивается на базе крупных производственных объединений, включающих заготовительные цехи, цехи термической обработки металлов, цехи покрытий и крупное литейное производство. В процессе производства машин и оборудования широко используют механическую обработку металлов. Большинство деталей машин изготавливается путем обработки резанием. Заготовками таких деталей служат прокат, отливки, поковки, штамповки и др. Процесс обработки деталей резанием основан на образовании новых поверхностей путем деформирования и последующего отделения поверхностных слоев материала с образованием стружки. В зависимости от характера выполняемых работ и вида режущего инструмента различают следующие методы обработки металлов резанием: точение, фрезерование, сверление, зенкерование, протягивание и др.

Точение – операция обработки тел вращения, винтовых и спиральных поверхностей резанием при помощи резцов на станках токарной группы. При точении заготовке сообщается вращательное движение, а режущему инструменту – медленное поступательное перемещение в продольном или поперечном направлении. Фрезерование – высокопроизводительный и распространенный процесс обработки материалов резанием, выполняемый на фрезерных станках. Главное (вращательное) движение получает фреза, а движение подачи в продольном направлении – заготовка. Сверление – операция обработки материала резанием для получения отверстия. Режущим инструментом служит сверло, совершающее вращательное движение резания и осевое перемещение подачи. При обработке стали на сверлильном станке образуется стружка, выделений пыли нет, при обработке чугуна выделяющаяся пыль кодируется как оксид железа. Шлифование – процесс чистовой и отделочной обработки деталей машин и инструментов посредством снятия с их поверхности тонкого слоя металла шлифовальными кругами, на поверхности которого расположены абразивные зерна. Характерной особенностью процессов механической обработки является образование отходов в виде твердых частиц (промышленной пыли), а в случае применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) - аэрозолей масла и эмульсола. Источниками образования и выделения загрязняющих атмосферу веществ являются различные металлорежущие и абразивные станки. Интенсивность образования загрязнителей зависит, в частности, от следующих факторов:

- вида обрабатываемого материала;
- режима обработки;
- производительности и мощности оборудования;

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

- геометрических параметров инструмента и обрабатываемых изделий;
- от расхода СОЖ.

При обработке металлов без охлаждения наибольшим пылевыделением сопровождаются процессы абразивной обработки металлов: зачистка, полирование, шлифование и др. Образующаяся при этом пыль на 30–40% по массе представляет материал абразивного круга и на 60–70% - материал обрабатываемого изделия. Интенсивность пылевыделения при этих видах обработки связана, в первую очередь, с величиной абразивного инструмента и некоторых технологических параметров резания. При обработке войлочными и матерчатыми кругами образуется войлочная (шерстяная) или текстильная (хлопковая) пыль с примесью полирующих материалов. В ряде процессов механической обработки металлов и их сплавов применяют СОЖ, которые в зависимости от физико-химических свойств основной фазы подразделяются на водные, масляные и специальные. Применение СОЖ сопровождается образованием тонкодисперсного масляного аэрозоля и продуктов его термического разложения.

В таблице 23 приведено влияние механической обработки металлов на ОС
Таблица 23 – Влияние механической обработки металлов на ОС

Факторы	Основные меры защиты	
Выбросы	Пыли, туманы масел и эмульсий, которые через вентиляционную систему выбрасываются из помещений	Основные меры защиты атмосферы от загрязнений промышленными пылями и туманами предусматривают широкое использование пыле- и туманоулавливающих аппаратов и систем
Сбросы	Пыли, масла и эмульсий, которые могут попасть в канализацию	Очистка сточных вод
Отходы	Отработанные масла, ветошь, загрязненная нефтепродуктами отработанные люминесцентные лампы	Обезвреживание, утилизация

Таким образом, при механической обработке металлов могут выделяться вредные вещества, которые в свою очередь могут повлиять на здоровье человека. Для уменьшения их влияния необходимо провести ряд мероприятий: установка пылеулавливающего оборудования, улучшение системы вентиляции и т.п.

Выводы по разделу семь

В данном разделе работы были проанализированы опасные и вредные производственные факторы при фрезеровании изделий. Выбраны средства и мероприятия для их уменьшения или устранения. Был проведен расчет заземляющего устройства. Также были рассмотрены вопросы защиты окружающей среды при механической обработке деталей.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

Заключение

В ходе выполнения ВКР была изучена и описана конструкция и принцип действия горизонтально-фрезерного станка 6Н82Г. Внешний вид станка показан на чертеже 13.03.02.2020.054.01.00 ГЧ. Были описаны узлы и блоки, входящие в состав станка. Для повышения надёжности и производительности и увеличении срок службы оборудования было принято решение о модернизации привода с бесступенчатым изменением частоты вращения шпинделя.

В третьем разделе были определены статические нагрузки на валу двигателя с использованием паспортных данных станка и кинематической схемы (см. схему 13.03.02.2020.054.02.00 КЗ), на основании которых была подобрана требуемая мощность двигателя. Исходя из требуемой мощности и скорости вращения, был выбран асинхронный двигатель серии АДЧР.

Опираясь на описание станка и тип выбранного двигателя, были сформулированы требования, предъявляемые к приводу подачи станка. После чего был произведен поиск современных приводов с использованием сети Internet. Исходя из результатов поиска, был проведён сравнительный анализ частотно-регулируемых приводов как отечественного, так и зарубежного производства. Анализируя полученные данные, для модернизации главного привода был выбран преобразователь частоты ОВЕН203. Данный выбор объясняется тем, что этот преобразователь соответствует предъявляемым требованиям, обладает относительно простой конструкцией, прост в обслуживании и ремонте.

Для проверки правильности выбора двигателя и привода были рассчитаны статические и динамические характеристики системы. Анализируя вид статических характеристик видно, что привод подачи способен обеспечивать требуемые статические моменты, а также обладает небольшим запасом по перегрузке. Вид статических характеристик и переходных процессов показан на плакате 13.03.02.2020.054.06.00.

Было проведено экономическое обоснование проекта, были рассчитаны затраты на модернизацию станка и ожидаемый экономический эффект от модернизации. По результатам этого расчёта был определён срок окупаемости модернизации, который составил 5,5 лет.

Также в ВКР были рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности, требования охраны труда при работе с фрезерным станком и предложены меры по уменьшению влияния опасных и вредных факторов на человека. Кроме того, были рассмотрены вопросы защиты окружающей среды при механической обработке деталей и пожарная безопасность.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Аврутин, С. В. Фрезерное дело: учебник / С. В. Аврутин. – 5-е изд., переработ. и доп. М.: Профтехиздат, 1963. – 542 с.
- 2 Анфилофьев, Б.А. Электробезопасность: методические указания к выполнению практической работы / Б.А. Анфилофьев, Е.А. Скачкова. – Самара: СамГАПС, 2002. – 18 с.
- 3 Бережной, С.А. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие. / С.А. Бережной, В.В. Романов, Ю.И. Седов. – Тверь: ТГТУ, 1996. – 304с.
- 4 Дементьев, Ю.Н. Электрический привод: учебное пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.
- 5 Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448с.
- 6 Доманов, А.В. Компьютерные технологии в электроприводе: конспект лекций / А.В. Доманов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 112 с.
- 7 Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель / В.П. Дьяконов – М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.
- 8 Лукутин, А.В. Расчет характеристик электрических машин: учебное пособие / А.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 112 с.
- 9 Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.
- 10 Москаленко, В.В. Электрический привод: учебное пособие / В.В. Москаленко. – 2-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 368 с.
- 11 Петухов, С.В. Электропривод: учебное пособие / С.В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303 с.
- 12 Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник. / Г.Г. Соколовский – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 262 с.
- 13 Терёхин, В.В. Моделирование в системе MATLAB: учебное пособие / В.В. Терёхин. – Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004. – 376с.
- 14 Ульянов, Г.В. Эффективность управленческих и экономических решений: учебное пособие (УМО) / Г.В. Ульянов, М.Е. Малинникова, О.В. Чернова. – Ковров : КГТА, 2011. – 136с.
- 15 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
- 16 Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
- 17 Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

18 Заземляющие устройства промышленных электроустановок: Справочник электромонтажника / Р.Н. Карякин, В.И. Солнцев; под ред. А.Д. Смирнова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.

19 Консольно-фрезерные станки 6Н82, 6Н82Г и 6Н82ГБ: руководство по эксплуатации. – М.: ЦИНТИМАШ, 1977. – 76 с.

20 Правила устройства электроустановок (ПУЭ) / Минэнерго СССР. – И.: Энергоатомиздат, 1986. – 362 с.

21 Практикум по безопасности жизнедеятельности / С.А. Бережной, Ю.И. Семенов, Н.С. Любимова и др.; под ред. С.А. Бережного. – Тверь: ТГТУ, 1997. – 140 с.

22 Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учебное пособие / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю.П. Сердобинцев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 192 с.

23 Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.1. – 456 с.

24 Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.

					13.03.02.2020.054.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		84