

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода,
д.т.н., профессор
_____/ М.А. Григорьев /
« ____ » _____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНЯТИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ БАКАЛАВРИАТА
«ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ»
ЮУрГУ–13.03.02.2020.052 ВКР

Руководитель, доцент к.т.н.
_____/ А.В. Качалов /
« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
бакалавр группы П–477
_____/ А.С. Варганов /
« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, доцент
_____/ Т.А. Функ /
« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Варганов А.С. Разработка нагрузочного устройства для снятия характеристик шагового электродвигателя. – Челябинск: ЮУрГУ, П; 2020, 58 с., 26 ил., 11 табл., библиографический список – 9 наим., 1 лист чертежей ф. А3

В выпускном квалификационном проекте спроектировано нагрузочное устройство на основе сервопривода с системой управления. Разработана функциональная схема электропривода, осуществлен выбор электродвигателя, сформирован конструктив электромашинного агрегата исследуемого двигателя и нагрузочного устройства. Далее был произведен выбор элементной базы для системы управления и спроектирована её принципиальная электрическая схема. Также было создано программное обеспечение контроллера системы управления и разработана общая интерфейсная часть модуля.

На заключительном этапе была осуществлено снятие опытных характеристик электропривода в статическом, квазистатическом и динамическом режимах.

					ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Варганов А.С.			Разработка нагрузочного устройства для снятия характеристик шагового электродвигателя	Лит.	Лист	Листов	
Провер.		Качалов А.В.					4		
Реценз						ЮУрГУ Кафедра «АЭП»			
Н. Контр.		Функ Т.А.							
Утверд.		Григорьев М.А.							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО УСТРОЙСТВА	6
1.1 Принцип действия шаговых двигателей	6
1.2 Разновидности шаговых двигателей	7
1.3 Режимы работы.....	10
1.4 Характеристики шаговых двигателей	12
1.4 Цель и задачи работы	15
2 РАЗРАБОТКА НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА	17
2.1 Формулирование требований к нагрузочному устройству	17
2.2 Выбор нагрузочного устройства.....	17
2.3 Разработка функциональной схемы	23
2.4 Разработка конструктива электромашинного агрегата	27
2.5 Разработка схемы электрической принципиальной	30
2.5.1 Выбор управляющего устройства.....	30
2.5.2 Выбор элементов индикации	31
2.5.3 Выбор элементов защиты.....	32
2.5.4 Выбор элементов согласования	33
2.5.2 Выбор транзисторов	34
2.6 Разработка программного обеспечения контроллера системы управления	36
2.7 Разработка конструктива модуля нагрузочного устройства	40
3 СНЯТИЕ ОПЫТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА	42
3.1 Статический режим	42
3.2 Квazистатический режим	44
3.3 Динамический режим	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	50
ПРИЛОЖЕНИЕ А	51

ВВЕДЕНИЕ

Высокоточные и доступные, простые в управлении и эксплуатации, шаговые двигатели получили широкое распространение и применение.

Первые шаговые двигатели появились в 1830-х годах и представляли собой электромагнит, приводящий в движение храповое колесо. За одно включение электромагнита происходило перемещение на величину зубцового шага храпового колеса.

Благодаря развитию микропроцессорной техники в настоящее время шаговые двигатели представляют собой устройства, в которых электромеханическая часть объединена с управляющей электроникой.

Промышленное применение двигателей данного типа чаще всего представлено станками с ЧПУ, космической и военной техникой, а также отраслью роботостроения и автоматизации.

Использование в бытовой сфере связано с производством принтеров, факсов (а также иной офисной периферии), дисководов. В данных системах требуется высокая точность позиционирования, а также наличие драйверов, которые будут осуществлять микропроцессорное управление.

Таким образом, шаговый двигатель – электромеханическое устройство которое способно преобразовывать поступающие импульсные сигналы в фиксированные угловые перемещения ротора без устройств обратной связи.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						5
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

1 ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО УСТРОЙСТВА

1.1 Принцип действия шаговых двигателей

Принцип действия всех существующих ШД основан на дискретном изменении состояния электромагнитного поля в рабочем зазоре электрической машины. Это достигается импульсным возбуждением (или переключением) ее обмоток. Рассмотрим работу ШД на примере трехфазного двигателя.

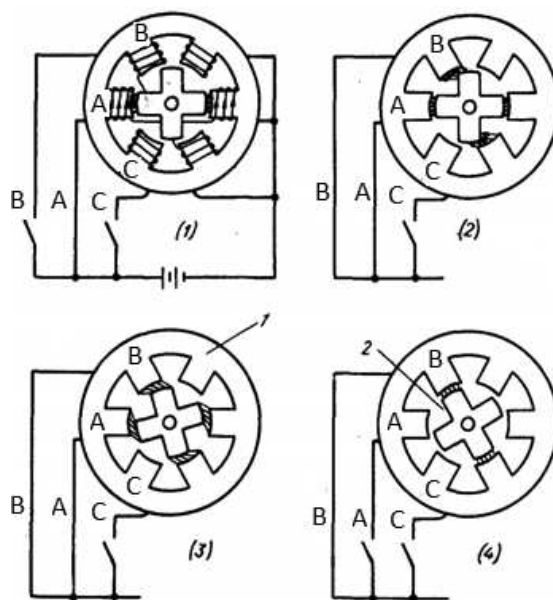


Рисунок 1.1 – Принципы работы ШД:

1 – сердечник статора; 2 – сердечник ротора

На рисунке 1.1 ток на обмотки подается через переключатели. В положении (1) возбуждена фаза А, магнитный поток показан стрелками. Два выступающих зубца фазы А, будучи возбужденными останавливаются на одной прямой с двумя зубцами ротора (положение равновесия). Если после этого замкнуть фазу В, возникнет магнитный поток, как показано в положении (2), то в следствие натяжения в силовых линиях возникнет вращающий момент и ротор займет положение (3). Отсоединив от источника фазу А ротор займет положение (4).

Таким образом угловое перемещение ротора определяется переключением обмоток.

1.2 Разновидности шаговых двигателей

Все шаговые двигатели подразделяются на несколько видов:

1. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением;
2. Двигатели с постоянными магнитами;
3. Гибридные двигатели.

Двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеет отличительную особенность, заключающуюся в том, что статор и ротор такого типа двигателей выполнены из шихтованного магнитомягкого материала или же используются массивные роторы. Рассмотрим случай, когда статор имеет 6 зубцов, а ротор – 4. (рисунок 1.2). Угол поворота составляет 30° .

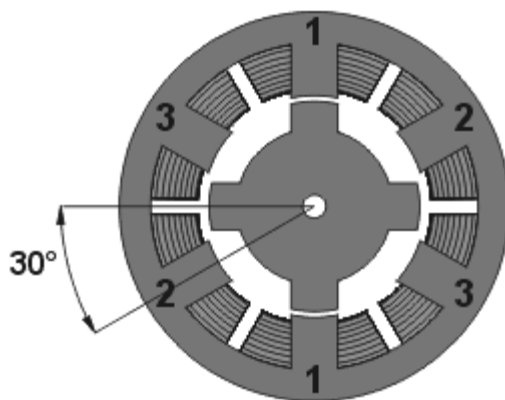


Рисунок 1.2 – Поперечное сечение трехфазного ШД

При подаче питания на обмотку ротор установится так, что зубцы статора и любые два зубца ротора будут находиться на одной линии. В этом случае магнитное сопротивление минимально.

Значит, чтобы обеспечить непрерывное вращение, следует попеременно подавать напряжение на фазы.

Для того чтобы увеличить количество шагов на оборот необходимо изготовить статор двигателя с большим числом полюсов, а ротор с большим числом зубцов. Данный тип двигателей редко используется в промышленности.

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, на зубцах которого намотаны обмотки, и ротора, в качестве которого используется постоянный магнит. Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Подавая напряжение на фазы последовательно, т.е. 1-2-3-4, ротор будет поворачиваться по часовой стрелке, стремясь занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга [1].

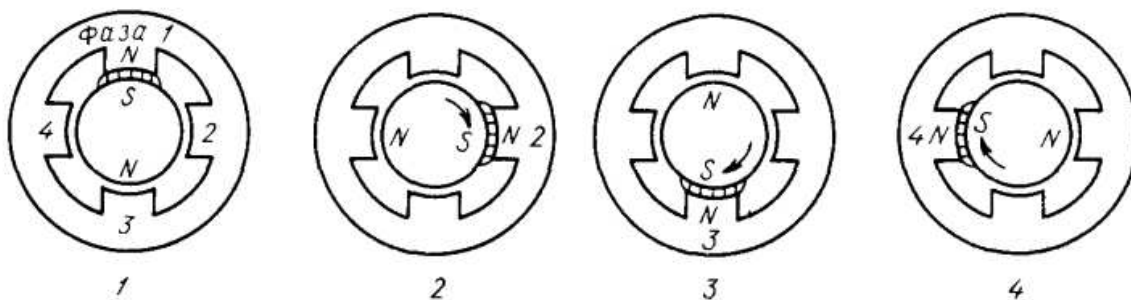


Рисунок 1.3 – Шаги в четырехфазном двигателе с постоянными магнитами

Особенностью данного типа ШД является то, что ротор в конце движения приходит в фиксированное положение даже при снятии питания с обмотки статора.

Нечастое использование данных двигателей обусловлено высокой ценой на постоянные магниты и ограничением максимальной плотности потока значением намагниченности постоянного магнита.

Гибридный двигатель аналогично имеет постоянные магниты в качестве ротора, однако использует принципы как реактивного двигателя, так и двигателя с постоянными магнитами (рисунок 1.4).

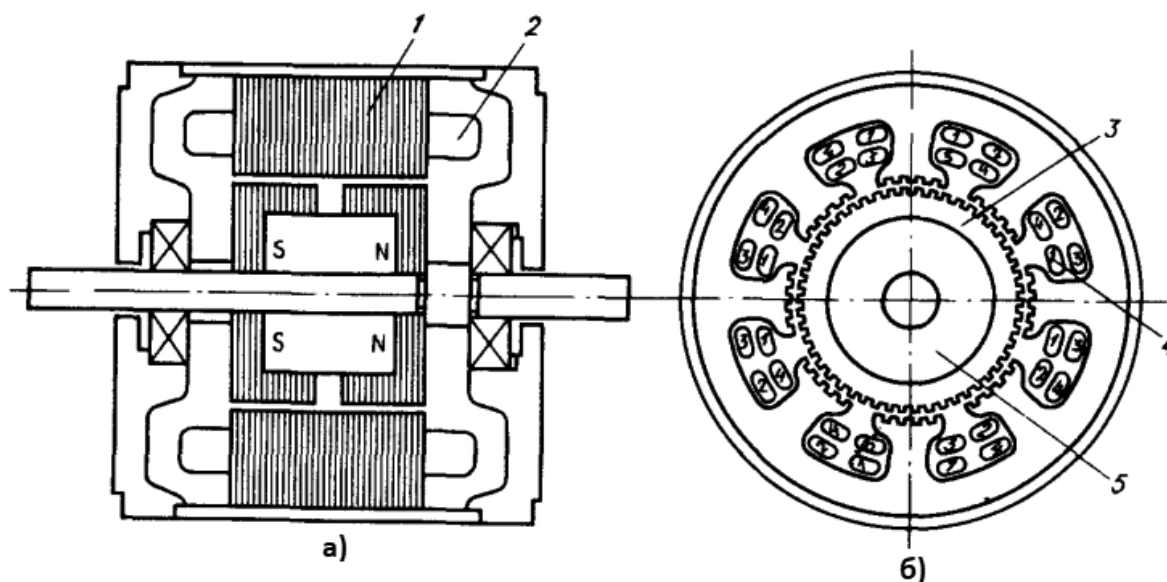


Рисунок 1.4 – Конструкция гибридного ШД:

1 – магнитопровод статора; 2 – обмотки; 3 – магнитопровод ротора;
4 – обмотка; 5 – постоянный магнит

Рассмотрим работу гибридного двигателя на примере машины с двумя парами полюсов статора и тремя парами полюсов ротора (рисунок 1.5).

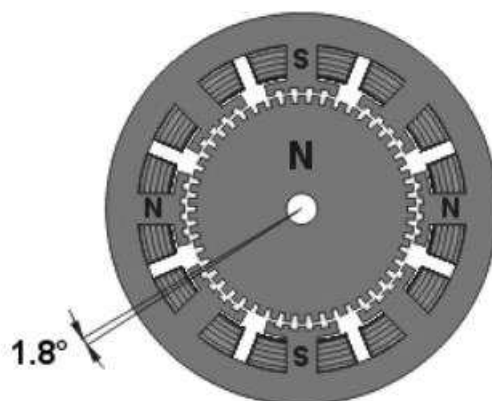


Рисунок 1.5 – Гибридный двигатель

Ротор делится на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки – южными.

Активный момент создается только за счет магнитного поля обмотки как в реактивном ШД, т.к. верхняя и нижняя половинки ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для 3.6 град. двигателей и 8 основных полюсов для 1.8 и 0.9 град. двигателей.

Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними [2].

1.3 Режимы работы

Различают три способа управления шаговыми двигателями:

1. Полношаговый режим
2. Полушаговый режим
3. Микрошаговый режим

Полношаговый режим представляет собой управление одной (в один момент времени включена одна фаза) или двумя фазами (в одно и то же время включены две фазы). Такое управление называется симметричным.

При управлении одной фазой положения равновесия ротора совпадают с естественными положениями равновесия ротора, когда на двигатель не подается питание (рисунок 1.7 а).

В случае управления двумя фазами (рисунок 1.7 б) ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора.

При данном режиме возникающий момент примерно на 40% больше, чем при управлении одной фазой. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на половину шага.

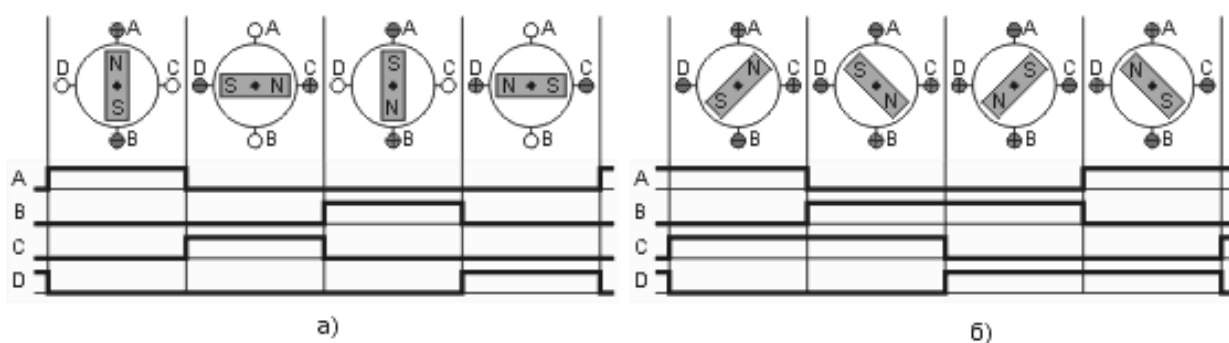


Рисунок 1.7 – Управление ШД в полношаговом режиме:

а) одна фаза; б) две фазы

Полушаговый режим является комбинацией двух предыдущих, т.е. в каждый второй шаг запитана одна фаза, а в иные моменты времени – две. Такое управление называется несимметричным (рисунок 1.8). Шаг двигателя в этом случае равен половине основного шага. Полушаговый режим позволяет уменьшить влияние явления резонанса, а также обеспечивает более высокую разрешающую способность.

Из недостатков данного метода стоит выделить значительное колебание момента при переходе от шага к шагу. При питании одной фазы момент составляет 70% от момента при одновременном включении двух фаз.

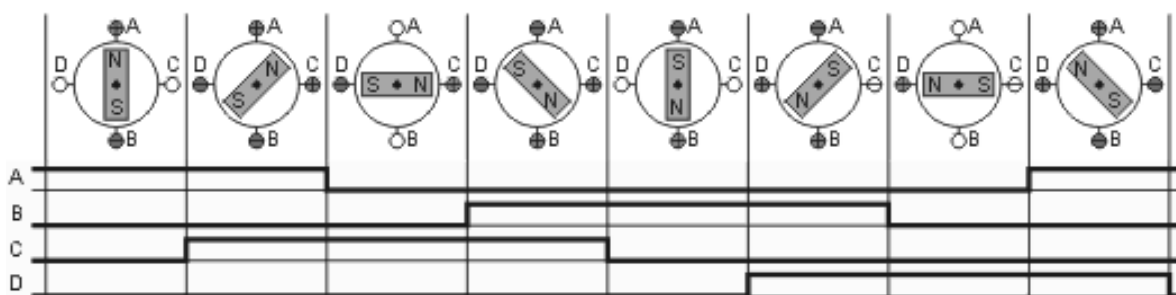


Рисунок 1.8 – Полушаговый режим

При микрошаговом режиме поле статора вращается более плавно, чем в двух предыдущих режимах (ток плавно снижается на одной обмотке и плавно нарастает на другой). Благодаря этому ротор шагового двигателя теоретически можно зафиксировать в любой произвольной позиции, если установить правильное отношение токов в обмотках (фазах). Для деления шага управляющему току придают шагово-волновую форму (рисунок 1.9)

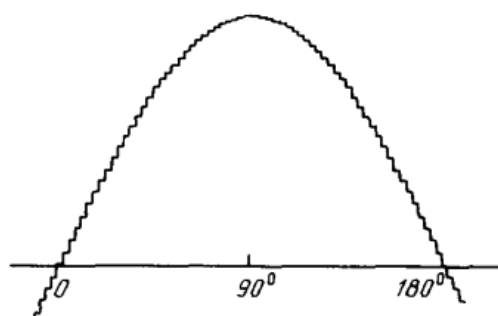


Рисунок 1.9 – Зависимость тока от угла при движении с малым шагом

В результате данному режиму свойственны гораздо меньшие вибрации, а также практически бесшумная работа и значительное увеличение точности позиционирования.

1.4 Характеристики шаговых двигателей

1. Статические
2. Динамические
3. Квазистатические

Статическая характеристика – характеристика, относящаяся к заторможенному двигателю.

Рассмотрим статическую моментную характеристику $T-\theta$.

Шаговый двигатель фиксируют неподвижно в положении равновесия при возбуждающем токе, поданном по определенной схеме возбуждения.

Если теперь к ротору приложить внешний момент, он вызовет угловое смещение (рисунок 1.10 а).

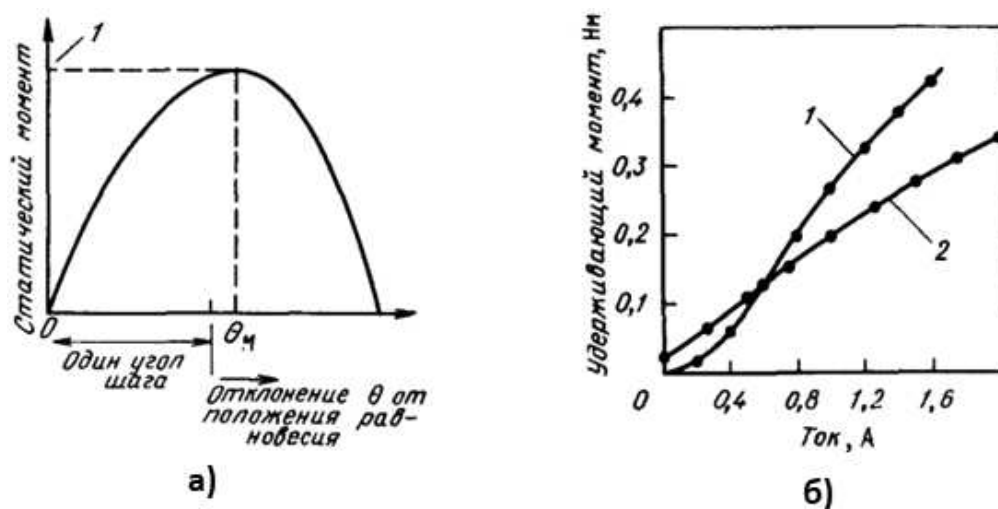


Рисунок 1.10 – Статические характеристики ШД:

а) Т- θ характеристика: 1 – удерживающий момент

б) Т- I – характеристика: 1 – реактивный ШД; 2 – гибридный ШД
(угол шага = 1.8°)

Максимальный статический момент называется удерживающим моментом, он соответствует $\theta = \theta_M$. Если же угловое смещение больше, чем максимальное, то статический момент действует в направлении следующего положения равновесия. Иными словами, удерживающий момент – наибольший момент, при котором еще не будет наблюдаться движения.

Второй рассмотренной характеристикой является Т- I -характеристика (момент – ток). Она показывает, что удерживающий момент возрастает с ростом тока.

Динамическими характеристиками называются характеристики двигателя во время движения, либо в его начале.

По мере увеличения частоты импульсов, подаваемых на двигатель, пропорционально этой частоте растет скорость. При некоторой частоте двигатель выпадает из синхронизма.

На рисунке 1.11 изображена выходная характеристика, которая представляет собой взаимосвязь момента сопротивления нагрузки и максимально возможной частоты поступающих импульсов, при которой машина еще находится в синхронизме. Вид выходной характеристики обусловлен схемой и способом управления.

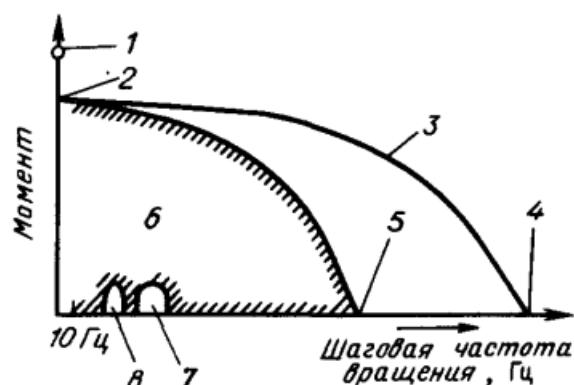


Рисунок 1.11 – Динамическая характеристика ШД:

1 – удерживающий момент; 2 – максимальный пусковой момент; 3 — выходной момент; 4 — максимальная частота вращения; 5 – максимальная пусковая частота; 6 – область запуска; 7 – область неустойчивости; 8 – область неподвижности ротора

Максимальная частота, при которой шаговый двигатель без нагрузки может осуществлять запуск и остановку без пропуска шагов называется частотой приемистости.

Максимальная частота вращения, при которой шаговый двигатель без нагрузки может двигаться без пропуска шагов называется максимальной выходной частотой.

Максимальный пусковой момент определяется как максимальный момент сопротивления, с которым двигатель может запускаться и сохранять синхронность при наборе импульсов с частотой до 10 Гц.

Квазистатическая характеристика – характеристика, полученная в режиме отработки единичных шагов, при котором переходные процессы, запущенные в двигателе предыдущим тактом коммутации полностью затухают [4].

При единичном шаге ротор двигателя набирает скорость и наращивает кинетическую энергию. Достигнув желаемого положения устойчивого равновесия, он продолжает перемещаться против сил поля. Начинается процесс свободных колебаний (качаний), обусловленный электромагнитной и механической постоянными времени двигателя, как и у всех синхронных машин. Колебания затухают, когда вся кинетическая энергия израсходована на электрические, магнитные и механические потери, вызванные этим процессом. В итоге ротор двигателя успевает зафиксировать своё положение и снизить скорость до нуля до начала следующего такта коммутации.

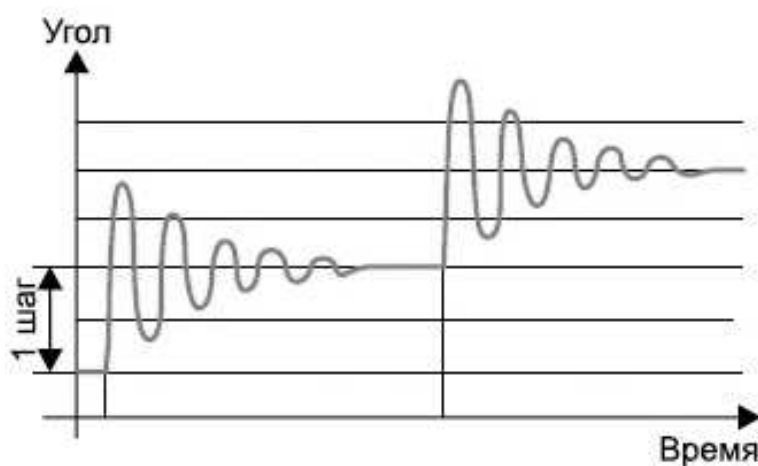


Рисунок 1.12 – Квазистатическая характеристика ШД

1.4 Цель и задачи работы

Цель данной дипломной работы заключается в разработке модуля нагрузочного устройства, предназначенного для исследования шагового двигателя, и позволяющего снимать его основные статические, квазистатические и динамические характеристики.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Формулирование требований к нагрузочному устройству;
2. Выбор нагрузочного устройства;
3. Разработка функциональной схемы электропривода;
4. Разработка конструктива электромашинного агрегата;
5. Разработка схемы электрической принципиальной;
6. Разработка программного обеспечения (ПО) контроллера системы управления;
7. Разработка конструктива модуля нагрузочного устройства;
8. Снятие опытных характеристик электропривода в статическом, квазистатическом и динамическом режимах.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						16
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

2 РАЗРАБОТКА НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА

2.1 Формулирование требований к нагрузочному устройству

Для исследования вышеприведенных характеристик были сформулированы следующие требования к проектируемому объекту:

- Возможность плавного задания момента нагрузки во всем диапазоне работы шагового двигателя при доступных скоростях, включая нулевую.
- Малый момент инерции нагрузочного механизма.
- Возможность задания углового положения ротора на величину как минимум на порядок меньшую одного шага исследуемого двигателя.
- Для наблюдения качественных квазистатических характеристик необходимо иметь датчик положения ротора с разрешающей способностью значительно превосходящей величину шага двигателя.
- Отсутствие люфтов в нагрузочной машине и местах её соединения с исследуемым двигателем. В ином случае все вышеприведенные требования становятся нерелевантными.
- Наличие встроенного осциллографа для визуализации желаемых характеристик.
- Соответствие мощности и массогабаритных показателей проектируемого устройства аналогичным параметрам исследуемого двигателя, а также учебно-методическим целям и экономическим рамкам проекта.

2.2 Выбор нагрузочного устройства

Для выбора нагрузочного устройства необходим сравнительный обзор общепромышленных агрегатов и механизмов, представленных на рынке.

В рамках данной работы я не имею возможности сделать полноценный анализ всех устройств способных выступать в качестве нагрузочного устройства, поэтому в таблице 2.1. приведен обзор лишь наиболее часто используемых агрегатов, которые были изучены мной в рамках обучения.

Таблица 2.1 – Сравнение нагрузочных машин

Тип	Плюсы	Минусы
Двигатель постоянного тока	Механическая и прочие характеристики двигателя отлично подходят под требования проекта.	Двигатели высокой точности в следствии конструктивных особенностей изготавливаются только мощными и габаритными, имеют значительный момент инерции.
Асинхронный двигатель	Недорогой, массовый и имеющий механические характеристики частично удовлетворяющие требованиям проекта.	Плавное задание момента в статическом режиме невозможно. Промышленные образцы слишком мощные и габаритные для стенда.
Синхронный двигатель	Механическая и прочие характеристики двигателя идеально соответствует нашим требованиям.	Серийные промышленные образцы выпускаются начиная с мощности 5 кВт и более.
Электромагнитный тормоз	Наиболее простой и дешевый.	Может работать исключительно в режиме торможения
Шаговый двигатель	Прост в управлении, хорошо работает в позиционном режиме.	Момент имеет пульсирующий характер. Сложность более точного задания углового положения чем в исследуемом двигателе. Явно выраженная полусность наложит свой отпечаток на характеристики шагового двигателя.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что применение общепромышленных двигателей и устройств не обеспечит выполнение поставленных требований.

В таком случае необходимо применение специальных машин. Среди представленных на рынке устройств наиболее подходящим вариантом оказались сервоприводы.

В наиболее общем случае, сервоприводом называется любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т. п.) и блок управления, автоматически поддерживающий необходимые параметры на устройстве, согласно заданному внешнему значению (положению ручки управления или численному значению от других систем).

В рамках данной работы необходим электрический сервопривод, представляющий собой систему, состоящую из электродвигателя (чаще всего синхронного или асинхронного) со встроенным датчиком положения для точного позиционирования, и преобразователя частоты (именуемого в документации сервопреобразователем или платой-контроллером), как это представлено на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Состав простейшего сервопривода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

19

Устройства данного типа покрывают основные требования к проектируемому нагрузочному устройству, являясь компактными малоинерционными, но в то же время мощными и высокоточными приводами, способными поддерживать необходимый момент, скорость или угловое положение. Кроме этого, большинство промышленных сервоприводов поставляется с программным обеспечением и встроенным осциллографом для повышения эффективности настройки и диагностики. Единственным же минусом, в рамках данной работы, является высокая стоимость качественных образцов.

Последний минус был нивелирован наличием торгово-партнерских отношений компании ООО НПП «Учтех-ПРОФИ», с компанией «Delta Electronics, Inc». В рамках данных отношений, возможно осуществление поставок серводвигателей на основе синхронных машин серии ЕСМА различных мощностей и сервопреобразователей серии ASD для управления ими, по сниженной цене.

Выбор конкретной модели будем осуществлять исходя из характеристик исследуемого шагового двигателя, в качестве которого была выбрана электрическая машина с характеристиками, представленными в таблице 2.2.

Главными критериями выбора для нас являются крутящий момент (он должен быть большим чем крутящий момент ШД с полутора-двукратным запасом) и максимальное дробление углового шага (хотя бы на порядок большее, чем в ШД).

Таблица 2.2. – Основные характеристики двигателя FL57STH56-1006 A

Наименован.	Тип	Крутящий момент	Момент инерции ротора	Основной угловой шаг	Дробление углового шага до
FL57STH56-1006A	Гибрид.	0,8826 Нм	$3 \cdot 10^{-5}$ кг*м ²	1,8°	0,009°

Из представленного компанией «Delta Electronics, Inc» модельного ряда наиболее близкими к требуемым характеристикам обладают следующие устройства:

В качестве двигателя – Электродвигатель ЕСМА-С10604ES с характеристиками, приведенными в таблице 2.3. изображен на рисунке 2.2 [5].



Рисунок 2.2 – ЕСМА – С10604ES

Таблица 2.3 – Характеристики ЕСМА – С110604ES

Характеристика	Значение
Номинальная мощность (кВт)	0.40
Номинальный момент (Н*м)	1,27
Максимальный момент (Н*м)	3,82
Ном. Скорость (об/мин)	3000
Макс. Скорость (об/мин)	5000
Номинальный ток (А)	2,6
Максимальный ток (А)	7,8
Момент инерции ротора (*10 ⁻⁴ кг*см ²)	0,277
Мех. Постоянная времени (мс)	0,53

В качестве управляющего преобразователя для выбранного двигателя производитель рекомендует сервопреобразователь ASD-A2-0421-F. Данное устройство дает возможность исследовать все необходимые в данной работе характеристики. Сервопреобразователь с характеристиками, приведенными в таблице 2.4. изображен на рисунке 2.3.

Таблица 2.4 – Характеристики ASD-A2-0421-F

Характеристика	Значение
Напряжение	Трех/одно фазное 220 V AC
Допустимое отклонение U	-15% +10%
Разрешение энкодера	20 бит (1 280 000 имп./об.)
Метод управления	ШИМ простр. векторов
Режимы работы	Управление положением Управление скоростью Управление моментом
Интерфейсы	RS-232/RS-485/CAN-open/USB
Защита	От сверхтока, перенапряжения, перегрева двигателя, короткого замыкания.
Дискретные входы	8
Дискретные выходы	5
Дифференциальные выходы энкодера	3



Рисунок 2.3 – ASD-A2-0421-F

2.3 Разработка функциональной схемы

Исходя из изложенных требований, разрабатываемую функциональную схему можно разложить на несколько частей:

- Блок ручного управления двигателем
- Блок связи с персональным компьютером для программного управления и наблюдения параметров
- Блок индикации
- Блок питания
- Блок электромашинного агрегата

Серво и шаговый двигатели, соединённые механической связью, образуют электромашинный агрегат, полное описание разработки которого приведено в следующем пункте данной главы. Система управления будет получать обратную связь с энкодера посредством разъема CN2 сервопреобразователя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

23

Питание нагрузочного модуля будет осуществлено путем подключения к цепям питания всего учебного стенда, разработку которых осуществляет другой участник совместного проекта.

Блок индикации должен отображать актуальную информацию о текущем угле поворота двигателя и развиваемом им моменте посредством двух четырехразрядных семисегментных индикаторов.

Связь с персональным компьютером будет реализована с помощью интерфейса USB, имеющегося на сервопреобразователе. В программном обеспечении, идущем в комплекте с сервоприводом представлена высокоуровневая среда настройки и мониторинга текущих параметров системы.

Блок ручного управления с помощью тумблеров, кнопок и панели управления преобразователя должен обеспечить следующие возможности:

- общее разрешение работы системы управления с помощью тумблера «Разрешение»;
- сброс системы управления в случае возникновения ошибки нажатием кнопки «Сброс»;
- выбор режима тумблером «Момент\Положение»;
- задание величины поддерживаемого момента с помощью потенциометра «Задание момента»;
- возможность выбора вида сигнала (последовательность импульсов или одиночный импульс) в режиме поддержания положения.

Для ясности понимания следует уточнить несколько моментов, а именно:

- моментный режим необходим для снятия статических характеристик, он полностью обеспечивается возможностями сервопреобразователя, необходимо лишь осуществить выбор данного режима либо с панели управления ASD, либо внешним сигналом управления (обе возможности реализованы);

- режим поддержания положения необходим для снятия динамических и квазистатических характеристик, но для этого сервопреобразователь должен получить соответствующие импульсные сигналы задания положения. Для формирования этих сигналов будет разработана микропроцессорная система управления на основе микроконтроллера, которая будет связываться с остальной частью системы посредством разъема CN1.

Разработанная функциональная схема представлена на рисунке 2.4.

					ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

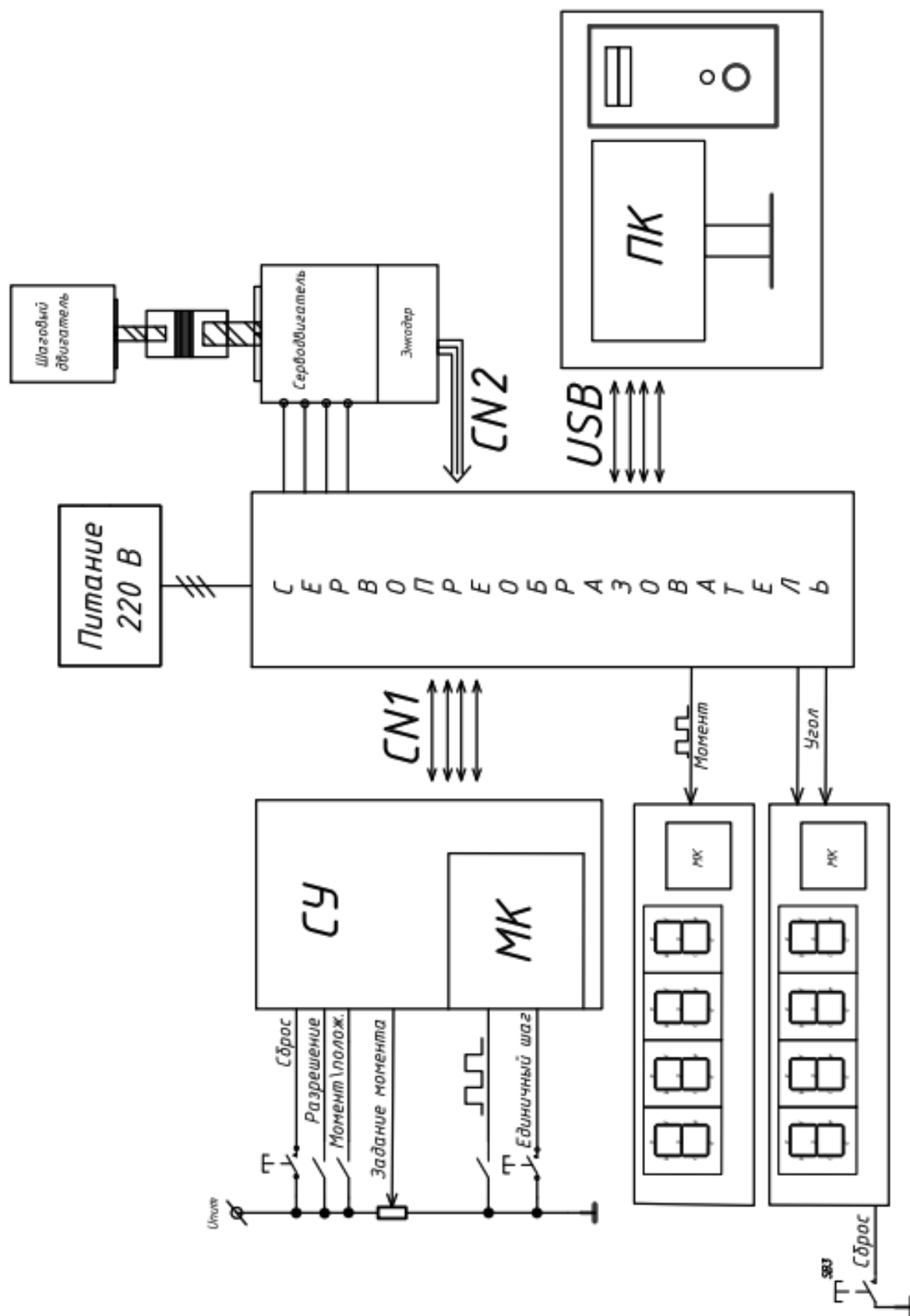


Рисунок 2.4 – Функциональная схема разрабатываемой установки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

26

2.4 Разработка конструктива электромашинного агрегата

Для разработки конструктива электромашинного агрегата, помимо двигателей, требуется выбрать способ соединения вращающихся валов.

Требования к искомому соединению, по сути, вытекают из требований к разрабатываемому нагрузочному устройству, а именно, полное отсутствие люфтов и колебаний при снятии характеристик, устранение всех возможных несоосностей и неточностей монтажа, малая инерционность. Также надо понимать, что валы стыкуемых двигателей имеют различный диаметр.

Таблица 2.5 – Сравнение различных способов соединения валов

Способ соединения	Плюсы	Минусы
Ремённая передача	Плавность хода, устранение несоосностей, дешевизна и простота	В случае беззубчатого ремня неизбежно проскальзывание ремня по шкивам, а значит невозможно высокоточное снятие характеристик. В случае зубчатого – возможные пульсации от зубьев.
Цепная передача	Отсутствие скольжения, высокая надежность, устранение несоосностей	Инерционность, нестабильность движения цепи на малых скоростях.
Зубчатая передача	Надежность, стабильность работы на всем диапазоне скоростей, небольшая инерционность	Плохие амортизирующие свойства, обусловленные высокой жесткостью. Повышенные требования к точности установки.

Продолжение таблицы 2.5

Сварка	Надежность, прочность, простота конструкции, отсутствие колебаний и износа.	Высокая технологическая сложность правильной сварки валов, без нарушений соосности.
Муфтовое соединение	Из за обилия видов муфт есть возможность подобрать экземпляр удовлетворяющий требованиям	Зависят от видов муфт, но чаще всего это цена.

Так как современный рынок муфтовых соединений насчитывает десятки различных видов, то в рамках данной работы рассмотреть все не представляется возможным.

Следуя логике выбора наиболее простого оборудования, среди прочих видов наиболее подходящие муфты – механические, а среди механических – компенсирующие, так как они обеспечивают необходимую компенсацию несоосностей и прочих люфтов механизма, среди же компенсирующих выбор был сделан в пользу металлических сильфонных минимуфт. Впрочем, использование аналогичных способов соединения не возбраняется.

Итак, сделанный выбор – металлическая безззорная сильфонная минимуфта производства компании «R+W» модели МК1/20/31/6.35/14 изображенная на рисунке 2.5. Характеристики приведены в таблице 2.6 [6].



Рисунок 2.5 – МК1/20/31/6.35/14

Таблица 2.6 – Характеристики МК1

Характеристика	Значение
Номинальный крутящий момент до (Нм)	2
Общая длина (мм)	31
Наружный диаметр (мм)	25
Длина посадки втулки (мм)	11
Диаметр отверстий (мм)	6.35 и 14
Момент инерции (г*см ²)	18

Двигатели будут подвешены на стальных уголках с помощью болтов. Уголки, в свою очередь, также с помощью болтов будут закреплены на стальном пьедестале прямоугольной формы с резиновыми ножками для демпфирования колебаний. Указанные элементы спроектированы в программе AutoCad по чертежам выбранных двигателей и переданы инженерам «УчтехПрофи», которые изготовили данные детали.

Итогом данного этапа работы стала схема электромашинного агрегата, представленная на рисунке 2.6.

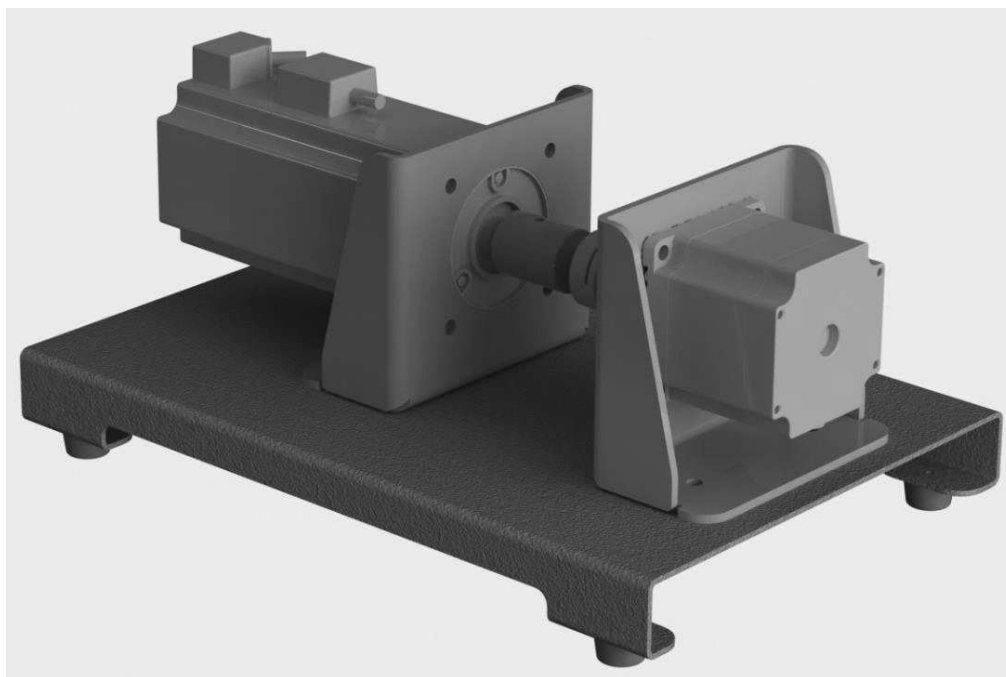


Рисунок 2.6 – Электромашинный агрегат

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

29

2.5 Разработка схемы электрической принципиальной

Далее приведен выбор активных элементов, необходимых для формирования электрической схемы. Выбор пассивных составляющих, указанных в перечне элементов, опущен в целях сохранения краткости изложения.

2.5.1 Выбор управляющего устройства

Исходя из составленной ранее функциональной схемы, от микроконтроллера требуется 2 вывода, работающих на вход, и 2 вывода, работающих на выход. При этом оба выходных вывода должны иметь возможность работы в альтернативном режиме (ШИМ). Следовательно, всего необходимо 4 цифровых входа/выхода общего назначения. Этим условиям удовлетворяет множество контроллеров фирмы Atmel. Выбор сделан в сторону микроконтроллера ATmega8535, так как на предприятии «УчтехПрофи» используется именно эта модель и имеется производственный запас данных компонентов. Сравнение требуемых характеристик и характеристик выбранного управляющего устройства приведено в таблице 2.7 [7].

Таблица 2.7 – Характеристики управляющего устройства

Параметр	Характеристики	
	Требуется контроллер	Выбран ATmega8535-16PU
Напряжение электропитания, В	5	4,5...5,5
Частота кварцевого генератора, МГц	8	0...16
Аналоговые входы	-	8
Выводы ШИМ	2	4

Продолжение таблицы 2.7

Универсальный приемопередатчик UART	-	2 (RxD, TxD)
Двухпроводный интерфейс TWI	-	2 (SCL, SDA)
Последовательный периферийный интерфейс SPI (программирование)	-	4 (SS, MISO, MOSI, SCK)
Цифровые входы/выходы общего назначения:		
входы:	2	
выходы:	2	
всего:	4	32

Выберем кварцевый резонатор типа НС-49/У с частотой 8 МГц и керамические нагрузочные конденсаторы типа емкостью 15 пФ, с максимальным рабочим напряжением 25 В.

2.5.2 Выбор элементов индикации

Для комфортного выполнения лабораторных работ в ручном режиме необходимо осуществить вывод на индикаторы информации о текущем угле поворота ротора и моменте, развиваемом двигателем.

Согласно технической документации сервопривода, индикацию момента можно осуществить подключением к аналоговому выходу MON1 сервопреобразователя вольтметра. В качестве вольтметра в данном проекте выступает стандартный индикатор, разработанный фирмой «УчтехПрофи» МК-1-5-18-БЕИ, параметры которого приведены в таблице 2.8. Данный индикатор является универсальным устройством, позволяющим создавать на его базе индикаторы аналоговых и цифровых сигналов.

Таблица 2.8 – Параметры МК-1-5-18-БЕИ

Параметр	Значение
Напряжение электропитания	4,5 – 5,5 В
Максимальная потребляемая мощность	2 Вт
Диапазон измеряемого напряжения	0...300 В
Диапазон измеряемого тока	0...5 А
Наличие гальванической развязки	1,5 кВ
Цифровой интерфейс для связи с внешними устройствами	UART
Интерфейс для программирования	SPI
Универсальные цифровые входы/выходы (TTL)	4 шт.
Количество разрядов индикатора	4

Для реализации индикации угла поворота ротора на данном устройстве используются универсальные цифровые входы, на которые подаются импульсы энкодера сервопривода. Программное обеспечение для подсчета импульсов индикатором уже разработано инженерами «УчтехПрофи».

2.5.3 Выбор элементов защиты

В технической документации к выбранному сервопреобразователю имеется строгая рекомендация по выбору защиты на базе автоматического выключателя. Для модели ASD-A2-0421 необходим стандартный автоматический выключатель на 4 А.

Согласно вышеприведенному условию выбираем двухполюсный автоматический выключатель фирмы Schneider Electric модели iC60N C. Его технические характеристики приведены в таблице 2.9 [8].

Таблица 2.9 – Характеристики автоматического выключателя

Параметр	Значение
Тип	iC60N C
Номинальное рабочее напряжение, В	220...240
Номинальный ток, А	4
Номинальная предельная отключающая способность, кА	6
Характеристика расцепления	C
Количество циклов отключения	10000

2.5.4 Выбор элементов согласования

Ввиду того, что выходные каналы энкодера сервопреобразователя выполнены в виде дифференциальных выходов, то для приема сигналов преобразователя между энкодером и индикатором необходимо установить дифференциальный усилитель или оптопару. В данном проекте остановимся на выборе оптопары, так как в этом случае обеспечивается дополнительная гальваническая развязка.

При выборе оптопар предъявляются следующие требования:

- Напряжение изоляции должно находиться в диапазоне 1,5...8 кВ;
- максимальное значение тока, который можно пропускать через светодиод оптопары для того, чтобы она включилась (максимальный прямой ток) должно быть не более 50 мА, в противном случае это приведет к усложнению электрической схемы;
- быстродействие, достаточное для пропуска импульсного сигнала необходимой частоты.

На основании вышеизложенных требований были выбраны оптопары H11L1 фирмы Motorola, параметры которых представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Параметры оптопары H11L1

Параметры	Оптопара H11L1
Количество каналов	1
Максимальный входной ток, мА	60
Тип выхода	Триггер Шмитта
Максимальный выходной ток, мА	50
Время вкл/выкл, мкс	1,2
Макс. напряжение изоляции, В	7500
Корпус	PDIP6
Напряжение электропитания, В	+3...+16

2.5.2 Выбор транзисторов

Для подключения импульсных сигналов ко входам сервопреобразователя в режиме поддержания угла поворота ротора необходим вывод с микроконтроллера типа «открытый коллектор» (этого требует схемотехника преобразователя). Для этого выберем биполярный транзистор типа «n-p-n» следующим образом:

- Рассчитаем допустимое напряжение коллектора выбираемого транзистора:

$$U_{КЭ}^{MAX} = K_3 U_{КОМ}, \quad (2.1)$$

$$U_{КЭ}^{MAX} = (2 \dots 5) \cdot 24 = 48 \dots 120 \text{ В},$$

где K_3 коэффициент запаса принимаемый в диапазоне 2...5

$U_{КОМ}$ – коммутируемое напряжение

- Рассчитаем номинальный ток транзистора. Ток, протекающий через внутреннее сопротивление сервопреобразователя, по закону Ома:

$$I_{\text{потр.}} = U_{КОМ} / R_{\text{внутр.}}, \quad (2.2)$$

$$I_{\text{потр.}} = 24 / 4700 = 5,1 \text{ мА},$$

где $R_{\text{внутр.}}$ внутреннее сопротивление преобразователя

С учетом коэффициента запаса (K_3 примем 1,25):

$$I_{\text{потр.}}^{\text{макс}} = K_3 I_{\text{потр.}}, \quad (2.3)$$

$$U_{\text{кэ}}^{\text{MAX}} = 1,25 \cdot 5,1 = 6,4 \text{ мА},$$

- Рассчитаем необходимый коэффициент передачи по току h_{FE} . Примем ток протекающий через базу транзистора I_6 равным 1 мА, тогда коэффициент передачи по току:

$$h_{FE} \geq \frac{I_k}{I_6}, \quad (2.4)$$

$$h_{FE} \geq \frac{6,4}{1} = 6,4.$$

Исходя из условий 2.1...2.4, выберем транзистор типа BC817-40, технические характеристики которого приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Параметры транзистора

Параметр	Значение
Тип	BC817-40
Напряжение коллектор-эмиттер, В	45
Напряжение коллектор-база, В	50
Напряжение эмиттер-база, В	5
Падение напряжения база-эмиттер, В	0,65
Максимально допустимый ток коллектора, А	1
Максимально допустимый ток базы, мА	200
Коэффициент усиления по току	250-600
Корпус	SOT-23

Итогом данного этапа работы стала принципиальная электрическая схема, представленная в приложении. Также были составлены соответствующие перечни элементов согласно ГОСТ.

2.6 Разработка программного обеспечения контроллера системы управления

Для выбранного контроллера необходимо разработать программу, выводящую на входы сервопреобразователя импульсы вышеописанного вида. Далее показаны этапы создания ПО, временные диаграммы работы которого приведены на рисунке 2.7.

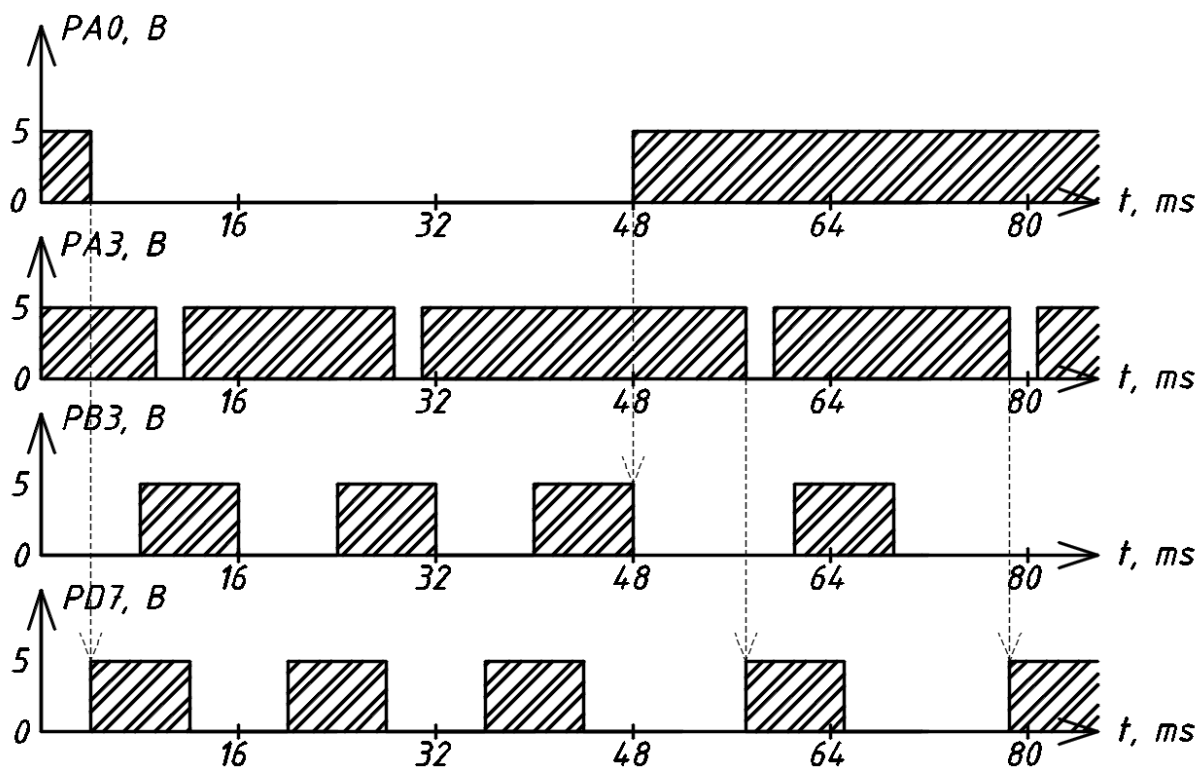


Рисунок 2.7 – Диаграммы работы программы

Словесное описание алгоритма работы:

При включении контроллера программа инициализирует порты ввода/вывода (РА0 – тумблер «Последовательность импульсов», РА3 – кнопка «Одиночный импульс», РВ3 и РД7 – выходы МК) и очищает все регистры таймеров Т0 и Т2.

Далее происходит опрос входов: при разомкнутых тумблере и кнопке – программа ожидает нажатия.

При переключении тумблера «Последовательность импульсов» в положение «1» происходит проверка на ложность нажатия, если нажатие истинное – последовательно включаются на ШИМ с 62 Гц (частота подобрана экспериментально) и скважностью 0,5 выход PD7 таймера T2, а после, через четверть периода, – ШИМ, выход PB3 таймера T0. Работа ШИМ выходов продолжается вплоть до переключения тумблера «Последовательность импульсов» в положение «0». Нажатия кнопки «Одиночный импульс» не влияют на работу в данном режиме.

В случае если тумблер не переведен в положение «1» или это положение было ложным, то происходит опрос кнопки «Одиночное нажатие», которое также проверяется на ложность нажатия. В случае истинного нажатия на выходе PD7 формируется «1», а спустя четверть периода ШИМ, то же самое происходит с выходом PB3. После следующей четверти периода PD7 переключается в «0». В конце периода то же самое происходит и с выходом PB3, далее ход исполнения программы возвращается в главный цикл. При переключении тумблера «Последовательность импульсов» во время выполнения процедуры «Одиночное нажатие» – микроконтроллер доведет её исполнение до конца и перейдет к стандартному выполнению процедуры «Последовательность импульсов». Система останавливается приведением кнопки и тумблера в ненажатое положение.

На рисунке 2.8 приведена блок-схема основного алгоритма программы. На рисунке 2.9 приведена блок-схема алгоритмов подпрограмм, используемых в основном цикле.

Итогом данного этапа работы стала программа для микроконтроллера Atmega8535 составленная на языке Си. Полный текст программы, с поясняющими комментариями приведены в приложении А.

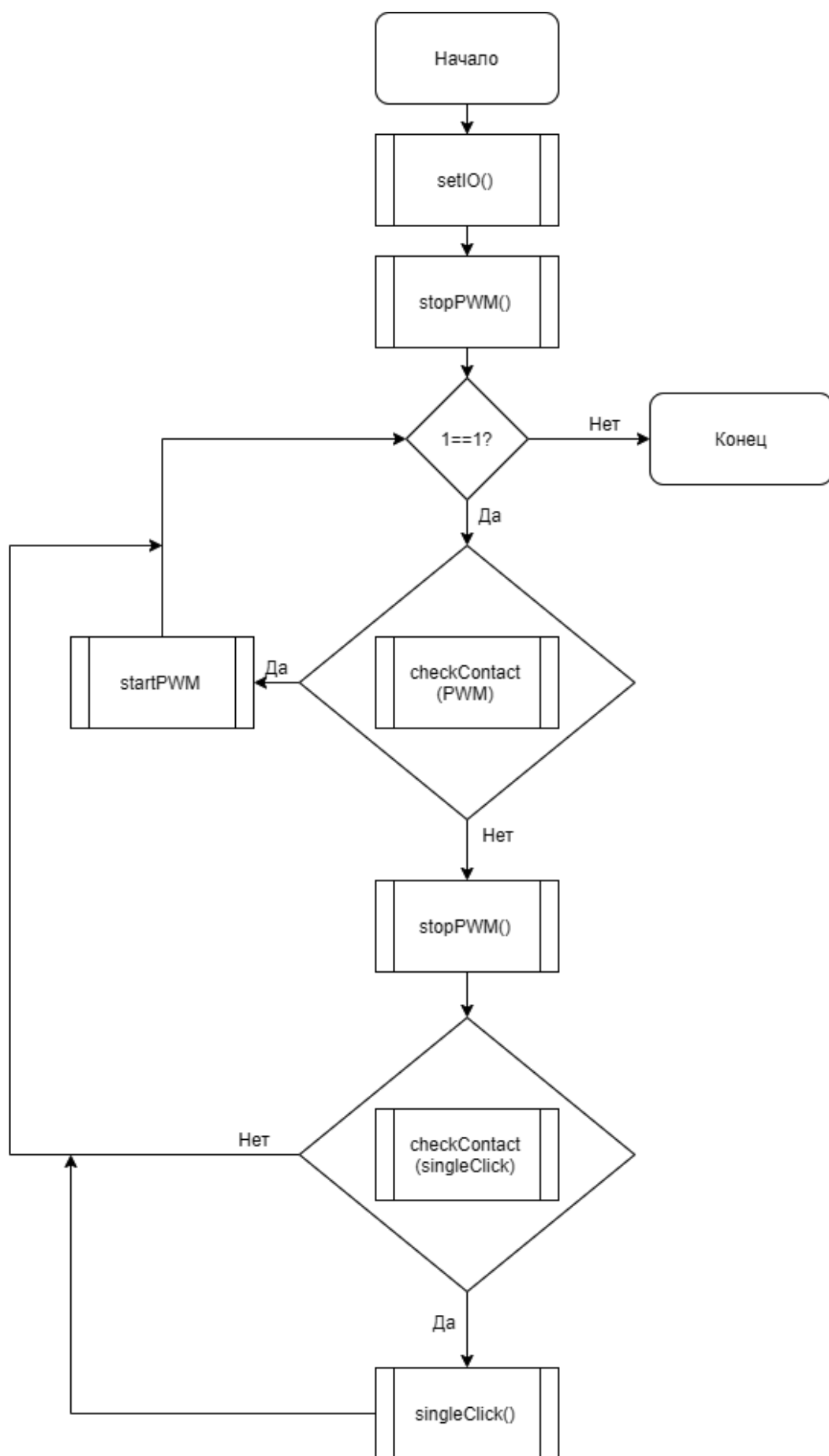


Рисунок 2.8 – Блок-схема основного алгоритма программы

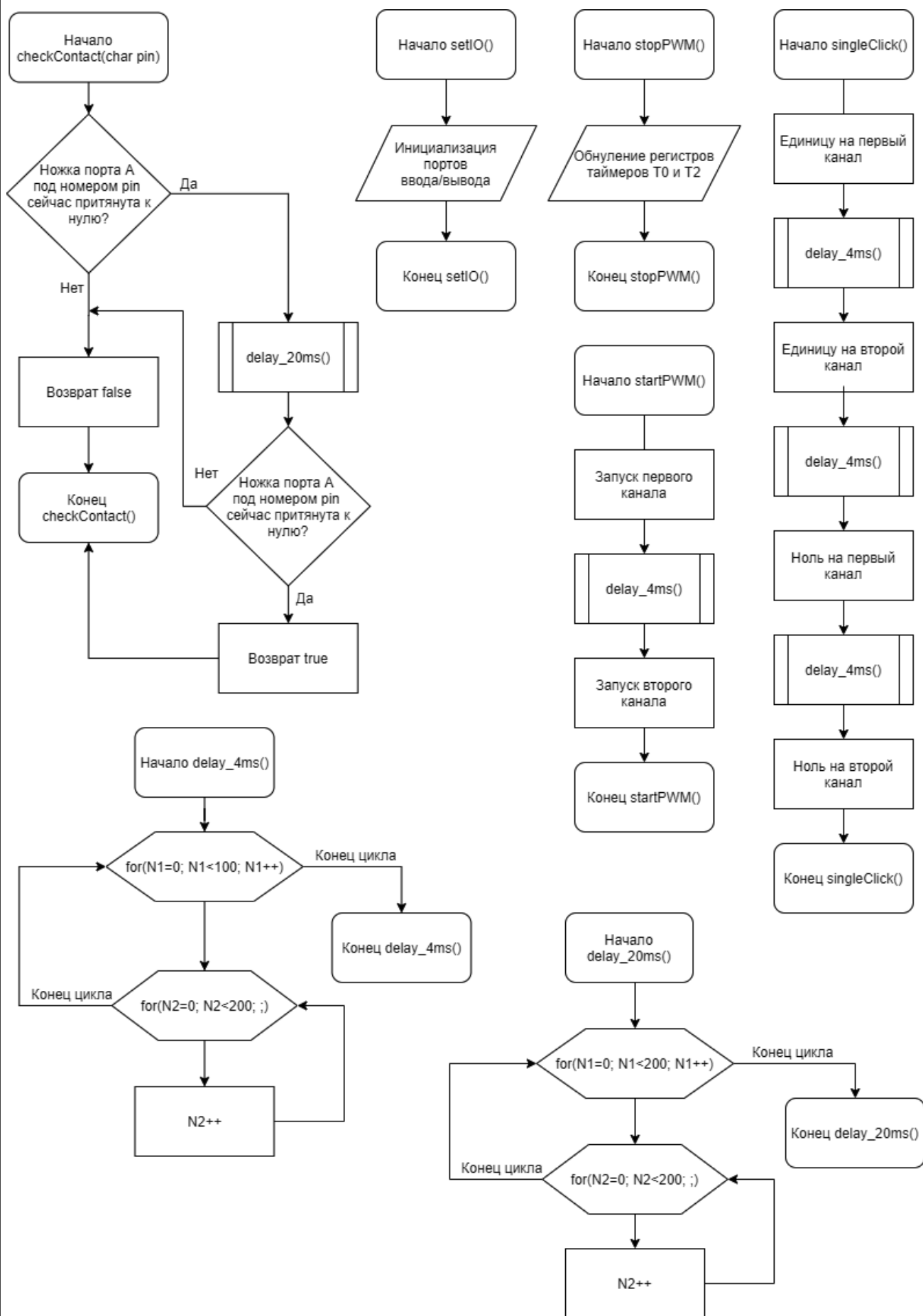


Рисунок 2.9 – Блок-схема внутренних функций алгоритма программы

2.7 Разработка конструктива модуля нагрузочного устройства

На рисунке 2.7 представлен внешний вид модуля нагрузочного устройства, созданный в соответствии с общим стилем исполнения компонентов компании «УчтехПрофи».

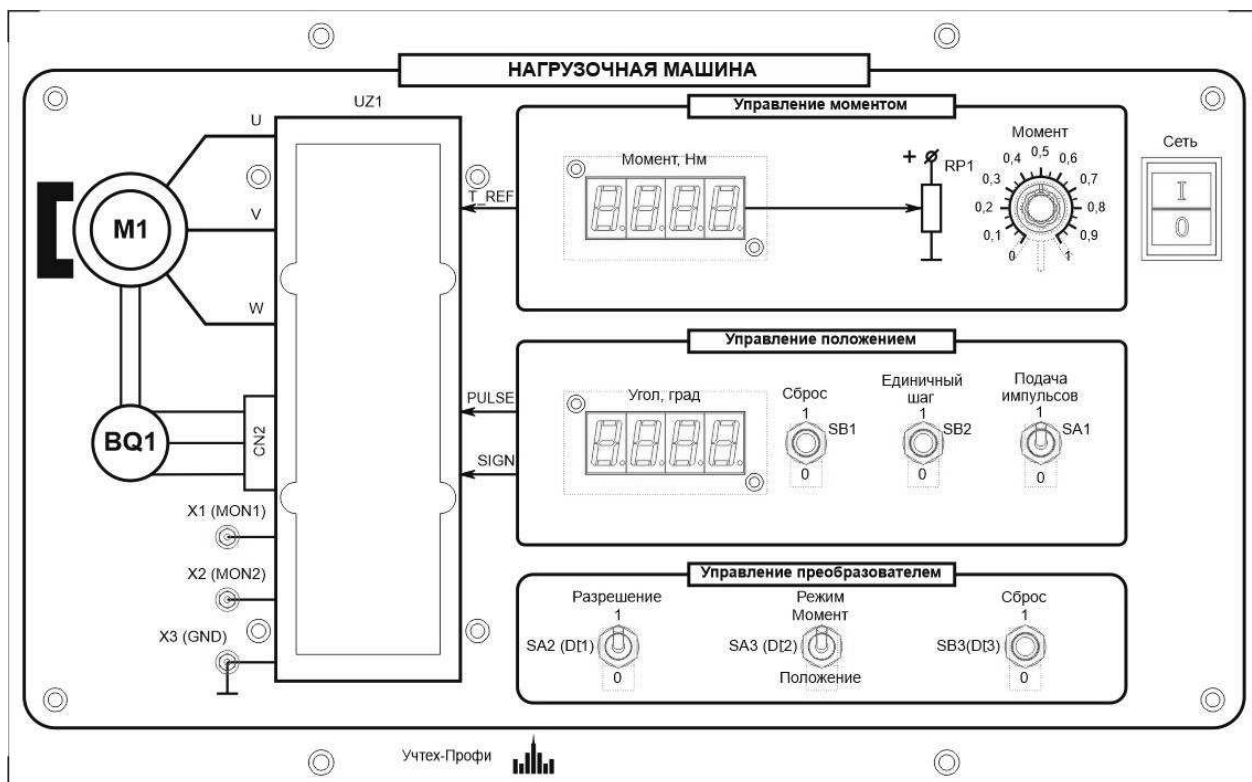


Рисунок 2.7 – Конструктив модуля нагрузочного устройства

Интерфейс модуля условно делится на 4 составляющих:

- Силовая составляющая, представленная двигателем M1, сервопреобразователем UZ1 и энкодером BQ1. Связь между преобразователем и энкодером показана с помощью разъема CN2. Для возможности подключения внешних измерительных приборов выведена клемма сервопреобразователя MON1.
- Составляющая управления моментом, заключенная в одноименную рамку позволяет наблюдать и управлять величиной момента.

Для этого служат четырехразрядный семисегментный индикатор и потенциометр RP1 в диапазоне от 0 до 1,27 Нм.

- Составляющая управления положением, заключенная в одноименную рамку позволяет наблюдать за величиной угла поворота ротора с помощью четырехразрядного семисегментного индикатора (значение на индикаторе обнуляется кнопкой «Сброс» SB1), а также осуществлять подачу последовательности импульсов при переключении тумблера SA1 в положение «1» или единичных импульсов при нажатии кнопки SB2.
- Составляющая управления преобразователем, заключенная в одноименную рамку позволяет выбрать режим работы тумблером SA3, глобально разрешить работу модуля тумблером SA2 или сбросить ошибки возникающие при работе системы кнопкой «Сброс» SB3.

3 СНЯТИЕ ОПЫТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

После сборки и настройки ключевых элементов учебного стенда, можно приступить к основной цели работы – снятие характеристик шагового двигателя.

3.1 Статический режим

Статическая моментная характеристика.

Т- θ -характеристика является зависимостью величины внешнего момента T , приложенного к валу двигателя, от величины углового смещения θ относительно положения равновесия.

Порядок снятия характеристики: шаговый двигатель фиксируют неподвижно в положении равновесия при возбуждающем токе, поданном по двухфазной схеме. К ротору двигателя прикладывают внешний момент серводвигателем, вызывая угловое смещение. Максимальный статический момент, соответствующий θ_m называется удерживающим моментом.

Полученная характеристика представлена на рисунке 3.1.

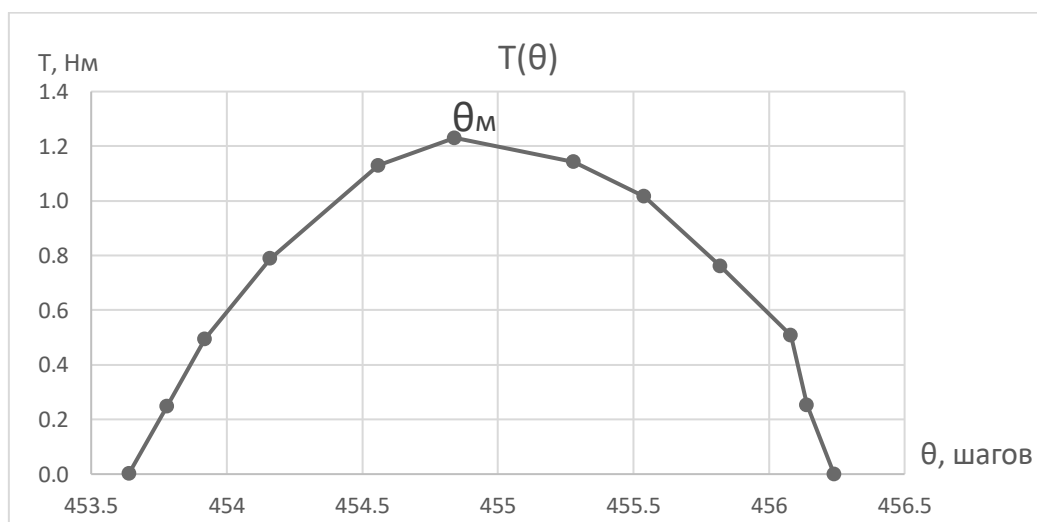


Рисунок 3.1 – Статическая моментная характеристика

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

42

Статическая токовая характеристика момента удержания.

Т-І-характеристика является зависимостью удерживающего момента, упомянутого выше, от величины тока, подаваемой на электродвигатель.

Порядок проведения эксперимента: ток, доступный для питания шагового двигателя, ограничивается фиксированным значением. Шаговый двигатель фиксируют неподвижно в положении равновесия при возбуждающем токе, поданном по двухфазной схеме. К ротору двигателя прикладывают внешний момент с помощью серводвигателя, вызывая угловое смещение, вплоть до достижения максимально возможного отклонения от положения равновесия. Данная точка фиксируется осциллографом, после чего величина токоограничения изменяется и опыт повторяется.

Полученная характеристика представлена на рисунке 3.2.

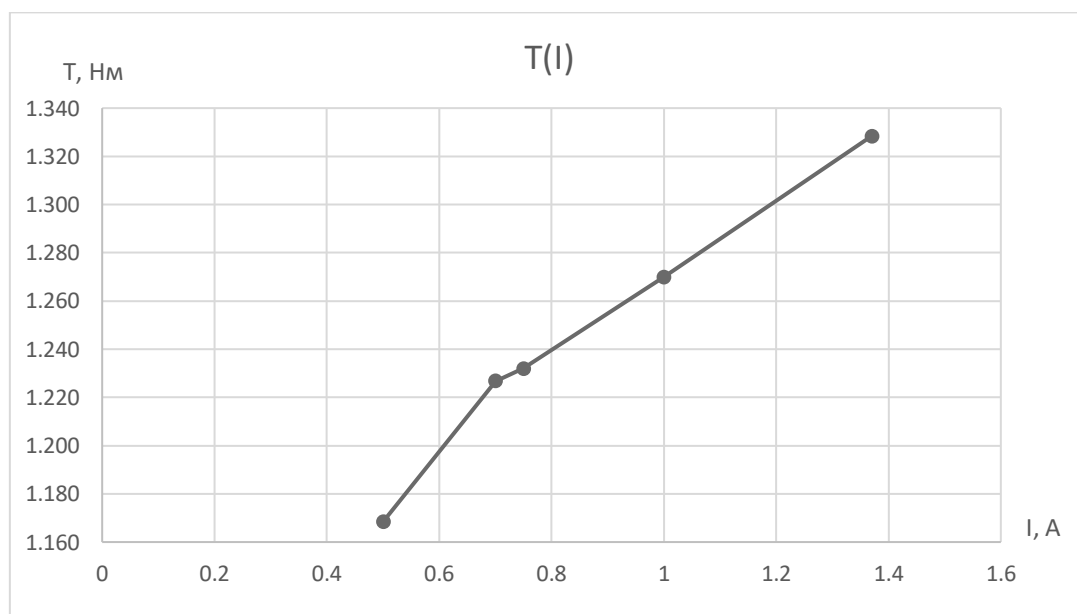


Рисунок 3.2 – Статическая токовая характеристика момента удержания

3.2 Квазистатический режим

Квазистатическая характеристика – это характеристика, полученная в режиме отработки единичных шагов, при котором переходные процессы, запущенные в двигателе предыдущим тактом коммутации полностью затухают.

Порядок проведения эксперимента: на шаговый двигатель подаются низкочастотные импульсы. Переходный процесс изменения угла поворота ротора наблюдается с помощью осциллографа серводвигателя, настроенного на разрешающую способность в 1 000 000 импульсов на оборот.

Полученные переходные процессы представлены на рисунках 3.3 – 3.5.

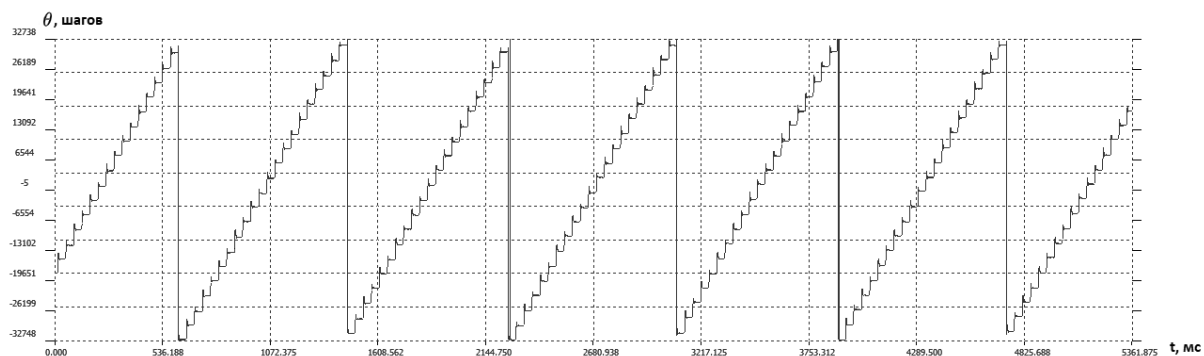


Рисунок 3.3 – Осциллограмма перемещения двигателя

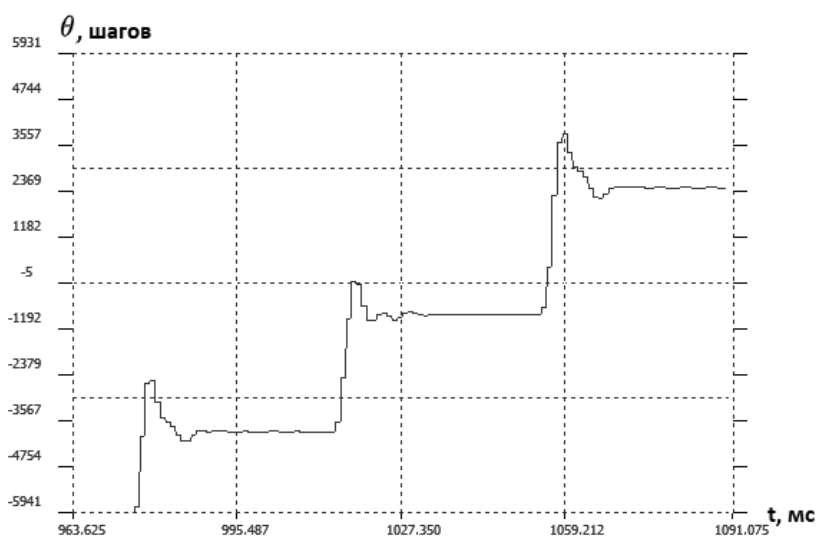


Рисунок 3.4 – Переходные процессы нескольких шагов двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

44

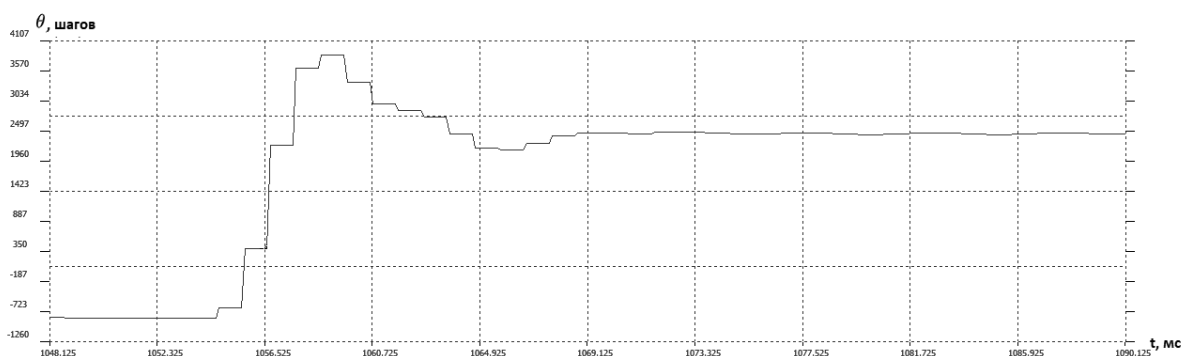


Рисунок 3.5 – Осциллограмма одного шага двигателя

3.3 Динамический режим

Динамическими характеристиками называются характеристики двигателя во время движения либо в его начале.

Характеристика пускового момента определяется диапазоном значений момента сопротивления нагрузки, в котором двигатель может запускаться без потери шага для различных частот. Причина, по которой используется слово «диапазон», а не «максимум» (который и показан в качестве фактической характеристики), заключается в том, что двигатель не способен запускаться или поддерживать нормальное вращение при малых нагрузках сопротивления в определенных диапазонах частот (к сожалению, данное явление наблюдать не удалось).

Характеристики выходного момента иначе называются характеристиками в движении. После того, как выбранный двигатель запустился при определенном управлении, частоту импульсов плавно увеличивают. При некоторой частоте двигатель выпадает из синхронизма. Взаимосвязь между моментом сопротивления нагрузки и максимальной частотой импульсов, при которой сохраняется синхронизм, называется выходной характеристикой.

Порядок проведения экспериментов:

- Для получения выходной характеристики, запущенный двигатель нагружается фиксированной величиной внешнего момента.

Далее частота подаваемых на него импульсов постепенно увеличивается, вплоть до выпадения из синхронизма. Частота, предшествующая выпадению из синхронизма, фиксируется.

- Для получения пусковой характеристики сервопривод включается в режим поддержания положения с фиксированным токоограничением, после чего запускается шаговый двигатель, неспособный начать вращение из-за того, что серводвигатель обладает большим номинальным моментом. Далее максимальный ток серводвигателя постепенно снижается, до тех пор, пока шаговый двигатель не приходит в стабильное вращение, без пропуска шагов. Момент серводвигателя, при котором происходил успешный пуск фиксируется осциллографом.

Полученные характеристики представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

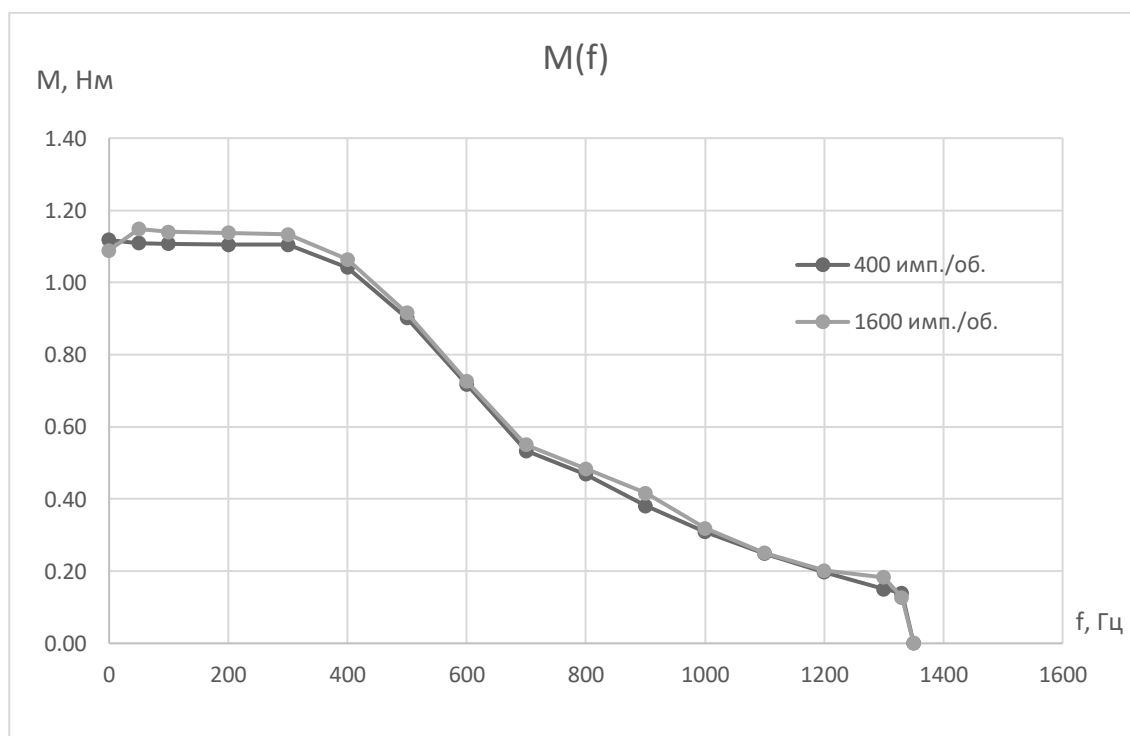


Рисунок 3.6 – Выходные моменты шагового двигателя при различных частотах импульсов

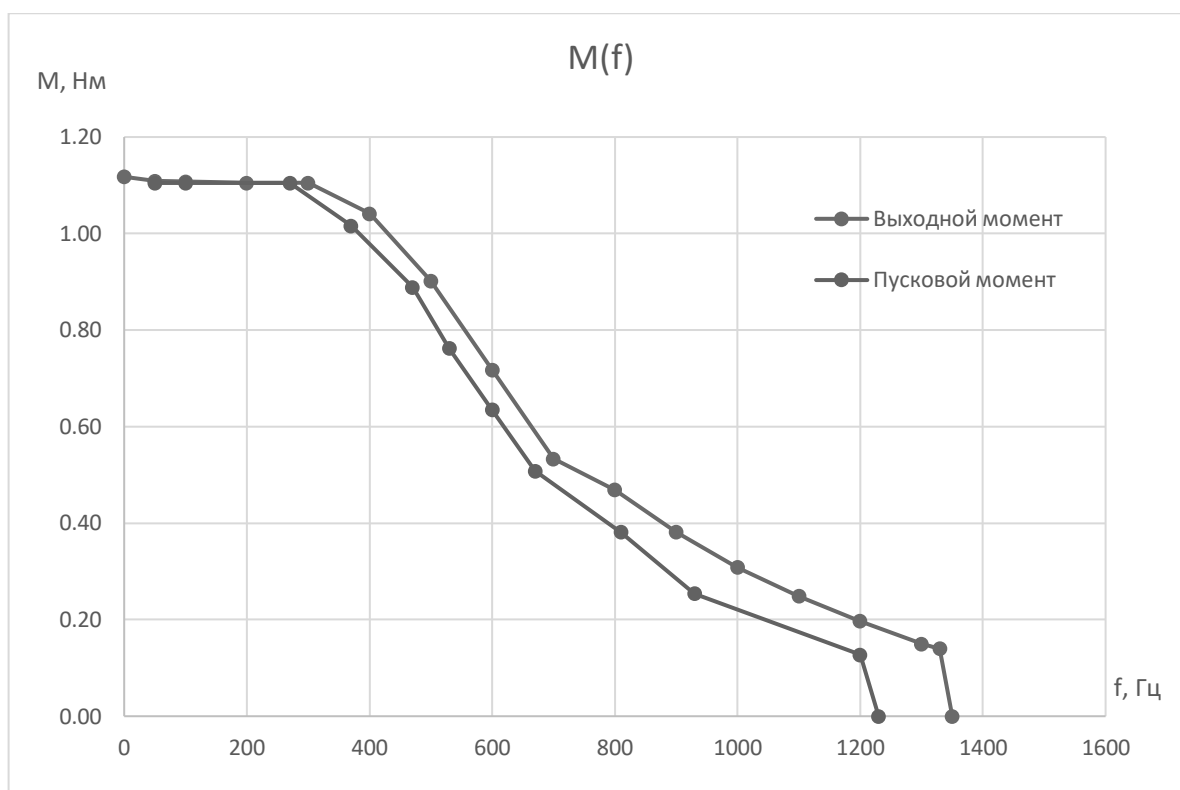


Рисунок 3.7 – Выходная и пусковая динамические характеристики

Таким образом, получены все необходимые характеристики, которые, ко всему прочему, совпадают с теоретическими выкладками из первой главы данного фундаментального труда, доказывая полное выполнение требований выпускной квалификационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного выпускного квалификационного проекта были сформулированы основные требования к нагрузочному устройству, согласно которым в качестве исполнительного механизма был выбран сервопривод. Далее была произведена разработка функциональной схемы электропривода и формирование конструктива электромашинного агрегата. Следующим шагом стало проектирование принципиальной электрической схемы устройства и создание программного обеспечения контроллера системы управления. Последующим этапом была разработка конструктива модуля нагрузочного устройства, предназначенного для исследования шагового двигателя, и позволяющего снимать его основные статические, квазистатические и динамические характеристики. Заключительным шагом стало снятие всех указанных характеристик и полная проверка функционирования реальной установки.

В ходе работы был проведен сравнительный обзор общепромышленных агрегатов и механизмов на предмет соответствия их требованиям разрабатываемого нагрузочного устройства, который показал необходимость выбора специальной машины, в качестве которой был избран синхронный гибридный серводвигатель ЕСМА – С10604ES производства фирмы Delta Electronics. Для данного двигателя был подобран сервопреобразователь ASD-A2-0421-F от того же производителя.

При разработке функциональной схемы, было проведено разбиение на отдельные функциональные блоки для облегчения реализации и изготовления, среди прочих были проработаны блок ручного управления двигателем, блок связи с персональным компьютером для программного управления и наблюдения параметров, блок индикации и др.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						48
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

При формировании конструктива электромашиного агрегата, был произведен тщательный анализ различных способов соединения двигателей, итогом которого стал выбор металлическая безззорной сильфонной минимифты производства компании «R+W» модели МК1/20/31/6.35/14, так как все прочие виды соединений не обладали необходимыми характеристиками.

При проектировании принципиальной электрической схемы был решен целый комплекс проблем. Наиболее важными из принятых решений стал выбор управляющего устройства (Atmega8535 производства фирмы Atmel), выбор защиты по питанию модуля (автоматический выключатель фирмы Schneider Electric модели iC60N C), а также расчет и последующий выбор транзисторов типа BC817-40.

По ходу создания программного обеспечения модуля, были проделаны следующие этапы: составлено словесное описание алгоритма работы программы, перенос алгоритма в форму блок-схемы, написание программы на языке Си, программирование контроллера и подбор подходящих частот.

В процессе разработки конструктива модуля нагрузочного устройства в графической среде CorelDRAW 2019 была изображена интерфейсная часть модуля и произведено её логическое согласование с внутренним наполнением модуля.

После сборки и пайки всех компонентов модуля и стенда в целом, были сняты динамические, статические и квазистатические характеристики шагового двигателя, произведено сравнение с теоретическими данными и выявлено полное удовлетворение поставленных в работе требований к нагрузочному устройству учебного стенда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Драчев, Г.И. Теория электропривода. Примеры расчетов / Г.И. Драчев, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. – Ч.: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 181 с.

2 Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

3 Драчев Г.И. Теория электропривода. Часть 1: Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005 – 207 с.

4 Савельев, И. В. Курс общей физики. Том 1 механика, колебания и волны, молекулярная физика / И. В. Савельев. – М.: Изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – 517 с.

5 Каталог фирмы Delta Electronics. – <http://www.deltronics.ru/> (дата обращения 20.04.2020).

6 Каталог импортера оборудования фирмы R+W в России. – <https://souzimport.ru/catalog/> (дата обращения 05.04.2020)

7 Каталог поставщика электронных компонентов в Челябинске. – <https://www.chipdip.ru> (дата обращения 22.04.2020).

8 Каталог автоматических выключателей фирмы Schneider Electric. – <https://www.se.com/ru/ru/all-products/>(дата обращения 25.04.2020).

9 Такаши К. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления/ пер. с англ. – М.:Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ЯЗЫКЕ С

/*

Программа формирования одиночных импульсов или их последовательности;

Входы: PA0, PA1

Выходы: PD7, PB3 (ШИМ)

Автор - Антон Варганов

*/

```
#include <iom8535v.h>
```

```
#include <macros.h>
```

```
#include <stdbool.h>
```

```
#define PWM 1
```

```
#define CLICK 2
```

```
//использование программных задержек позволительно
```

```
//так как программа в любом случае ждет проверки надребезг и импульс
```

```
void delay_20ms(void) { //функция задержки надребезг контактов
```

```
    unsigned char N1, N2;
```

```
    for(N1=0; N1<200; N1++) {
```

```
        for(N2=0; N2<200; N2++) {;}
```

```
    }
```

```
}
```

```
void delay_4ms(void) { //функция задержки для одиночного импульса
```

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ</i>	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

```

unsigned char N1, N2;

for(N1=0; N1<100; N1++) {
    for(N2=0; N2<200; N2++) {;}
}
}

// тумблер и кнопка притянуты к общей точке, а не к +5В

unsigned char checkContact(unsigned char pin) { //функция проверки входа
    if((PINA&pin)==0) { //сейчас кнопка/тумблер замкнуты?
        delay_20ms(); //если да - проверка надребезг
        if((PINA&pin)==0) { //и повторная проверка
            return true;
        }
    }
    return false;
}

void setIO(void) { //функция настройки портов ввода/вывода
    DDRD = 0xFF;
    DDRB = 0xFF; //порт В и D - вывод
    DDRA = 0x00; //порт А - ввод
    PORTD = 0x00;
    PORTB = 0x00;
    PORTA = 0xFF;
}

```

```

void stopPWM(void) {           //функция остановки и очистки ШИМ-таймеров
    TCCR0 = 0x00;
    TCCR2 = 0x00;
    TCNT0 = 0x00;
    TCNT2 = 0x00;
    OCR0 = 0x00;
    OCR2 = 0x00;
}

```

```

void startPWM(void) {         //функция запуска и настройки ШИМ-таймеров
    OCR2 = 0x80;
    OCR0 = 0x80;
    TCCR2 = 0x6F;             //включили первый канал
    delay_4ms();              //делаем задержку в четверть периода шим
    TCCR0 = 0x6D;             //включаем второй канал
}

```

```

void singleClick(void) {     //функция одиночного сигнала
    PORTD = 0xFF;            //включаем первый выход
    delay_4ms();              //задержка в четверть периода
    PORTB = 0xFF;            //включаем второй выход
    delay_4ms();              //задержка в четверть периода
    PORTD = 0x00;            //выключаем первый выход
    delay_4ms();              //задержка в четверть периода
}

```

```

    PORTB = 0X00;          //выключаем второй

    delay_20ms();

}

void main(void)
{

    setIO();                //настройка входов\выходов

    stopPWM();              //стоп и обнуление шим

    while(true) {

        if(checkContact(PWM)) {          //проверить, установлен ли вход

                                            // включения ШИМ

            startPWM();                  //если установлен - включить его

        } else {

            stopPWM();                  //иначе остановить шим

            if(checkContact(CLICK)) {    //проверить, установлен ли вход

                                            // одиночного сигнала

                singleClick();          //если установлен - выдать сигнал

            }

        }

    }

}

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.01ПЗ

Лист

54

Поз. Обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
DD1	АТмега8535-16PU	1	
ZQ1	Кварцевый резонатор НС-49U-8 МГц	1	
VT1,VT2	BC817-40	2	
L1	Дроссель КИГ 0.4-68	1	
	Резисторы		
R1,R4	ЧИП-резистор 1206-0,33кОм-5%	2	
R2,R5	ЧИП-резистор 1206-1кОм-5%	2	
R3	ЧИП-резистор 1206-0,22кОм-5%	1	
	Конденсаторы		
C1	ЧИП-конденсатор 1206-100мкФ-20%	1	
C2	ЧИП-конденсатор 1206-1мкФ-20%	1	
C3,C4	ЧИП-конденсатор 1206-100нФ-20%	2	
C5,R6	ЧИП-конденсатор 1206-15нФ-20%	2	

					ЮУрГУ-13.03.02.2020.052.02ПЭ		
Изм.	Лист	№докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Варганов А.С				Система управления серводвигателем Перечень элементов		
Пров.	Качалов А.В						
Реценз.							
Н. контр.	Фцнк Т.А.						
Утв.	Григорьев М.А						
					Лит.	Лист	Листов
						1	3
					ЮУрГУ Кафедра АЭП		

[illegible]

[illegible]