

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**  
Институт «Политехнический институт», факультет «Энергетический»  
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ / А.Е. Бычков /

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ / А.Н. Шишков /

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ  
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2018.255 ВКР**

*Руководитель проекта:*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /А.С. Нестеров/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Автор проекта*

*студент группы* \_\_\_\_\_ П-286 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ /Е.А. Копп/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Нормоконтролер*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск  
2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Копп Е.А. Разработка и моделирование системы бесконтактного измерения механических параметров электропривода – Челябинск: ЮУрГУ, П-286; 2018, 82 с., 60 ил., 8 табл., библиографический список – 18 наим.

В выпускной квалификационной работе рассматривается проектирование датчика для системы бесконтактного измерения механических параметров электропривода.

В первой части работы описывается принцип измерения механических параметров разрабатываемым устройством.

Во второй части производится моделирование и сравнения основных конструкций, разработанных для датчика данного типа. На основе этих данных был выбран наиболее подходящий вариант исполнения.

В третьей части работы для проектируемого датчика рассчитана и составлена математическая модель. Проведена оценка влияния датчика на систему электропривода.

В четвёртой части выполнено проектирование двух типов стендов для измерения и контроля крутящего момента на основе разрабатываемого датчика.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дат</i>				
Разраб.	Копп Е.А.				Разработка и моделирование системы бесконтактного измерения механических параметров электропривода	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Провер.	Нестеров А.С.						4	82
Реценз	Бычков А.Е.					<b>ЮУрГУ Кафедра «АЭП»</b>		
Н. Контр.	Бычков А.Е.							
Утверд.	Шишков А.Н.							

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Современные методы контроля крутящего момента .....	8
1.1 Косвенный метод контроля момента .....	8
1.2 Тензодатчики с контактными кольцами .....	11
1.3 Бесконтактные тензодатчики .....	13
1.4 Фотоупругие преобразователи крутящего момента .....	15
1.5 Магнитоупругие датчики .....	17
1.6 Примеры применения в технологических процессах .....	18
2 СРАВНЕНИЕ ИСХОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДАТЧИКА .....	20
2.1 Разновидности МД .....	20
2.2 Картины полей и характеристики .....	26
2.3 Программное обеспечение для расчёта датчика крутящего момента .....	32
2.3.1 Секция 1 – Основные параметры .....	33
2.3.2 Секция 2 – Конструктивные параметры .....	34
2.3.3 Секция 3 – Параметры электромагнитной цепи .....	35
2.3.4 Секция 4 – Расчёт выходного напряжения .....	36
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ .....	37
3.1 Выбор элементов математической модели .....	37
3.1.1 Выбор электродвигателя .....	38
3.1.2 Выбор тиристорного преобразователя .....	39
3.1.3 Выбор силового трансформатора .....	41
3.1.4 Выбор сглаживающего реактора .....	45
3.2 Настройка параметров регуляторов .....	45
3.3 Контур управления моментом .....	49
3.4 Построение характеристик и проверка функционирования схемы ...	50
4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ СТЕНДОВ .....	57
4.1 Проектирование простого стенда .....	57
4.1.1 Расчёт прочности стержней .....	59

					ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

4.1.2	Расчёт стержня для груза на растяжение .....	64
4.2	Проектирование автоматизированного стенда .....	68
4.2.1	Выбор исследуемого вала и датчиков крутящего момента.....	69
4.2.2	Выбор двигателя для стенда .....	72
4.2.3	Выбор нагрузочной машины для стенда .....	75
4.2.4	Выбор редукторов.....	75
4.2.5	Выбор тиристорного преобразователя .....	77
4.2.6	Приведение моментов к валу двигателя.....	77
4.2.7	Расчёт вала на скручивание .....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		81
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....		82

## ВВЕДЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе произведено проектирование и моделирование устройства контроля механических параметров электропривода, а также анализ преимуществ данного устройства над существующими методами контроля крутящего момента.

Актуальность работы обусловлена необходимостью точного контроля крутящего момента во многих технологических процессах и несовершенством уже существующих решений.

Цель работы состоит в определении эталонного исполнения для проектируемого устройства (датчика) путём сравнения виртуальных моделей существующих вариантов конструкции. В силу трудоёмкости и сложности процесса расчёта, его необходимо автоматизировать программным путём.

Для дальнейшего проектирования устройства требуется проверить меру его влияния на систему управления электроприводом. Эта проверка будет состоять в расчёте и составлении математической модели в двух условных режимах: в режиме идеального измерения необходимых величин и в режиме измерения этих величин разрабатываемым датчиком. Результат сравнения двух данных режимов покажет меру влияния математической модели устройства на систему.

Конечным этапом проектирования является опытная проверка устройства. Для этого необходимо спроектировать лабораторные стенды с возможностью изменения крутящего момента. Проектирование испытательных стендов подразделяется на два этапа: проектирование мануального стенда и проектирование автоматизированного стенда.

При испытании датчика на мануальном стенде предусматривается точное задание крутящего момента и отслеживание показаний устройства. При опытах на автоматизированном стенде будет произведено сравнение работоспособности разрабатываемого датчика и аналогичного устройства уже применяющегося в технологических процессах.

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ				

# 1 Современные методы контроля крутящего момента

## 1.1 Косвенный метод контроля момента

Контроль электромагнитного момента и угловой скорости АД можно осуществлять, учитывая известные данные двигателя и просто измеряемые величины – фазные токи и напряжения.

Ниже (рисунок 1.1) представлен алгоритм определения выходных механических переменных АД.

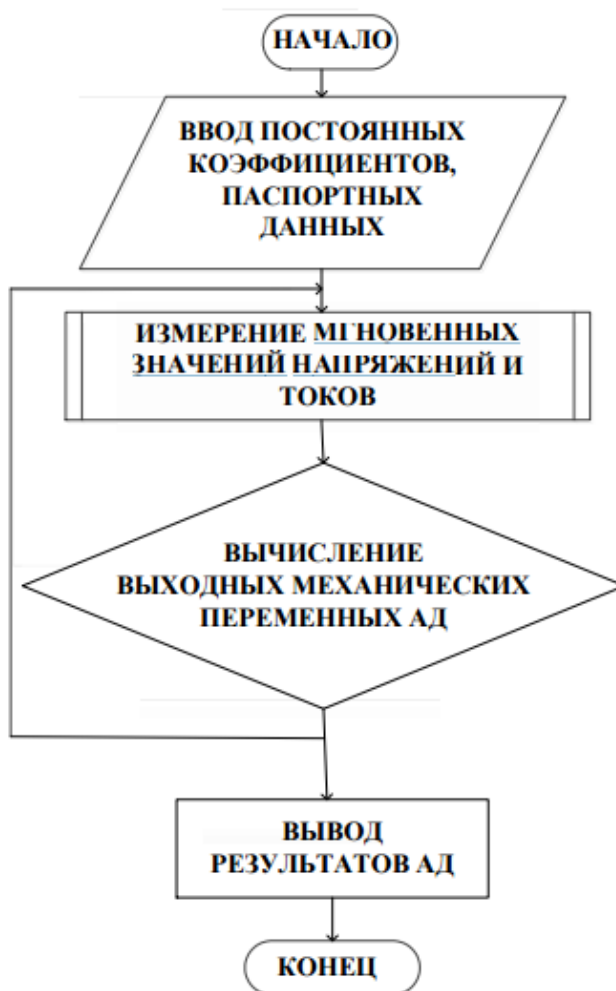


Рисунок 1.1 – Алгоритм косвенного контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД

В соответствии с рассматриваемым алгоритмом, учитывая паспортные данные, постоянные коэффициенты и значения фазных напряжений и токов, полученных с соответствующих датчиков, можно определить выходные механические переменные АД в блоках вычисления электромагнитного момента и угловой скорости. Ниже (рисунок 1.2) представлена общая схема для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК [1].

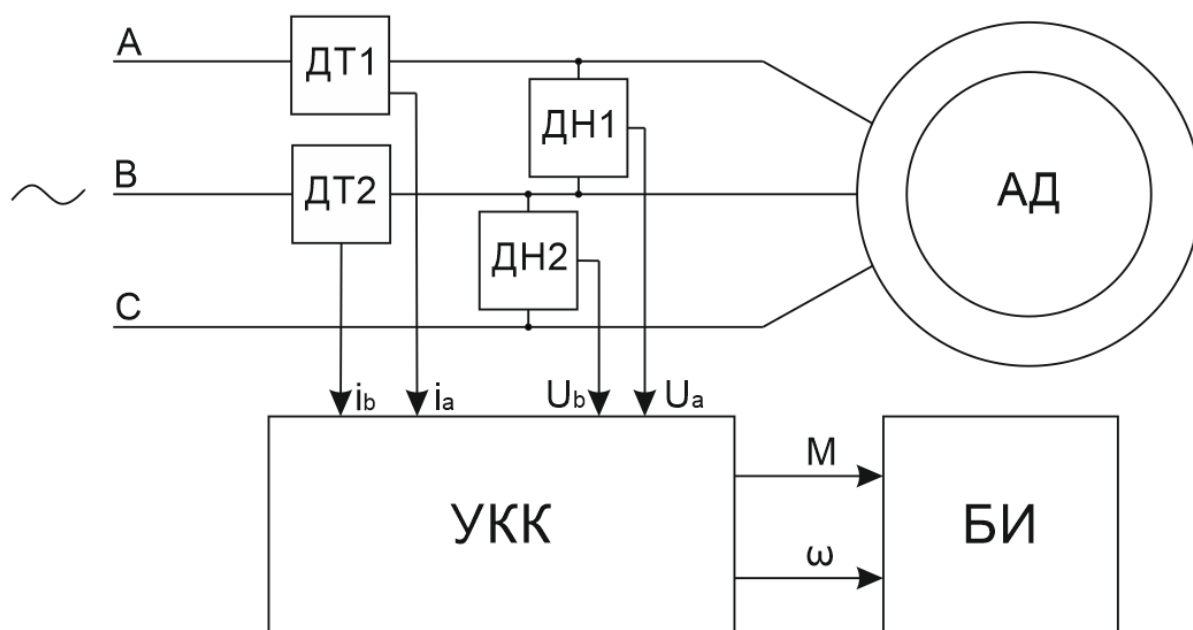


Рисунок 1.2 – Общая схема контроля электромагнитного момента и угловой скорости АД с УКК

Схема содержит асинхронный двигатель, датчики тока (ДТ1 и ДТ2) и напряжения (ДН1 и ДН2), а также устройство косвенного контроля выходных механических переменных (УКК) и блок индикации (БИ). С помощью УКК определяются значения электромагнитного момента и угловой скорости, а затем выводятся на БИ. В качестве датчиков могут быть использованы широко применяемые в ЭП переменного тока – датчики тока и напряжения. Блоки вычисления электромагнитного момента и угловой скорости АД могут быть реализованы стандартными аппаратными средствами на основе интегральных микросхем либо с использованием микропроцессорных устройств [2].

Применение:

- привод прокатных станов;
- большинство учебных стендов.

Достоинства:

- затраты значительно ниже, чем при использовании прямых методов контроля;
- не требуется обслуживание.

Недостатки:

- быстродействие гораздо ниже, чем при прямом контроле;
- высокая погрешность в следствие возможных изменений характеристик двигателя в процессе эксплуатации.



## 1.2 Тензодатчики с контактными кольцами

Тензометрический измерительный преобразователь (тензодатчик) – параметрический резистивный преобразователь, который преобразует деформацию твёрдого тела, вызванную приложенным к нему механическим напряжением, в электрический сигнал. Тензорезистор (от лат. *tensus* – напряжённый и *resisto* – сопротивляюсь) – резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. Такой преобразователь, будучи приклеенным к испытываемому объекту, воспринимает деформации его поверхностного слоя. Таким образом, естественной входной величиной наклеиваемого преобразователя является деформация поверхностного слоя объекта, на который он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации [3].

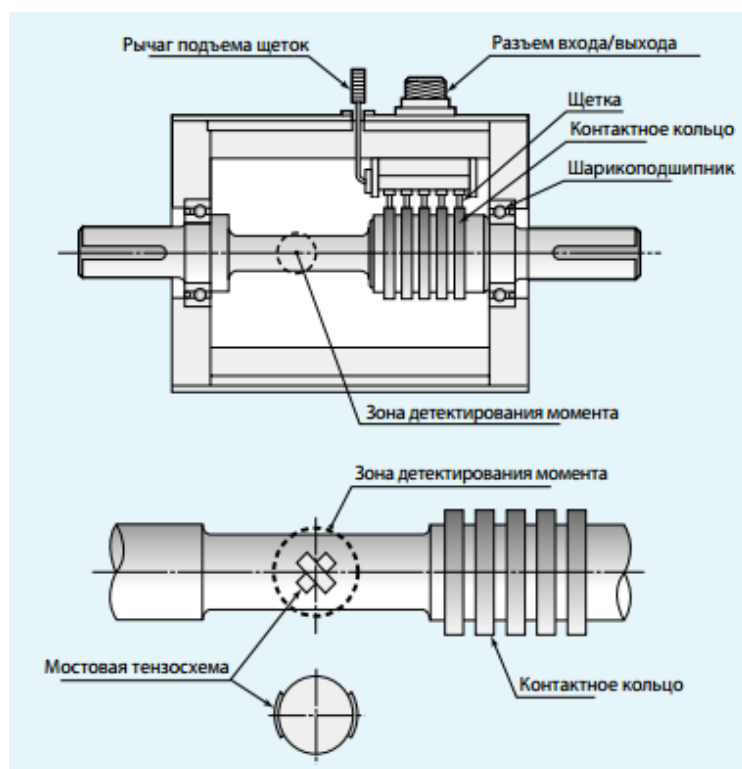


Рисунок 1.3 – Конструкция современного тензодатчика с контактными кольцами фирмы Куова

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ

Лист

11

Основные области применения датчиков с контактными кольцами:

*технологии винтовых соединений:*

- проверка и регулирование инструментов для винтовых соединений, таких как угловые динамометрические гаечные ключи или гайковерты;
- проверка качества винтовых соединений;

*измерения:*

- пусковых крутящих моментов на двигателях и насосах;
- крутящих моментов трения в коробках передач, подшипниках и уплотнителях;
- крутящих моментов в торсионных пружинах;
- в устройствах регулирования в автомобильной промышленности (раздвижные крыши, подъемники и т.д.).

Достоинства:

- относительно несложный механизм установки датчика;
- не требуют технического обслуживания.

Недостатки:

- Относительно не высокая максимальная скорость контролируемого вала;
- При малых скоростях для определения момента диаметр вала должен быть мал;
- Изнашиваемость контактных колец, как следствие, относительно недолгий срок службы датчика при использовании на больших скоростях;
- Со временем снижается точность измерения сопротивления [4].



При наклейке тензометров необходимо учитывать, что для качественного измерения на расстоянии 20 мм слева и справа от площадки наклейки тензорезисторов не должно быть изменений формы или толщины вала [1].

Для измерения малых деформаций используют фольговые тензорезисторы, а для больших проволочные [4].



Рисунок 1.4 – Бесконтактный датчик момента DR-3001 фирмы Lorenz

Основные области применения бесконтактных тензодатчиков:

- различные испытательные стенды, в том числе в автомобильной промышленности;
- определение мощности на валу судового гребного винта;
- крутящий момент ветряных генераторов;
- крутящий момент бурильных колонн в буровых вышках;
- контроль момента валков в прокатных станах.



Ниже (рисунок 1.5) приведена схема установки. Световой поток от источника 3 поляризуется элементом 4, проходит через светофильтр 5 и, отражаясь от поверхности 8, направляется в кольцо 2, нанесенное на упругий вал 1. Отраженный световой поток попадает на анализатор 6 и далее на фотозаэлемент 7. По измерению тока фотозаэлемента производится измерение деформации участка вала.

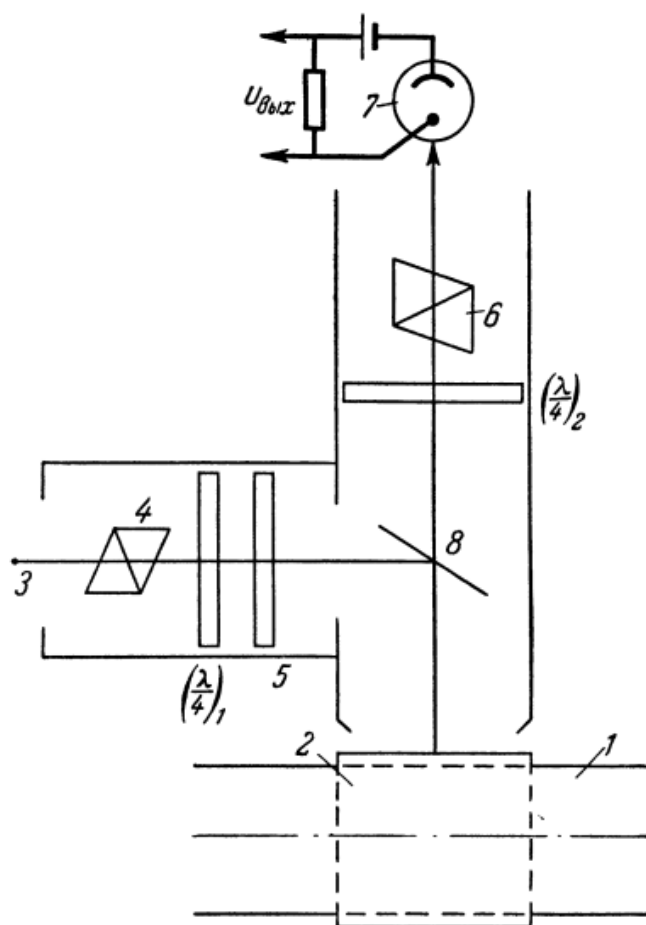


Рисунок 1.5 – Схема прибора с фотоупругим преобразователем

Достоинства:

- возможность измерения момента на высоких скоростях;
- устойчивость к превышениям предела измерений;
- высокая помехоустойчивость.

Недостатки:

- невысокая точность;
- сложность установки [1].

### 1.5 Магнитоупругие датчики

При деформации ферромагнетиков их доменная структура изменяется, что вызывает изменение и электромагнитных свойств самого материала. Этот эффект называется магнитоупругость.

Магнитоупругость возникает и на валу при приложении к нему крутящего момента. Изменение приложенного электромагнитного поля под действием данного эффекта может быть зафиксировано и, тем самым, может быть зафиксирован крутящий момент.

МД состоит из одного кольца с четырьмя катушками, возбуждающими электромагнитное поле на чувствительном элементе, и двух колец с восемью измерительными катушками каждое, которые фиксируют изменение электромагнитного поля. При изменении электромагнитного поля на измерительных катушках образуется разность ЭДС, и так система понимает, что к чувствительному элементу приложено усилие [5].

Основные области применения магнитоупругих датчиков:

- датчики трансмиссии;
- датчики рулевого управления;
- аэрокосмические двигатели и управление полетами;
- торсиометры для гребных винтов в кораблестроении;
- привода прокатных станков;
- датчики боксования электропоездов и электровозов.

#### Достоинства:

- обеспечение бесконтактного контроля момента;
- отсутствие необходимости крепления непосредственно на вал;
- простота конструкции;
- отсутствие необходимости калибровки датчика в течение всего срока эксплуатации;
- возможность увеличения воздушного зазора между датчиком и валом, что позволяет использовать его в нестабильных системах, где присутствует биение вала или провисание его под нагрузкой.

#### Недостатки:

- при проектировании необходимо учитывать материал вала;
- невозможно различить какой тип момента прикладывается к валу [1].

### 1.6 Примеры применения в технологических процессах

Ниже описаны примеры технологических процессов, в которых необходимо контролировать крутящий момент:

- 1) контроль момента стартера дизель-генератора [1];
- 2) при работе тяговых электродвигателей сильное превышение динамического момента может приводить к пробуксовкам ведущих колес [1];
- 3) в электрических шуруповертах превышение крутящего момента может вызывать срыв резьбы при закручивании крепежных элементов, а также повреждение самого крепежного элемента [1];
- 4) контроль крутящего момента также важен в бурильных установках. Его превышение может привести к скручиванию и обрыву колонны бурильных труб. Кроме того, измерение крутящего момента в сочетании с измерением осевой нагрузки позволяет судить о состоянии скважин, о характере разбуриваемых пород и о техническом состоянии породоразрушающего инструмента [6];



5) информация о крутящих моментах на валах механизмов карьерных экскаваторов необходима как для оценки степени загрузки экскаваторных механизмов в различных режимах работы, так и для создания систем ограничения и автоматического регулирования нагрузок [7];

6) крутящий момент на валу прокатного стана является важнейшим энергосиловым технологическим параметром, который характеризует процесс прокатки, определяет его энергетику и загрузку оборудования. С помощью измерения момента на валах клетей и механизмов прокатного стана обеспечивается технологический контроль работы стана и создается возможность его автоматизации [7];

7) контроль упора гребного винта. В реальных условиях при движении судов и других водных транспортных средств, из-за процессов, происходящих при контакте гребного винта и воды, возникает необходимость контроля упора (силы, толкающей судно вперед). Контроль крутящего момента на валу гребного винта необходим для определения мощности, потребляемой винтом. Кроме того, при наличии сведений о крутящем моменте, появляется возможность контроля потерь вследствие образующегося встречного потока и бурления воды в месте контакта. За счет этого возможно отслеживание возможного ухудшения КПД и поиска путей для повышения экономичности существующей системы [8][9];

8) Контроль момента поворота рулевого колеса в автомобилях с системой электроусилителя руля. Чем больше усилие прикладывает водитель к рулевому колесу (создает крутящий момент), тем больше должно быть дополнительное усилие со стороны усилителя руля. Величину крутящего момента на рулевом колесе оценивает датчик крутящего момента [10].

## 2 СРАВНЕНИЕ ИСХОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДАТЧИКА

Перед началом проектирования математической модели, а также до определения путей улучшения системы контроля крутящего момента на базе бесконтактного магнитоупругого датчика (БМД) необходимо выбрать его конструктивное устройство и схему подключения. БМД может быть выполнен в нескольких вариантах, и, чтобы определить наиболее подходящий для дальнейшего проектирования, нужно исследовать все типы датчика, наглядно увидеть их особенности и недостатки.

### 2.1 Разновидности МД

Магнитоупругие датчики крутящего момента (МД) конструктивно могут быть выполнены различными типами. Каждый тип имеет свои достоинства и недостатки и в разной степени точности отвечают на изменение механического усилия.

В данном разделе мы произведём моделирование и проверку основных конструктивных типов МД, их сравнение и определение наилучшей модели для использования в реальных технологических процессах.

Моделирование и сравнение произведём в программной среде ANSYS Maxwell.

По структуре датчик может быть выполнен как:

- кольцевой: кольца измерения и возбуждения расположены вдоль вала симметрично относительно друг друга, а явно выраженные полюса равномерно распределены вдоль поверхности вала, полностью огибая его по периметру (рисунок 2.);
- крестовой: рамы возбуждающих и измерительных полюсов расположены перпендикулярно друг другу поперек и вдоль вала соответственно и имеют по 2 явно выраженных полюса (рисунок 2.2).

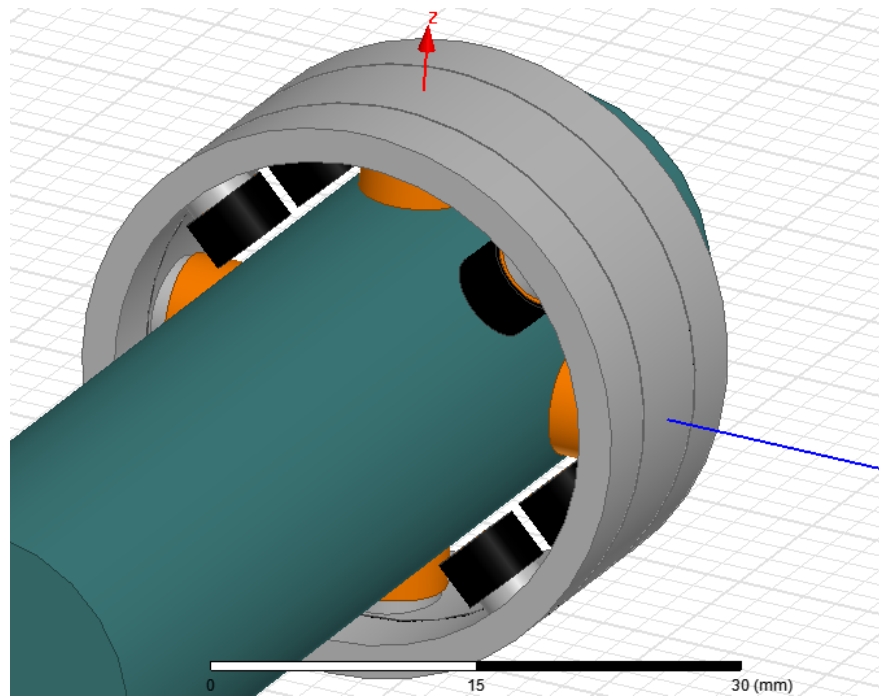


Рисунок 2.1 – Структура кольцевого МД

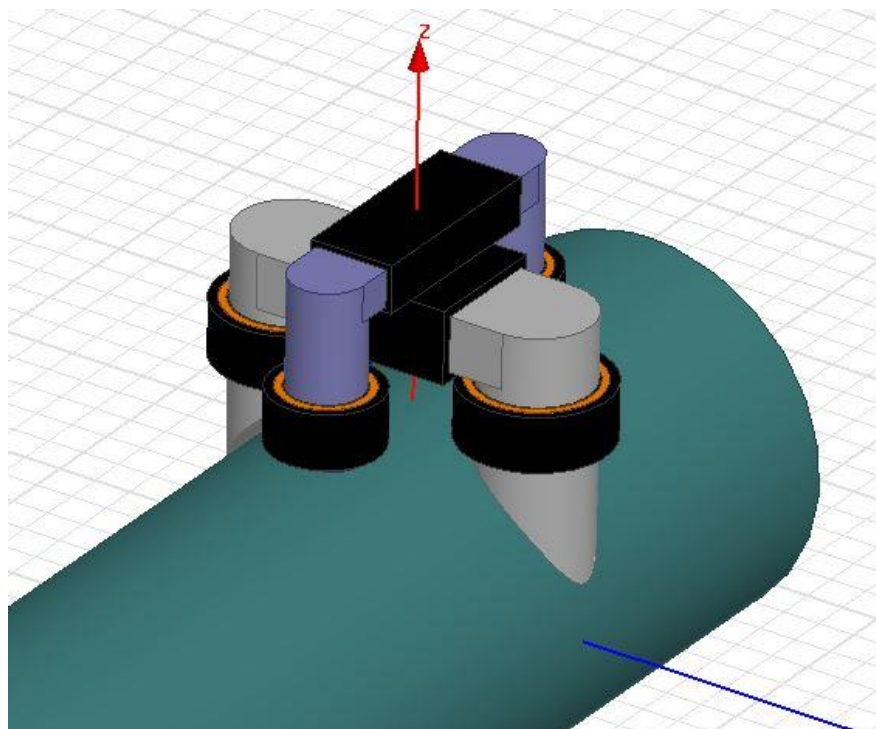


Рисунок 2.2 – Структура крестового МД

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Также датчики могут отличаться схемами соединения измерительных катушек:

- однополюсные: между каждыми двумя возбуждающими полюсами поперек вала находятся по 2 измерительные катушки;
- с удвоенным количеством полюсов: между каждыми двумя возбуждающими полюсами поперек вала находятся по 4 измерительные катушки.

В кольцевой форме однополюсного датчика измерительные катушки соединяются в контуры 1-го и 2-го кольца, а выходное напряжение формируется на клеммах этих контуров (рисунок 2.3).

В кольцевых датчиках с удвоенным количеством полюсов катушки на кольцах соединены крест-накрест и так же формируют два контура (рисунок 2.4).

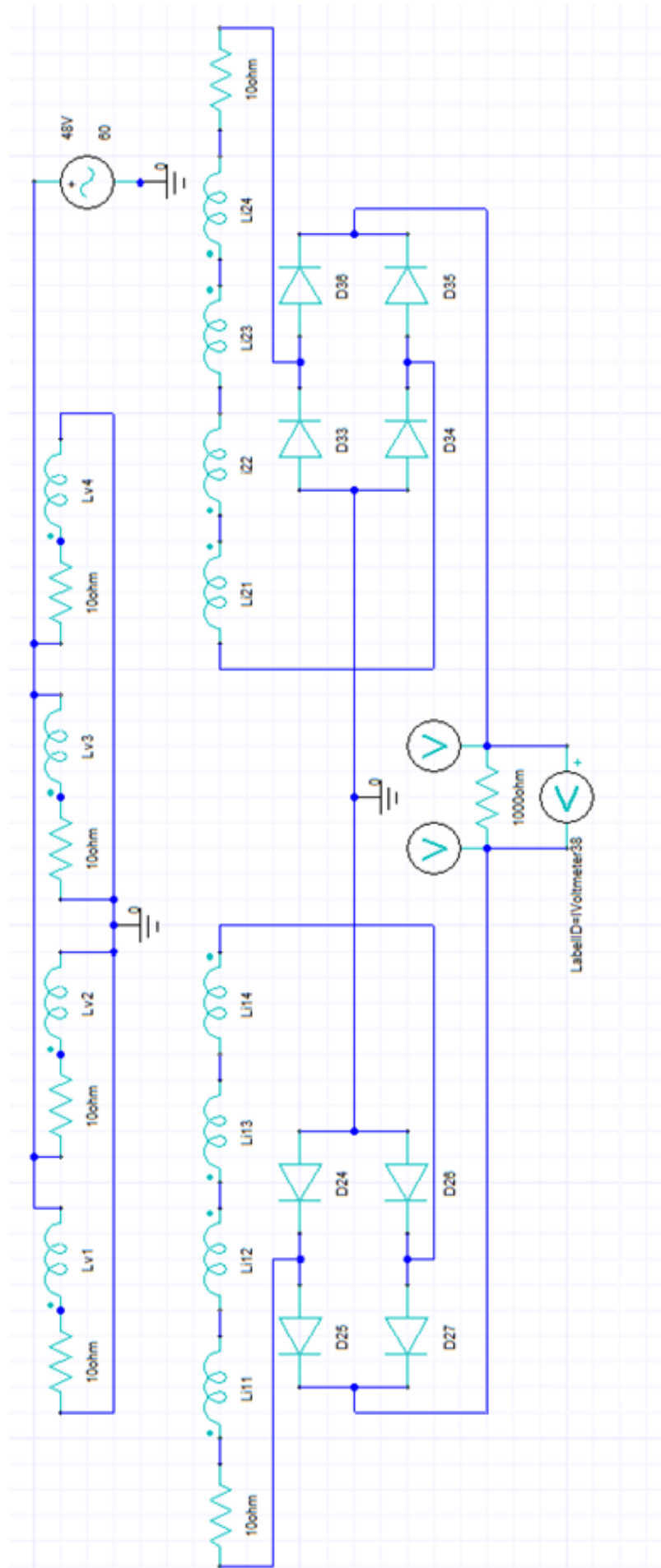


Рисунок 2.3 – Схема соединения катушек однополюсного кольцевого датчика в подпрограмме *Circuit Editor*

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

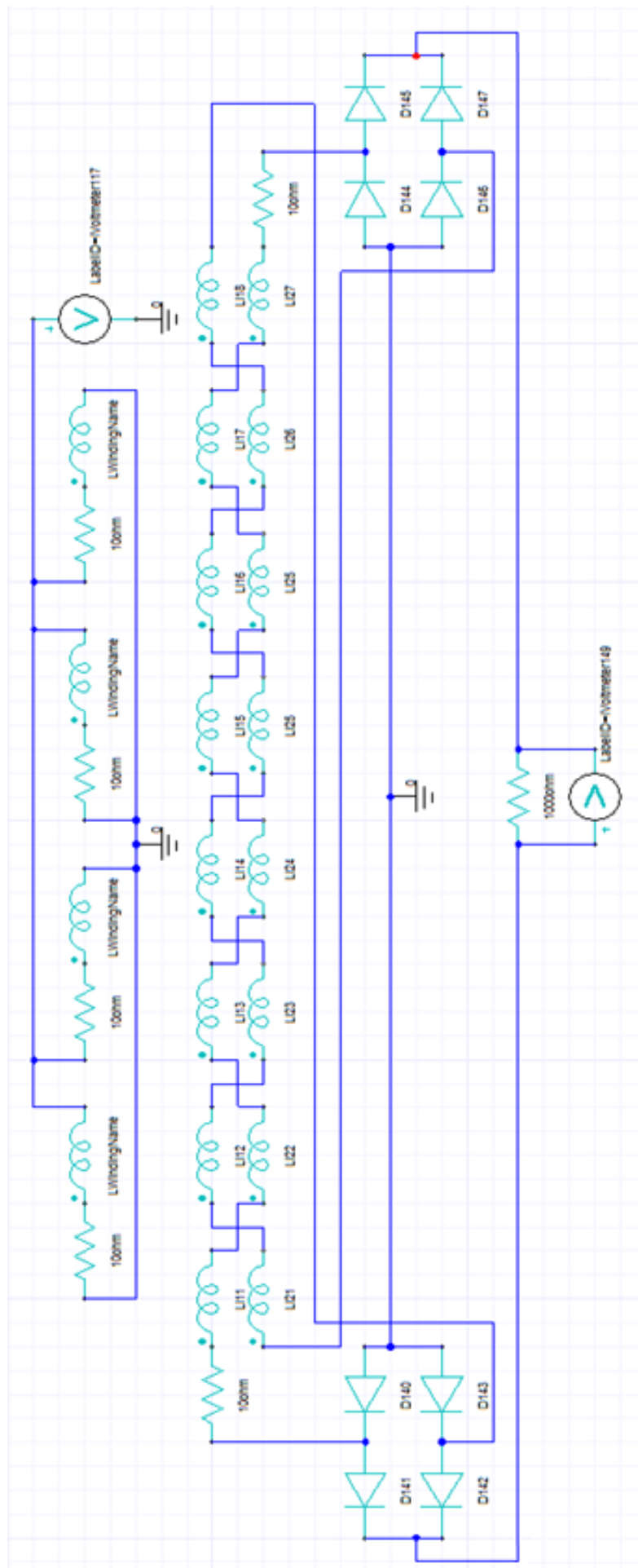


Рисунок 2.4 – Схема соединения катушек кольцевого датчика с удвоенным количеством полюсов в подпрограмме *Circuit Editor*

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Метод соединения катушек удвоением количества полюсов позволит существенно повысить помехоустойчивость прибора, поскольку внешний воздействующий сигнал должен одинаково воздействовать на оба контура и при вычитании - сократиться. Это свойство является весьма полезным для датчика в реальных технологических процессах, поэтому в качестве дополнительно исследуемых моделей были построены крестовой (рисунок 2.5) и кольцевой (рисунок 2.6) датчики с удвоенным количеством измерительных полюсов:

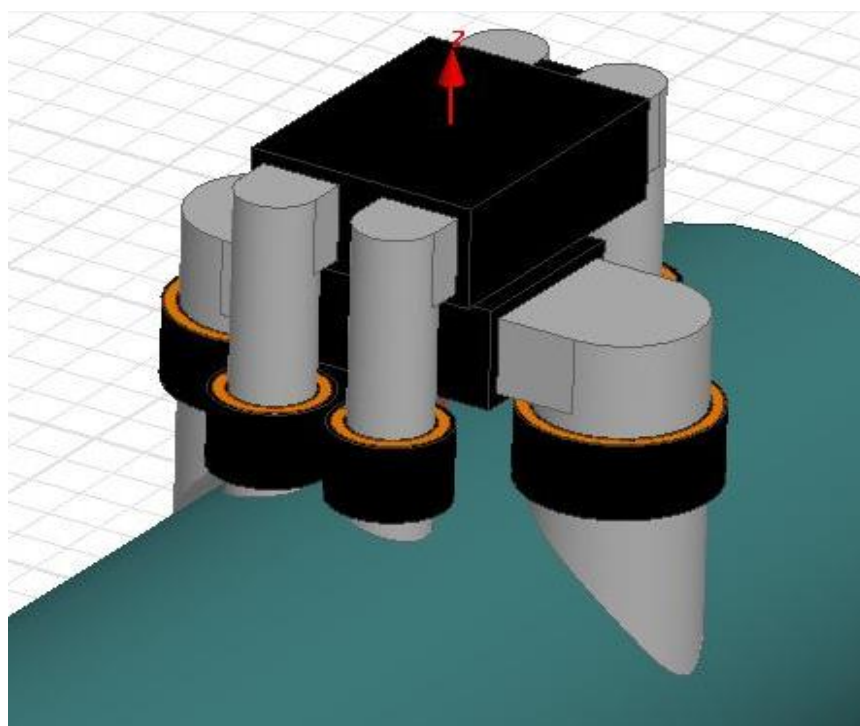


Рисунок 2.5 – Модель крестового МД с удвоенным количеством полюсов

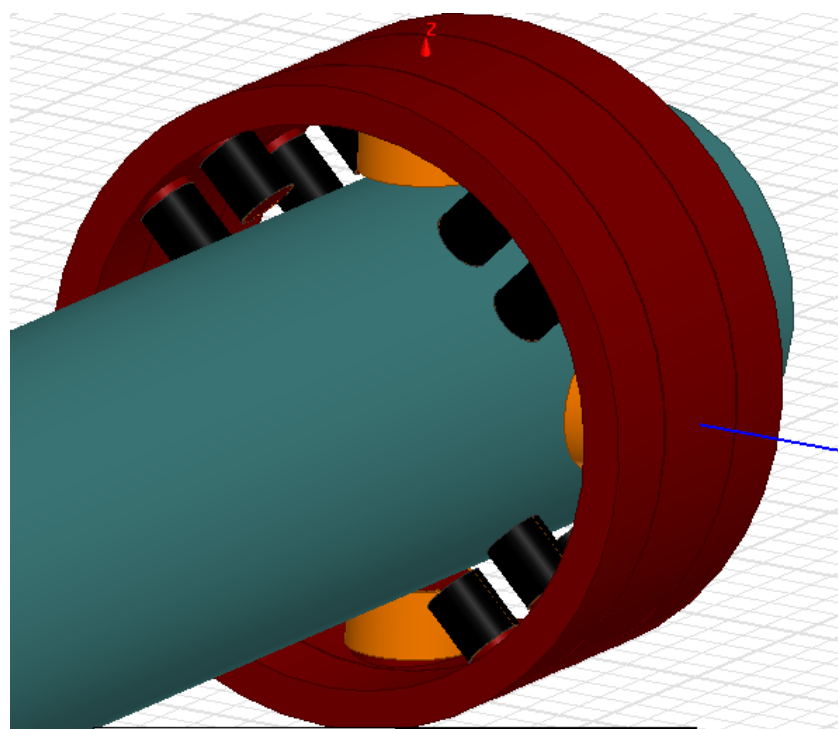


Рисунок 2.6 – Модель кольцевого МД с удвоенным количеством полюсов

## 2.2 Картины полей и характеристики

Для каждой модели были получены картины магнитных полей, а также приведены показания вольтметра на выходе схемы для проверки реакции устройства на изменение момента. К валу каждой модели приложен одинаковый момент, а расчеты проводятся для одних и тех же временных отрезков. Таким образом, каждая система находится в равных условиях.

Ниже приведены картины магнитных полей, проецируемые на вал моделями датчиков: крестового однополюсного (рисунок 2.7), крестового с удвоенным количеством полюсов (рисунок 2.8), кольцевого однополюсного (рисунок 2.9) и кольцевого с удвоенным количеством полюсов (рисунок 2.10).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



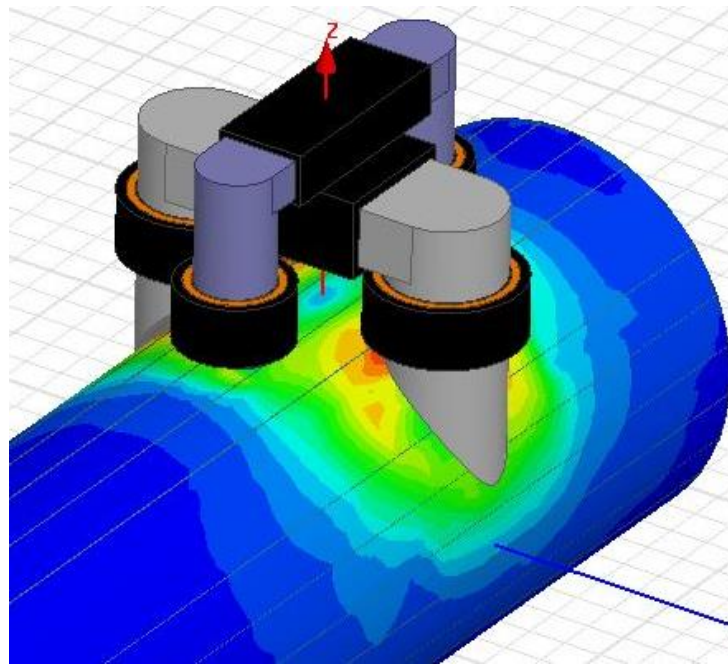


Рисунок 2.7 – Картины магнитных полей на валу крестового однополюсного МД

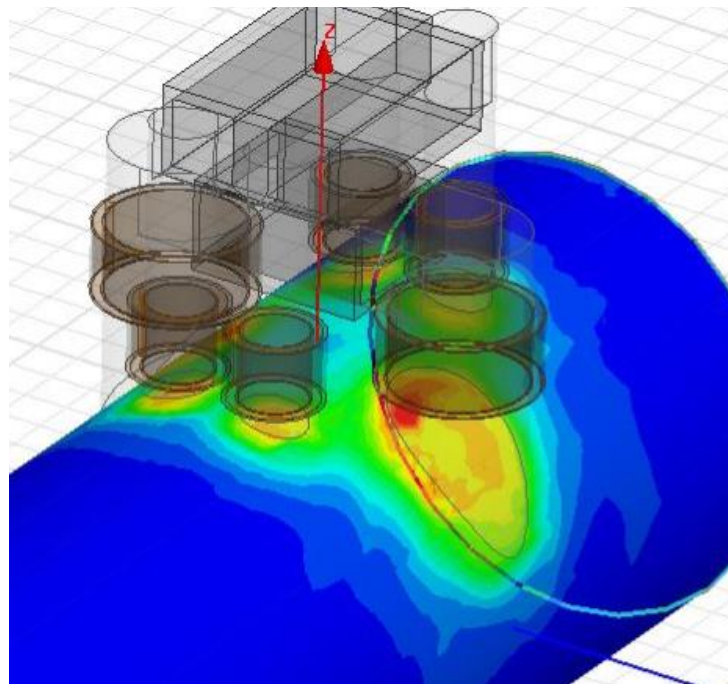


Рисунок 2.8 – Картины магнитных полей на валу крестового МД с удвоенным количеством полюсов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ

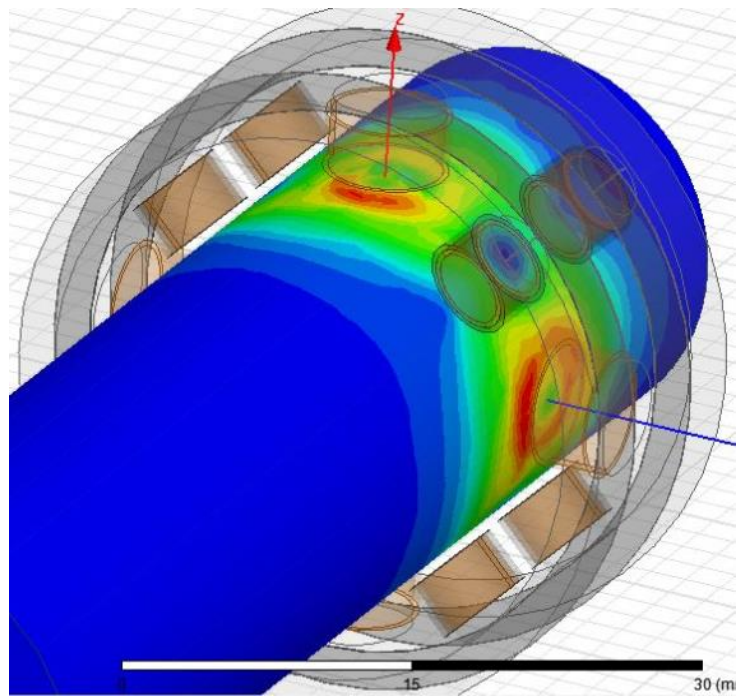


Рисунок 2.9 – Картины магнитных полей на валу кольцевого однополюсного МД

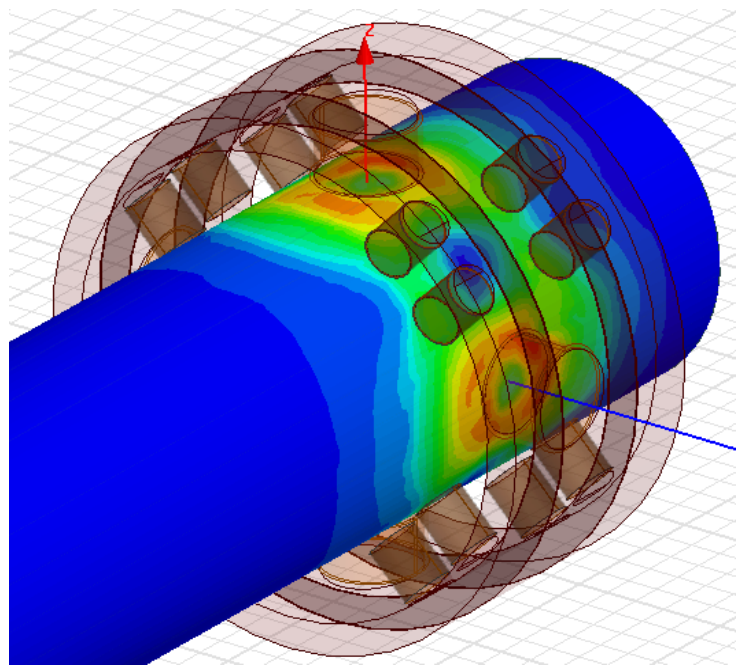


Рисунок 2.10 – Картины магнитных полей на валу кольцевого МД с удвоенным количеством полюсов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Построим графики зависимости напряжения на выходном вольтметре схем для всех четырёх типов датчика.

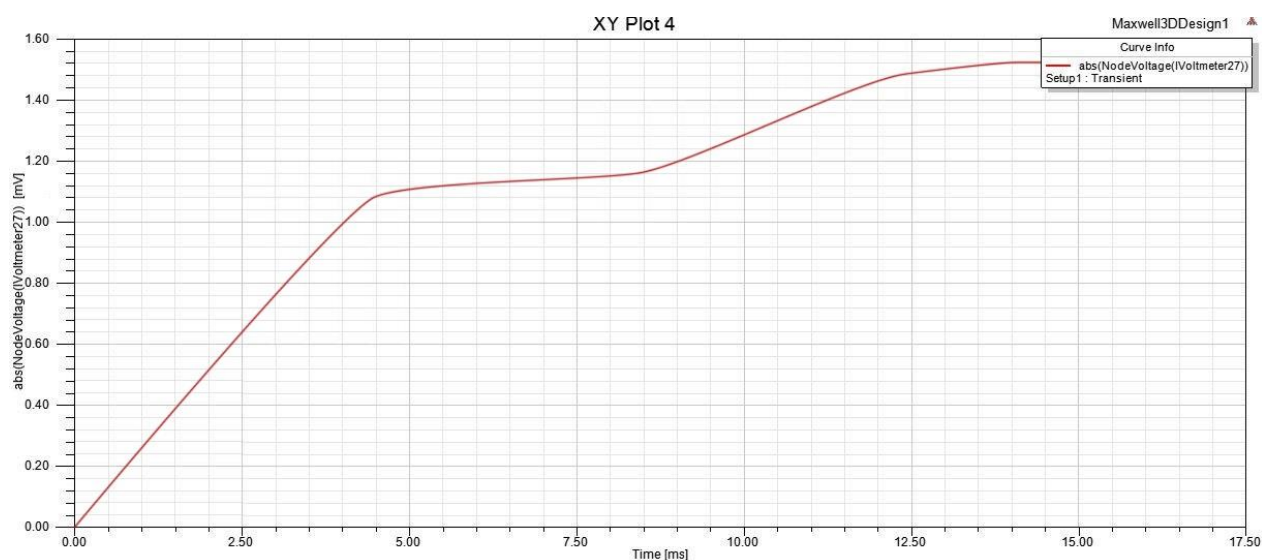


Рисунок 2.11 – Напряжение на выходном вольтметре для крестового однополюсного МД

По графику (рисунок 2.11) видно, что при нарастании крутящего момента действительно увеличивается напряжение выходного вольтметра, однако нарастание напряжения начинается в нулевой точке, при подаче питания на возбуждающие элементы. В связи с этим, система может не отличить резкое возрастание крутящего момента от переходного процесса в электрической цепи.

Кроме того, напряжение увеличивается неравномерно в выбранных нами точках (темп нарастания напряжения на отрезке 0-4.17 мс гораздо выше, чем на отрезке 4.17-8.34 мс).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



Рисунок 2.12 – Напряжение на выходном вольтметре для крестового МД с удвоенным количеством измерительных полюсов

На рисунке выше (рисунок 2.12) напряжение нарастает более линейно, хотя так же, как и в прошлом случае, из нулевой точки. Стоит отметить, что значения напряжения очень малы, и требуется более интенсивное усиление выходного сигнала. В конечном итоге это может сказаться на точности устройства.



Рисунок 2.13 – Напряжение на выходном вольтметре для кольцевого однополюсного МД

При кольцевой конструкции датчика наблюдается задержка в появлении выходного сигнала (рисунок 2.13), что позволяет обнаружить наличие момента уже после переходных процессов в электрической цепи. В момент времени 8.34 мс отмечается скачок напряжения.

Начиная с отметки 12.5 мс, выходное напряжение перестает меняться. Это может быть связано с ограничением по времени во время испытания самой модели.

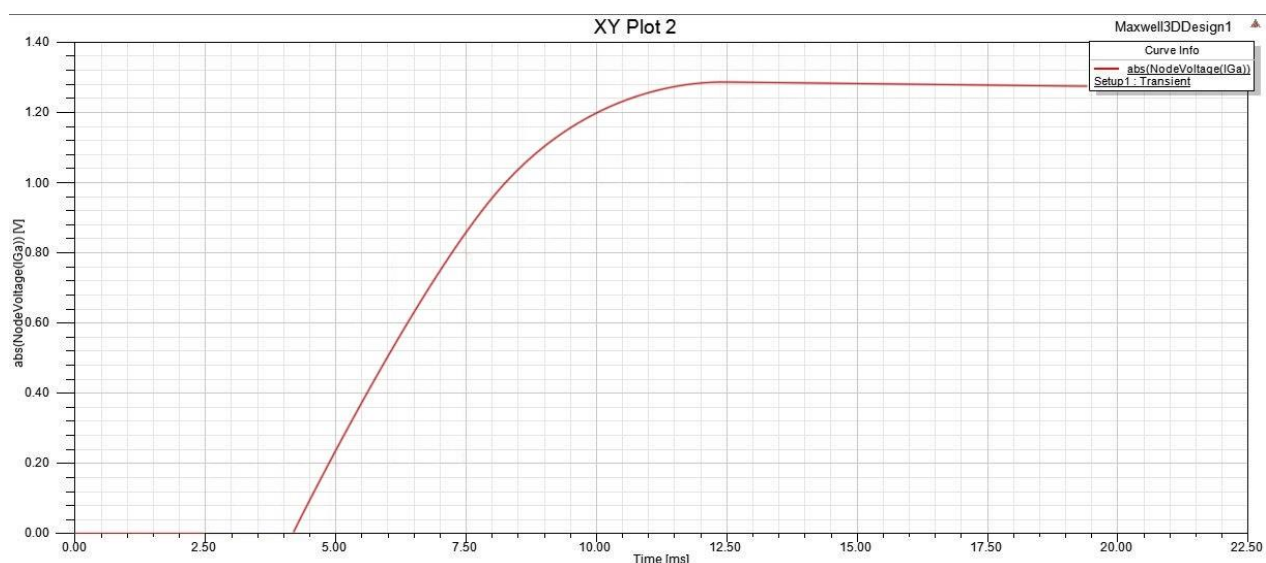


Рисунок 2.14 – Напряжение на выходном вольтметре для кольцевого МД с удвоенным количеством измерительных полюсов

Последний график (рисунок 2.14) отличается от предыдущего более закономерным нарастанием напряжения (без скачков). Такой вид графика более приемлем для оценки результатов измерения. Кроме того, схема с удвоенным количеством измерительных полюсов исключает из выходного сигнала нежелательное внешнее воздействие, а конструкция кольцевого датчика позволяет отслеживать изменение магнитных свойств материала по всему периметру отдельного участка вала, что позволяет более точно оценивать меру его механического скручивания крутящим моментом.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таким образом, кольцевой МД с удвоенным количеством измерительных полюсов является датчиком с наиболее выгодной конструкцией и электрической схемой для определения крутящего момента на валу. Однако, габаритные и электрические характеристики датчика (такие как диаметр, количество возбуждающих полюсов, количество витков в обмотках, напряжение и частота источника и т.п.) зависят от характеристик той системы, в которой датчик будет применяться. Иными словами, в каждом случае необходимо своё, уникальное устройство, сконструированное на базе кольцевого МД.

### 2.3 Программное обеспечение для расчёта датчика крутящего момента

Для того, чтобы свести к минимуму трудозатраты при расчёте бесконтактного кольцевого магнитоупругого датчика крутящего момента с удвоенным количеством полюсов для каждого отдельного технологического процесса, встаёт вопрос об автоматизации данного расчёта.

В зависимости от системы, в которую внедряется датчик, при его расчёте меняются одни и те же физические величины, а сам расчёт проводится по одним и тем же формулам. В связи с этим было разработано специальное программное обеспечение, производящее нужные операции на основе вводимых данных.

Приложение представляет из себя окно, наполненное строками для задания всех необходимых параметров (рисунок 2.15). Данное окно поделено на 4 секции для сортировки вводимых значений наиболее удобным образом [11].





После ввода основных параметров необходимо нажать кнопку «*Calculate p*» (рассчитать  $p$ ). Программа предложит необходимое для данной системы количество полюсов, но окончательный выбор остаётся за пользователем. Ниже (рисунок 2.17) приведены примеры внешнего вида датчиков с разным количеством полюсов [11].

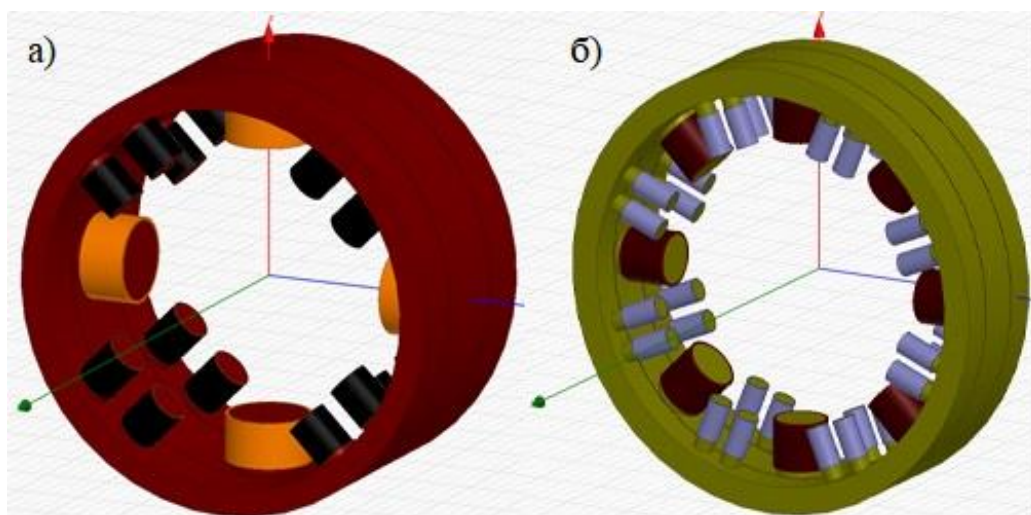


Рисунок 2.17 – Примеры МД: а – с 4-мя полюсами; б – с 8-ю полюсами

### 2.3.2 Секция 2 – Конструктивные параметры

После выбора количества полюсов датчика  $p_{selected}$  переходим к секции выбора конструктивных параметров устройства (рисунок 2.18). В данной секции пользователь должен задать следующие величины:  $d$  – диаметр полюсов возбуждения;  $d_u$  – диаметр измерительных полюсов;  $beta$  – величина воздушного зазора;  $l$  – длина полюсов;  $b$  – диаметр ярма. После этого появится возможность расчёта общего диаметра измерительной части устройства [11].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



**Design parameters:**

d =  (mm) - exciting coil diameter

d u =  (mm) - detector coil diameter

beta =  (mm) - air gap

l =  (mm) - lenght of poles

b =  (mm) - base diameter

D base = 322.0 (mm) - sensor diameter

Рисунок 2.18 – Секция ввода конструктивных параметров

### 2.3.3 Секция 3 – Параметры электромагнитной цепи

В данной секции (рисунок 2.19) пользователю предстоит ввести: марку стали в выпадающем списке;  $w_{e\ selected}$  – выбранное число витков катушек возбуждения на основе предложенного;  $w_d$  – число витков измерительных катушек. После ввода данных параметров появится возможность расчёта тока в катушках [11].

**Parameters of electromagnetic circuit:**

Steel type of the shaft:

w e = 425.26021603 - number of conductors of exciting coil

w e selected =

w d =  - number of conductors of detector coil

I c = 0.404619713458 (A) - coil current

Рисунок 2.19 – Секция ввода параметров электромагнитной цепи

### 2.3.4 Секция 4 – Расчёт выходного напряжения

В последней секции (рисунок 2.20) пользователь сможет рассчитать выходное напряжение схемы датчика при вводе разных значений момента в активном поле ввода [11].

**Output voltage calculation:**

M =  (Nm) - shaft torque

E1 = 239.186306562 (V) - electromotive force of the first terminal

E2 = 239.932601512 (V) - electromotive force of the second terminal

U out= 0.746294949936 (V) - output voltage

Рисунок 2.20 – Секция расчёта выходного напряжения

### 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для проверки математической точности модели бесконтактного магнитоупругого датчика крутящего момента, а также исследовать его влияние на систему управления электроприводом, необходимо составить математическую модель этой системы.

Задачей математической модели для исследования влияния датчика систему в первую очередь будет являться поддержание номинального момента двигателя.

В качестве системы управления за основу возьмём двухконтурную систему подчинённого регулирования тиристорного электропривода постоянного тока, состоящую из звена регулирования тока и звена регулирования скорости. Звено регулирования тока будет перекалибровано в звено управления крутящим моментом.

Составление математической модели произведём в программной среде Matlab Simulink.

В общем случае обратная связь (например, по току) выполняется без добавления дополнительных блоков, передавая значение напрямую, поэтому можно сказать, что такая модель работает в условиях, приближенных к идеальным (с идеальным датчиком). Исходя из этого произведём исследование модели без добавления блока (с идеальным датчиком) и с добавлением блока, описывающего математический алгоритм передачи значений нашим магнитоупругим датчиком. Сравнение результатов этих исследований продемонстрирует влияние на систему разрабатываемого устройства.

#### 3.1 Выбор элементов математической модели

Основным требованием к элементам в системе является работа при значении номинального момента в пределах  $M_H = 500 \sim 700 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

### 3.1.1 Выбор электродвигателя

Исходя из заданных условий был выбран двигатель постоянного тока независимого возбуждения LAK 4180DA (рисунок 3.1). Данные двигателя приведены в таблице ниже (таблица 3.1)



Рисунок 3.1 – Внешний вид двигателя LAK 4180DA

Таблица 3.1 – Технические данные двигателя LAK 4180DA

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Величина
Мощность	$P_H$	кВт	112
Частота вращения	$n$	об/мин	1605
Ток якоря	$I_{\text{я}}$	А	280
Номинальный момент	$M_H$	Нм	669
Напряжение	$U_{\text{я}}$	В	440
Сопротивление обмотки якоря	$r_{\text{я}}$	Ом	0,69
Индуктивность обмотки якоря	$L_{\text{я}}$	мГн	2,3
Момент инерции якоря	$J_{\text{я}}$	кгм <sup>2</sup>	0,69
КПД	$\eta$	%	90
Ток возбуждения	$I_{\text{в}}$	А	10,36

Частота вращения электродвигателя:

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n}{60}; \quad (3,1)$$

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot 1605}{60} = 168,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Величина произведения номинального потока возбуждения на конструктивный коэффициент:

$$k\Phi_H = \frac{U_{\text{Я}} - I_{\text{Я}} \cdot r_{\text{Я}}}{\omega_H}; \quad (3,2)$$

$$k\Phi_H = \frac{440 - 280 \cdot 0,69}{168,08} = 1,468 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Номинальный момент на валу электродвигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad (3,3)$$

$$M_H = \frac{112000}{168,08} = 666,35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_{0H} = \frac{U_H}{k\Phi_H}; \quad (3,4)$$

$$\omega_{0H} = \frac{440}{1,468} = 299,73 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

### 3.1.2 Выбор тиристорного преобразователя

Выбор преобразователя осуществляется по номинальным значениям напряжения якоря и тока якоря выбранного двигателя, при этом:

$$U_{\text{НТП}} > U_{\text{ДН}}; \quad (3,5)$$

$$I_{\text{НТП}} > I_{\text{ДН}}. \quad (3,6)$$

Также необходимо удостовериться, что ток упора электродвигателя не превышает ток тиристорного преобразователя; а также обратить внимание на номиналы тока возбуждения двигателя и преобразователя.

Исходя из вышеперечисленных требований, выбираем тиристорный преобразователь MentorMP 350A4R (рисунок 3.3). Ниже приведены данные преобразователя (таблица 3.2) и схема его подключения (рисунок 3.2).

Таблица 3.2– Технические характеристики тиристорного преобразователя

Марка	Напряжение нагрузки $U_d$ , В	Ток нагрузки $I_d$ , А	Напряжение на входе $U_{ВХ}$ , В	Габарит	Ток возбуждения $I_B$ , А
MP350A4R	450	350	480	2А	8

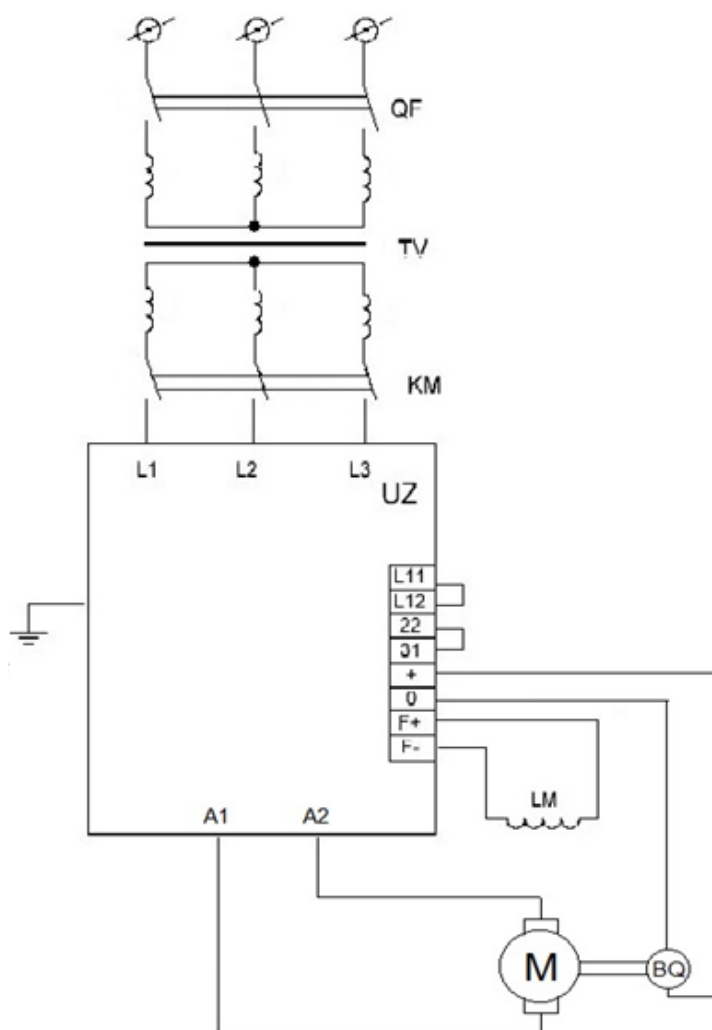


Рисунок 3.2 – Электрическая принципиальная схема подключения MentorMP



Рисунок 3.3 – Внешний вид MentorMP 350A4R

### 3.1.3 Выбор силового трансформатора

Силовой трансформатор, как правило, входит в комплект тиристорного преобразователя и выбирается по каталогам и справочникам на тиристорные электроприводы.

Требуемое минимальное напряжение на вторичной обмотке:

$$U_{2min} = U_{ян} \cdot \frac{K_R}{K_U \cdot (1 - \Delta U_c)}, \quad (3,7)$$

где  $K_R = 1,05$  – коэффициент, учитывающий падение напряжения за счет коммутации тиристоров, на активных сопротивлениях;

$K_U = 2,34$  – коэффициент трёхфазной мостовой схемы выпрямления.

$$U_{2min} = 440 \cdot \frac{1,05}{2,34 \cdot (1 - 0,1)} = 219,37 \text{ В.}$$

Для учёта нагрузки трансформатора, его необходимо выбрать с запасом по напряжению. Тогда условия выбора трансформатора:

$$S_{ТР} > P_{ТП}; \quad (3,8)$$

$$U_2 > U_{2min}. \quad (3,9)$$

Исходя из данных требований выбираем трансформатор ТСЗП-160/0.7-В. Технические характеристики трансформатора представлены в таблице ниже (Таблица 3.3).

Таблица 3.3– Технические характеристики трансформатора ТСЗП-160/0.7-В

Параметр	Значение
Напряжение на первичной стороне обмотки $U_1$ , В	380
Мощность трансформатора $P$ , кВА	158,9
Напряжение на вторичной стороне обмотки $U_2$ , В	350
Ток на вторичной стороне обмотки $I_2$ , А	262
Потери в опыте холостого хода $\Delta P_{хх}$ , Вт	670
Потери в опыте короткого замыкания $\Delta P_{кз}$ , Вт	2400
Напряжение короткого замыкания $U_K$ , %	3
Ток холостого хода $I_x$ , А	5.5

Произведём расчёт активного, индуктивного и полного сопротивления трансформатора для учёта влияния параметров его обмоток на основные элементы силовой цепи [12].

Полное сопротивление трансформатора:

$$z_{TP} = \frac{U_{2H} \cdot U_K^{\%}}{I_{2H} \cdot 100}; \quad (3,10)$$

$$z_{TP} = \frac{350 \cdot 3}{262 \cdot 100} = 0,04 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление трансформатора:

$$r_{TP} = \frac{P_{K3}}{3I_{2n}^2}; \quad (3,11)$$

$$r_{TP} = \frac{2400}{3 \cdot 262^2} = 0,012 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление трансформатора:

$$x_{TP} = \sqrt{z_{K3}^2 - r_{K3}^2}; \quad (3,12)$$

$$x_{TP} = \sqrt{0,04^2 - 0,012^2} = 0,038 \text{ Ом.}$$



Индуктивность обмотки трансформатора:

$$L_{\text{ТР}} = \frac{x_{\text{ТР}}}{2\pi f_{1\text{Н}}}; \quad (3,13)$$

$$L_{\text{ТР}} = \frac{0,038}{2\pi \cdot 50} = 0,122 \text{ мГн.}$$

Эквивалентное сопротивление, учитывающее снижение выпрямленного напряжения, вследствие коммутации между вентилями:

$$r_{\text{э}} = \frac{x_{\text{ТР}} \cdot m}{2\pi}; \quad (3,14)$$

$$r_{\text{э}} = \frac{0,038 \cdot 6}{2\pi} = 0,037 \text{ Ом.}$$

Проверим запас по напряжению, обеспечиваемый трансформатором, из условия, что:

$$E_{d0} > E_{\text{Д}} + \Delta U_1 + I_{\text{М}} \cdot R_{\text{Я}}, \quad (3,15)$$

где  $E_{d0}$  – ЭДС идеального холостого хода преобразователя;

$E_{\text{Д}}$  – ЭДС двигателя при максимальной скорости;

$\Delta U_1$  – снижение напряжения преобразователя вследствие колебаний сети;

$I_{\text{М}}$  – максимальный рабочий ток нагрузки;

$R_{\text{Я}}$  – суммарное сопротивление преобразователя и двигателя.

ЭДС идеального холостого хода преобразователя:

$$E_{d0} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\text{Л}} \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}; \quad (3,16)$$

$$E_{d0} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 350 \cdot \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 818,682 \text{ В.}$$

Примем  $\Delta U_{\text{с}} = 0,1$  – колебания напряжения сет, тогда просадка напряжения из-за колебаний сети:

$$\Delta U_1 = E_{d0} \cdot \Delta U_{\text{с}}; \quad (3,17)$$

$$\Delta U_1 = 818,682 \cdot 0,1 = 81,868 \text{ В.}$$

Дополнительное сопротивление обмоток трансформатора для трёхфазной мостовой схемы выпрямления:

$$R_{\text{ТР}} = 2 \cdot r_{\text{ТР}}; \quad (3,18)$$

$$R_{\text{ТР}} = 2 \cdot 0,012 = 0,024 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление преобразователя и двигателя:

$$R_{\text{я}} = R_{\text{ТР}} + r_{\text{я}} + r_{\text{з}}; \quad (3,19)$$

$$R_{\text{я}} = 0,024 + 0,09 + 0,037 = 0,151 \text{ Ом.}$$

ЭДС двигателя при максимальной скорости:

$$E_{\text{д}} = k\Phi_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{он}}; \quad (3,20)$$

$$E_{\text{д}} = 1,468 \cdot 299,73 = 440 \text{ В.}$$

Максимальный ток нагрузки:

$$I_{\text{М}} = \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}} \cdot I_{\text{я}}. \quad (3,21)$$

Примем  $\frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}} = 1,5$  – изменение момента статической нагрузки в зависимости от номинального, тогда:

$$I_{\text{М}} = 1,5 \cdot 280 = 420 \text{ А.} \quad (3,22)$$

Произведём проверку:

$$E_{\text{а0}} > E_{\text{д}} + \Delta U_1 + I_{\text{М}} \cdot R_{\text{я}}; \quad (3,23)$$

$$818,682 \text{ В} > 440 + 81,868 + 420 \cdot 0,151;$$

$$818,682 \text{ В} > 585,288 \text{ В.}$$

Трансформатор прошёл проверку по запасу напряжения.

### 3.1.4 Выбор сглаживающего реактора

Определим необходимость выбора сглаживающего реактора, руководствуясь соотношением [12]:

$$L_{\text{ТРЕБ}} > \frac{kU_{\text{H}}}{I_{\text{H}}}, \quad (3,23)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент, при токах от 10 до 2500 А принимается равным 1,5.

Тогда соотношение примет вид:

$$L_{\text{ТРЕБ}} > \frac{1,5 \cdot 440}{280}; \quad (3,24)$$

$$L_{\text{ТРЕБ}} > 2,357 \text{ мГн.}$$

Полная индуктивность якорной цепи:

$$L_{\text{ЯЦ}} = L_{\text{ЯД}} + L_{\text{ДР}} + 2L_{\text{ТР}}; \quad (3,25)$$

$$L_{\text{ЯЦ}} = 2,3 + L_{\text{ДР}} + 2 \cdot 0,122 = L_{\text{ДР}} + 2,544 \text{ мГн.}$$

Так как полная индуктивность якорной цепи без учёта индуктивности выбираемого реактора выше требуемой индуктивности, выбор сглаживающего реактора не требуется [12].

### 3.2 Настройка параметров регуляторов

Как уже оговаривалось ранее, сперва необходимо составить классическую двухконтурную систему регулирования, в составе которой звено регулирования тока и звено регулирования скорости.

В системе необходимо обеспечить максимальное быстродействие для ограничения бросков тока (момента) при приложении нагрузки к валу двигателя. Исходя из этих соображений, в контуре регулирования тока (момента) выберем ПИ-регулятор.

В контуре регулирования скорости, для упрощения построения характеристик и ввиду отсутствия каких-либо требований к скорости, также выберем ПИ-регулятор.

Свойства тиристорного выпрямителя задаются звеном [12]:

$$W(p) = \frac{e^{-p\tau}}{1 + T_{\Pi}p}, \quad (3,26)$$

где  $T_{\Pi} = 0,002\text{с}$  – постоянная времени фильтра;

$\tau$  – время чистого запаздывания, с.

Время  $\tau$  определяется по формуле:

$$\tau = \frac{1}{f \cdot m}; \quad (3,27)$$

$$\tau = \frac{1}{50 \cdot 6} = 0,003 \text{ с.}$$

При частотах  $\omega < \frac{1}{\tau}$  звено чистого запаздывания можно заменить апериодическим звеном:

$$e^{-p\tau} = \frac{1}{1 + \tau p}. \quad (3,28)$$

Тогда получится структурная схема, представленная ниже (рисунок 3.4).

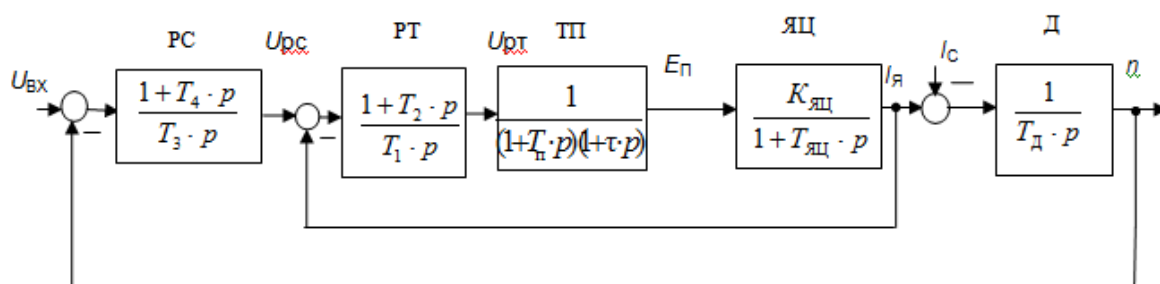


Рисунок 3.4 – Структурная схема электропривода

Передаточная функция регулятора тока имеет вид:

$$W(p) = \frac{1 + T_2 p}{T_1 p}. \quad (3,29)$$

Структурная схема регулирования тока представлена ниже (рисунок 3.5).

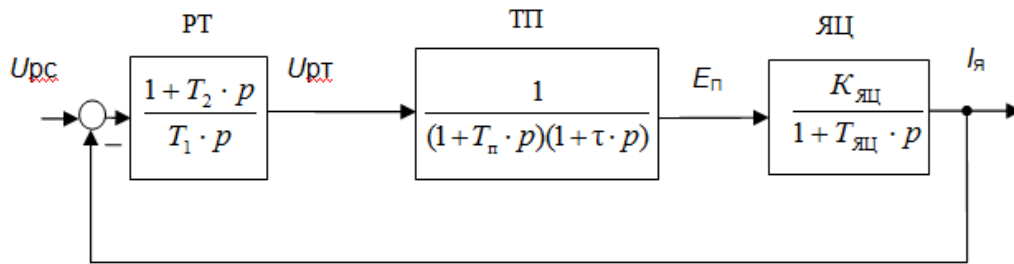


Рисунок 3.5 – Структурная схема контура регулирования тока

Рассчитаем постоянные времени и коэффициенты для построения структурной схемы электропривода.

Механическая постоянная времени  $T_D$  двигателя [12]:

$$T_D = (J_D + J_M) \cdot \frac{\omega_H}{M_H}. \quad (3,30)$$

Примем отношение момента инерции механизма в долях от момента инерции двигателя  $\frac{J_M}{J_D} = 1,4$ .

$$T_D = (0,69 + 1,4 \cdot 0,69) \cdot \frac{168,08}{666,37} = 0,418 \text{ с.}$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{Я} = \frac{L_{ЯЦ}}{R_{Я}} = \frac{0,0025}{0,151} = 0,017 \text{ с.}$$

Кратность тока короткого замыкания:

$$K_{ЯЦ} = \frac{U_H}{I_H \cdot R_{ЯЦ}}; \quad (3,31)$$

$$K_{ЯЦ} = \frac{440}{280 \cdot 0,151} = 10,481.$$

Выберем постоянную времени  $T_2$ :

$$T_2 = T_{МАХ} = T_{Я} = 0,017 \text{ с.}$$

Расчётная постоянная времени  $T_{РТ}$ :

$$T_{PT} = \frac{T_1}{K_{ЯЦ}}. \quad (3,32)$$

Величина расчётной постоянной времени также вычисляется по формуле:

$$T_{PT} = (2 \dots 4) \cdot (T_{\Pi} + \tau). \quad (3,33)$$

Для большинства преобразователей  $T_{\Pi} = 0,002$  с, поэтому:

$$T_{PT} = 2 \cdot (0,002 + 0,003) = 0,01 \text{ с.}$$

Рассчитаем постоянную времени  $T_1$ :

$$T_1 = T_{PT} \cdot K_{ЯЦ}; \quad (3,34)$$

$$T_1 = 0,01 \cdot 10,481 = 0,105 \text{ с.}$$

Передаточная функция контура скорости имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{1 + T_4 p}{T_3 p} = \frac{1}{T_3 p} + K_{PC}. \quad (3,35)$$

Структурная схема КРС изображена ниже (рисунок 3.6).

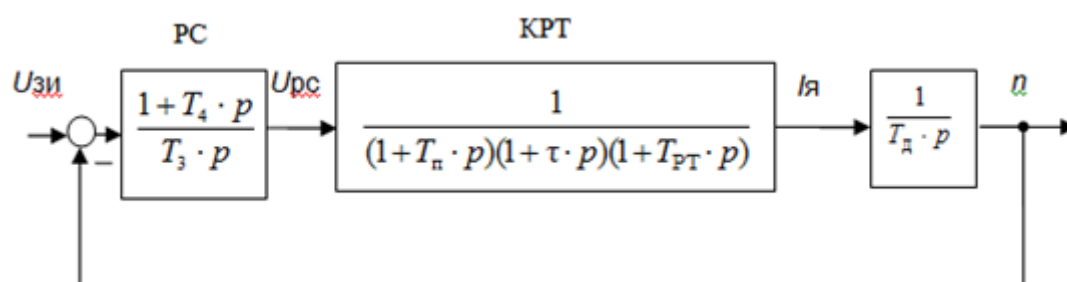


Рисунок 3.6 – Структурная схема контура регулирования скорости

Определим постоянную времени  $T_4$ :

$$T_4 = T_{MAX} = T_D = 0,418 \text{ с.}$$

Постоянную времени  $T_3$  можно определить:

$$T_3 = \frac{2 \dots 4}{\omega_c} = 0,08 \dots 0,25.$$

Примем  $T_3 = 0,14$ .

### 3.3 Контур управления моментом

Для того, чтобы сконфигурировать контур управления крутящим моментом из существующего контура регулирования тока, воспользуемся формулой соотношения тока и крутящего момента:

$$M_H = k\Phi_H \cdot I_H. \quad (3,36)$$

Вставив в нашу структурную схему звено  $k\Phi_H$  получим звено управления крутящим моментом. Необходимость перенастройки регуляторов определим опытным путём.

Итоговая структурная схема электропривода продемонстрирована ниже (рисунок 3.7).

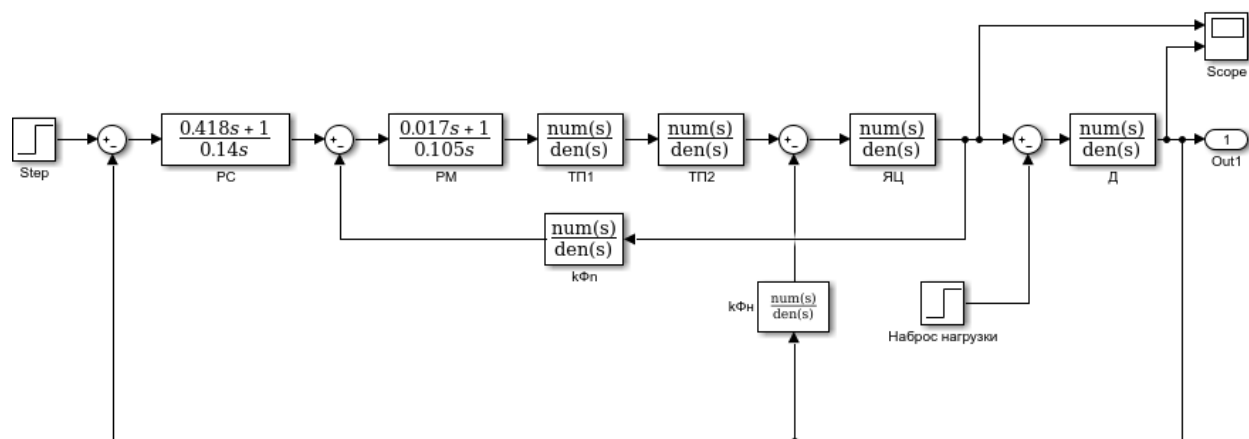


Рисунок 3.7 – Итоговая структурная схема электропривода

Следующим этапом будет проектирование в данной схеме бесконтактного магнитоупругого датчика крутящего момента.

Математическую модель датчика выразим звеном пользовательской функции MATLAB Function (рисунок 3.8). В данном блоке запишем математику обработки входного сигнала, полностью соответствующую обработке входного сигнала датчика (рисунок 3.9). Формулы для обработки сигнала возьмём из уже известного алгоритма расчёта датчика.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

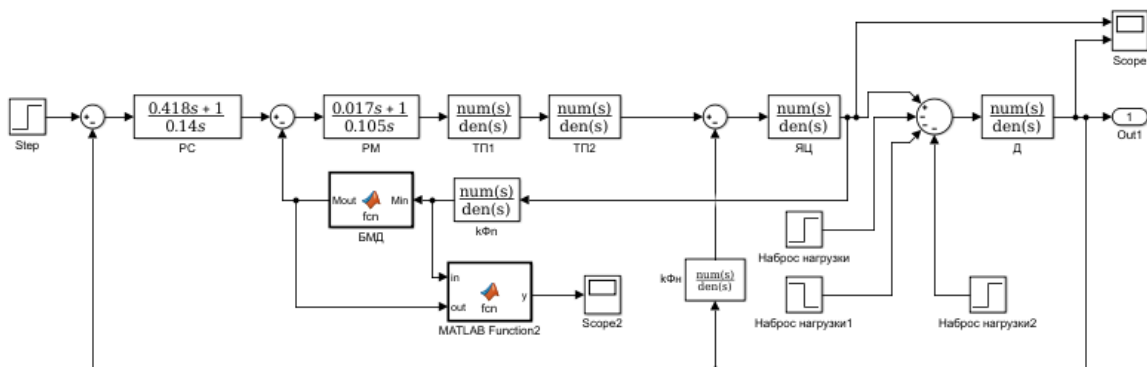


Рисунок 3.8 – Структурная схема с применением модели датчика

```

MUx1=MU+DELTAMU
MUy1=MU-DELTAMU

Xx1=sqrt(complex(MUx1/(GAMMA*fv)))
Xy1=sqrt(complex(MUy1/(GAMMA*fv)))

v=Xy1/Xx1

BETTA1=2*sqrt(v)/(v+1)
BETTA2=(v-1)/(v+1)

Uu1m=-1*log((cosh(pi*BETTA1*y0/(2*a))+sin(pi*(x0+BETTA2*y0)/(2*a)))/(cosh(pi*BETTA1*y0/(2*a))-sin(pi*(x0+BETTA2*y0)/(2*a))))*C
Uu2m=-1*log((cosh(-pi*BETTA1*y0/(2*a))+sin(pi*(x0-BETTA2*y0)/(2*a)))/(cosh(pi*BETTA1*y0/(2*a))-sin(pi*(x0-BETTA2*y0)/(2*a))))*C

OOu1m=(Uu1m+Uyau1)/(Rzi+2*pi)
OOu2m=(Uu2m+Uyau2)/(Rzi+2*pi)

Eu1m=2*3.14*fv*OOu1m*wu
Eu2m=2*3.14*fv*OOu2m*wu

E1m=2*pselected*Eu1m
E2m=2*pselected*Eu2m

Mout=real(kc*(E1m-E2m))
end

```

Рисунок 3.9 – Фрагмент кода обработки входного сигнала датчика в блоке MATLAB Function

### 3.4 Построение характеристик и проверка функционирования схемы

На данном этапе произведём построение характеристик переходных процессов двух полученных структурных схем (с датчиком и без). Результат их сравнения продемонстрирует правильность функционирования модели датчика, а также поможет определить его точность.

Ниже представлены временные характеристики для итоговой структурной схемы (рисунок 3.10) и для схемы с применением датчика (рисунок 3.11).



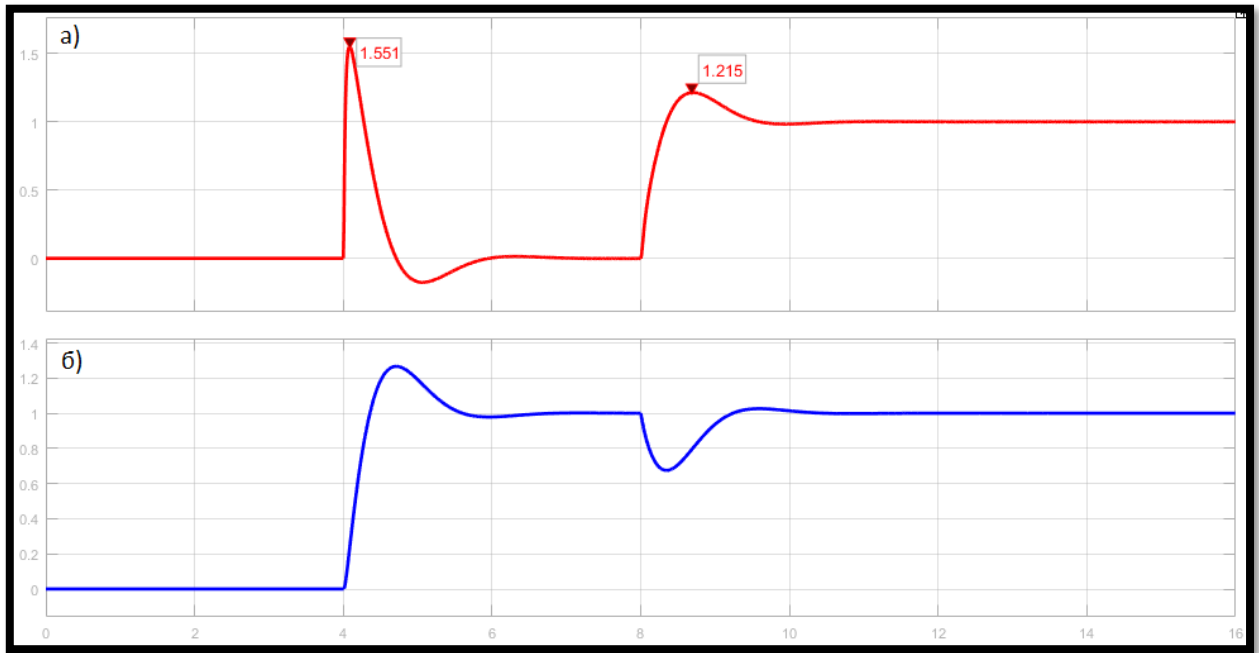


Рисунок 3.10 – Временные характеристики момента (а) и скорости (б) электропривода в системе без датчика

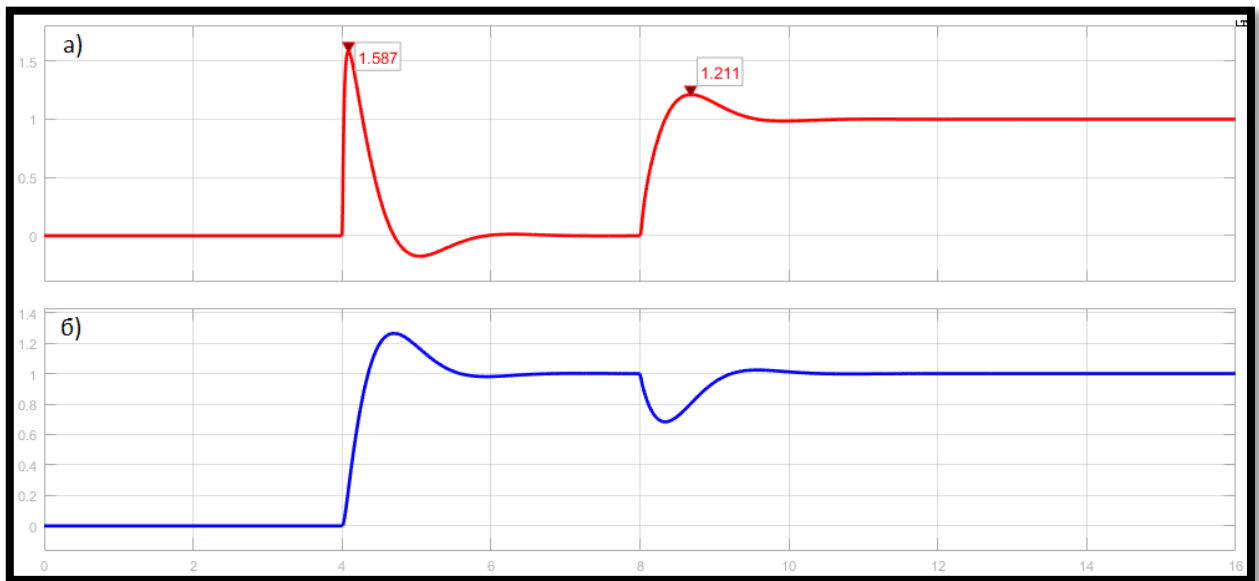


Рисунок 3.11 – Временные характеристики момента (а) и скорости (б) электропривода в системе с датчиком

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На графиках можно наблюдать 2 этапа в работе электропривода:

- разгон двигателя на 4-й секунде;
- наброс нагрузки на 8-й секунде.

По результатам на графиках стоит отметить, что пиковая нагрузка при разгоне двигателя ниже на 0,036 от номинального момента (23,99 Н·м) в системе без датчика, зато выше в той же системе на 0,004 от номинального момента (2,67 Н·м) при набросе нагрузки.

Отклонение в 0,036 составляет 2,3% отклонения для данного датчика, как и было заявлено при проектировании.

В целом, данные отклонения незначительны. Визуально же форма графиков практически идентична.

Построим механические характеристики двух схем (рисунок 3.14).

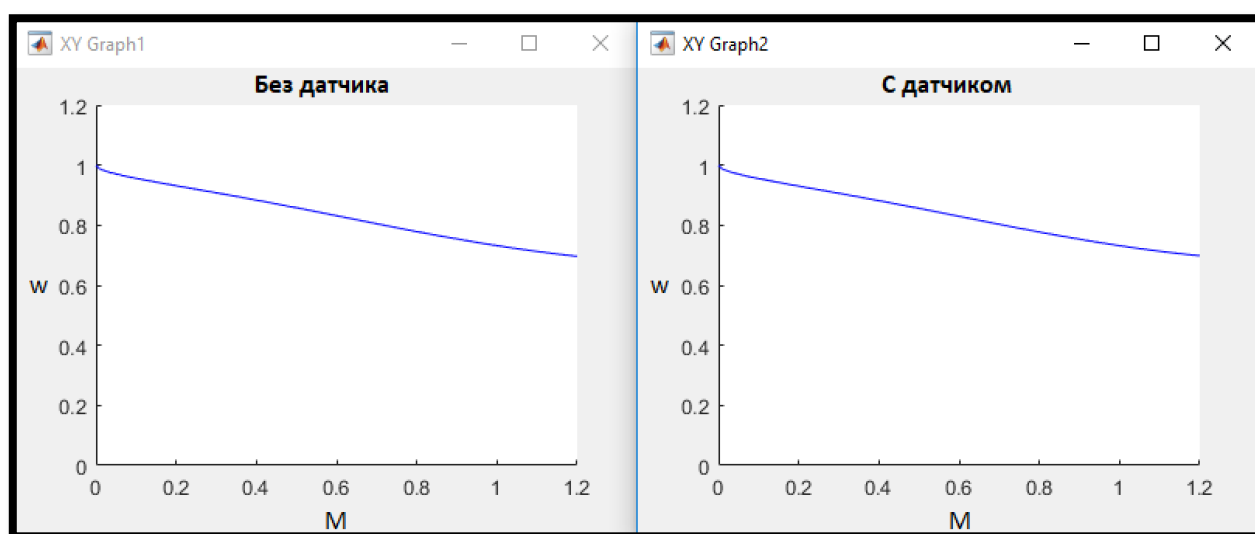


Рисунок 3.12 – Механические характеристики

Разности значений крутящего момента в разных временных точках продемонстрированы ниже (рисунок 3.13).

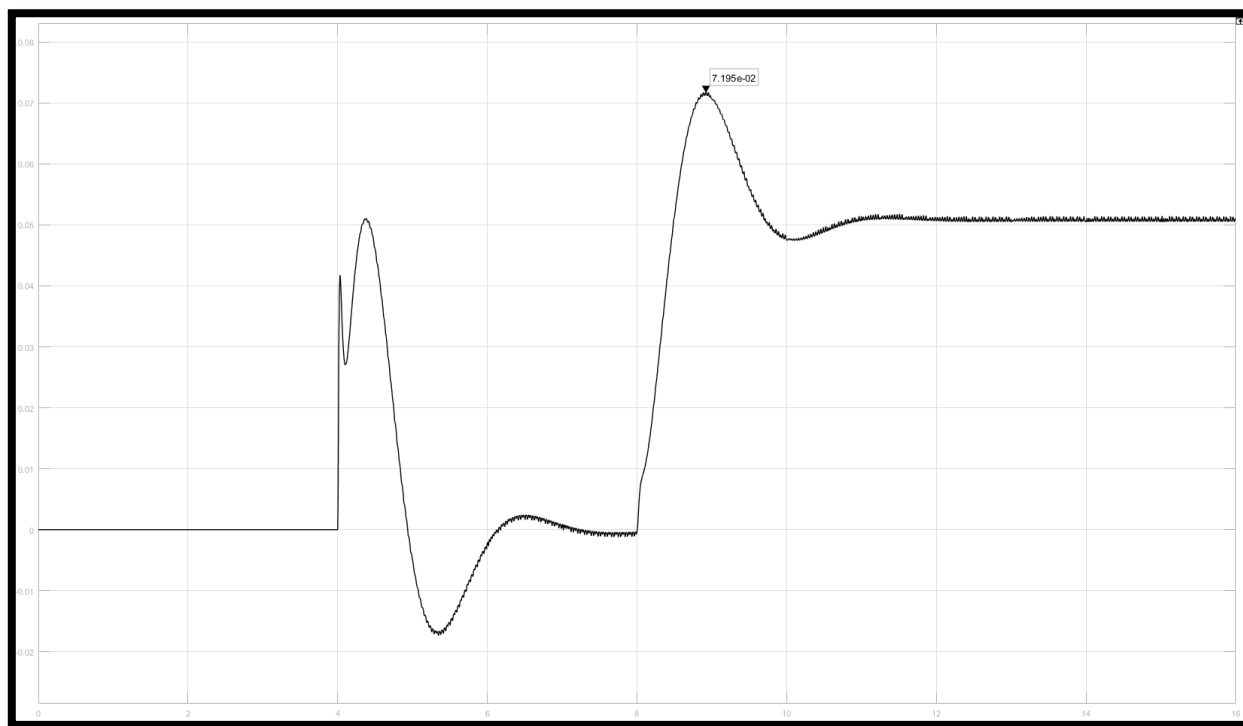


Рисунок 3.13 – График разности значений

Составим схему для выявления максимального искажения входящего сигнала датчиком (рисунок 3.14). График искажений представлен ниже (рисунок 3.15).

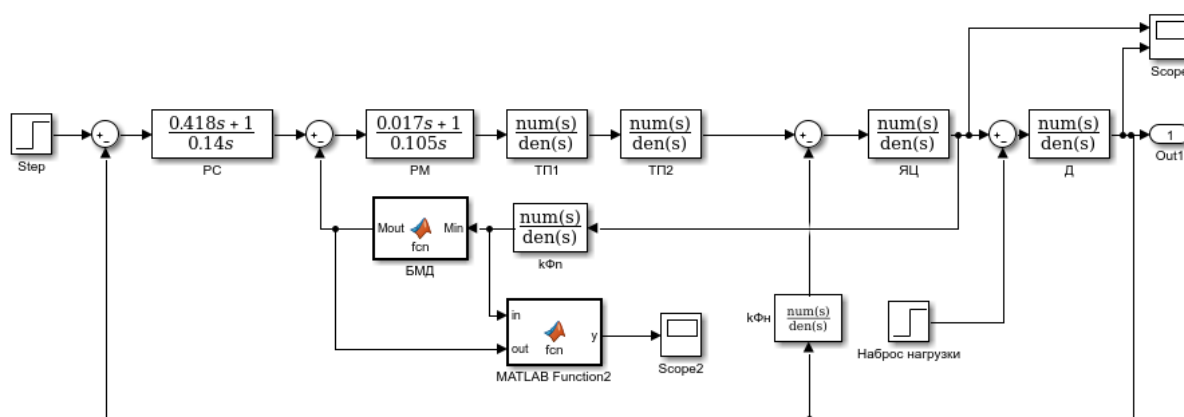


Рисунок 3.14 – Схема для выявления максимального искажения

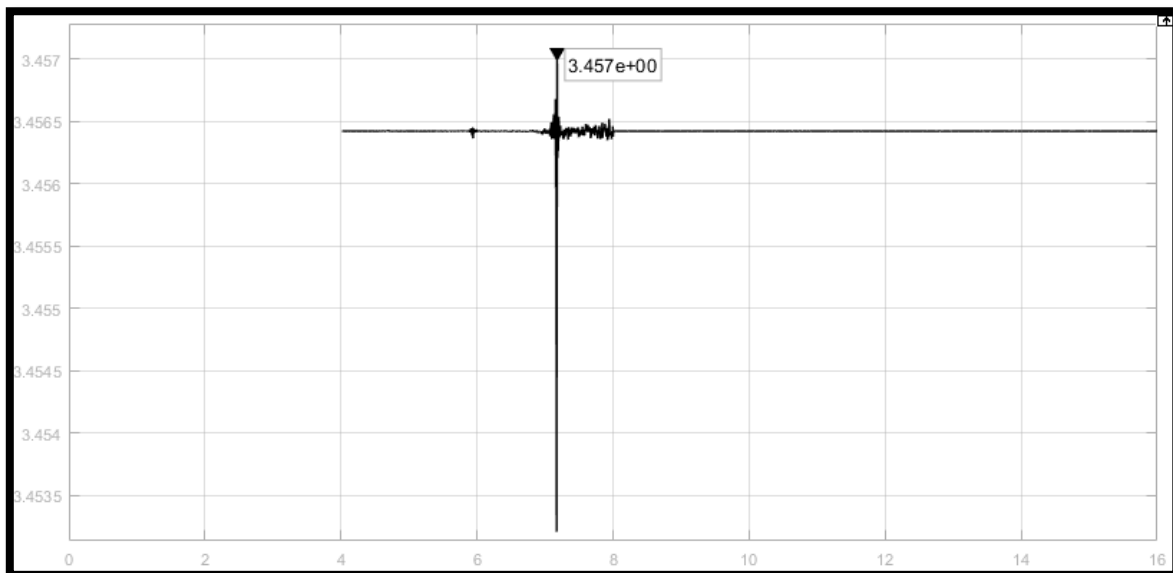


Рисунок 3.15 – График искажений значений датчиком

Из графика видно, что максимальное искажение на протяжении всего времени работы составляет 3,457%. Этот процент может быть уменьшен введением более точных коэффициентов в математическую модель, а также путём более точного расчёта физических явлений.

Составим для данных систем характеристики с большим числом набросов момента и сравним полученные результаты для анализа работоспособности датчика в изменяющихся условиях.

Характеристика сравнения крутящих моментов двух составленных схем представлена ниже (рисунок 3.16).

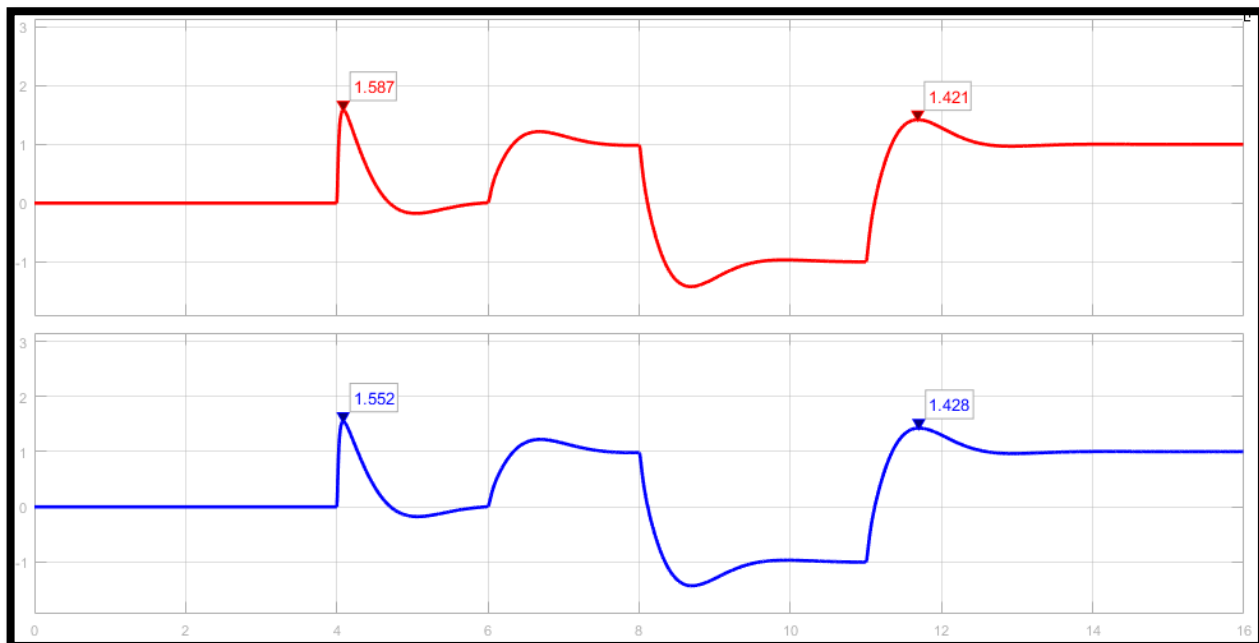


Рисунок 3.16 – Характеристики моментов двух систем: а – с датчиком; б – без датчика

Построим характеристики момента и скорости для данного режима работы в системе с датчиком (рисунок 3.17) и без датчика (рисунок 3.18).

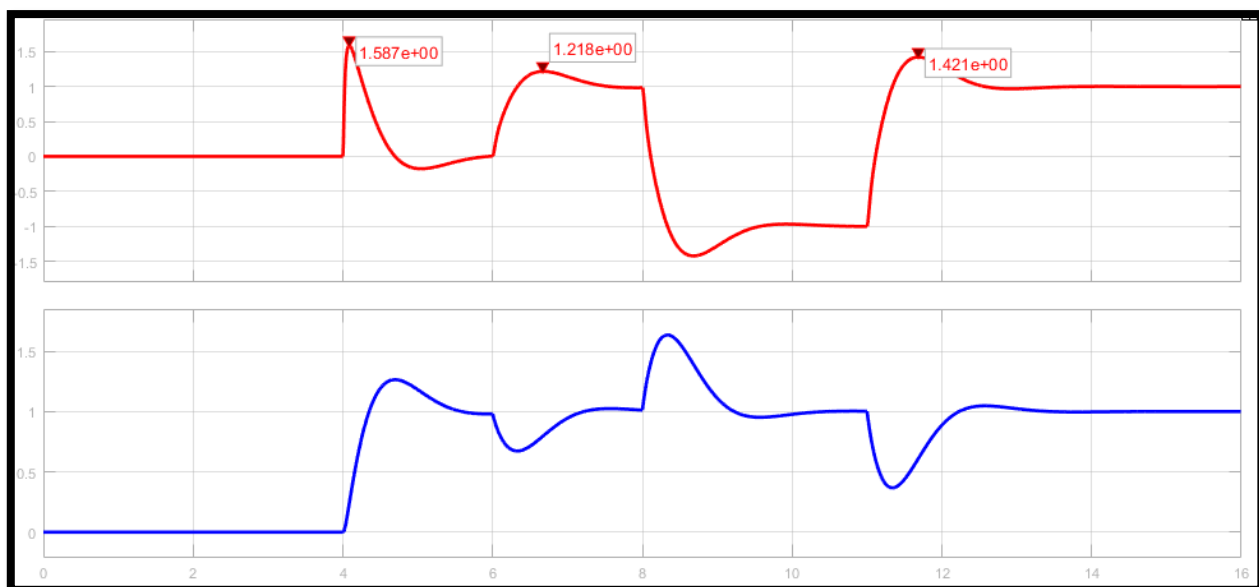


Рисунок 3.17 – Характеристики момента и скорости в системе с датчиком

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

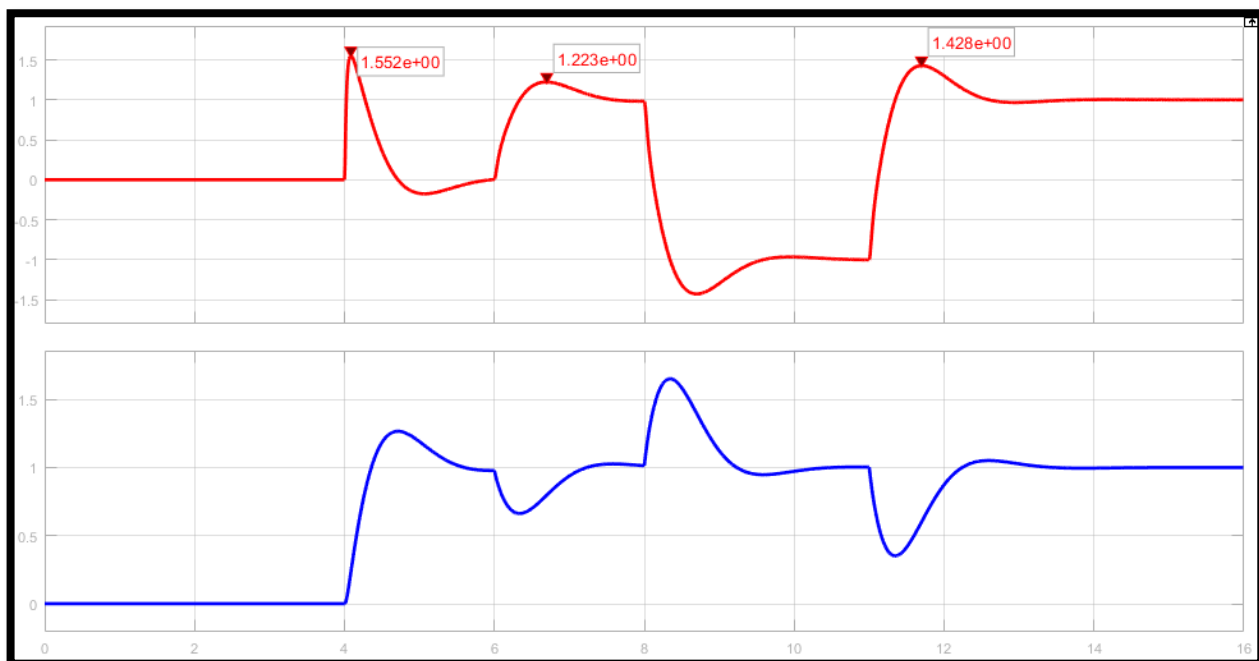


Рисунок 3.18 – Характеристики момента и скорости в системе без датчика

Данные графики наглядно демонстрируют незначительное отличие системы с датчиком от системы без датчика (идеальной с точки зрения математической модели). Это говорит о том, что система, в которой применяется бесконтактный магнитоупругий датчик крутящего момента, близка к идеальной с точки зрения математической модели.

Однако, математической модели не всегда бывает достаточно. Для исследования датчика в реальных условиях необходимо спроектировать опытный стенд, благодаря которому можно будет судить о применимости устройства в реальных технологических процессах.

## 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЫТНЫХ СТЕНДОВ

### 4.1 Проектирование простого стенда

Простой стенд будет представлять из себя участок вала, скручиваемый вручную или под действием сил тяжести при помощи грузов. По центру данного участка вала будет располагаться устройство БМД. Один из концов вала имеет консольную заделку в опору для исключения его прокручивания. Второй конец вала необходимо скручивать при помощи стержня для создания плеча.

Схематическое представление стенда приведено ниже (рисунок 4.1).

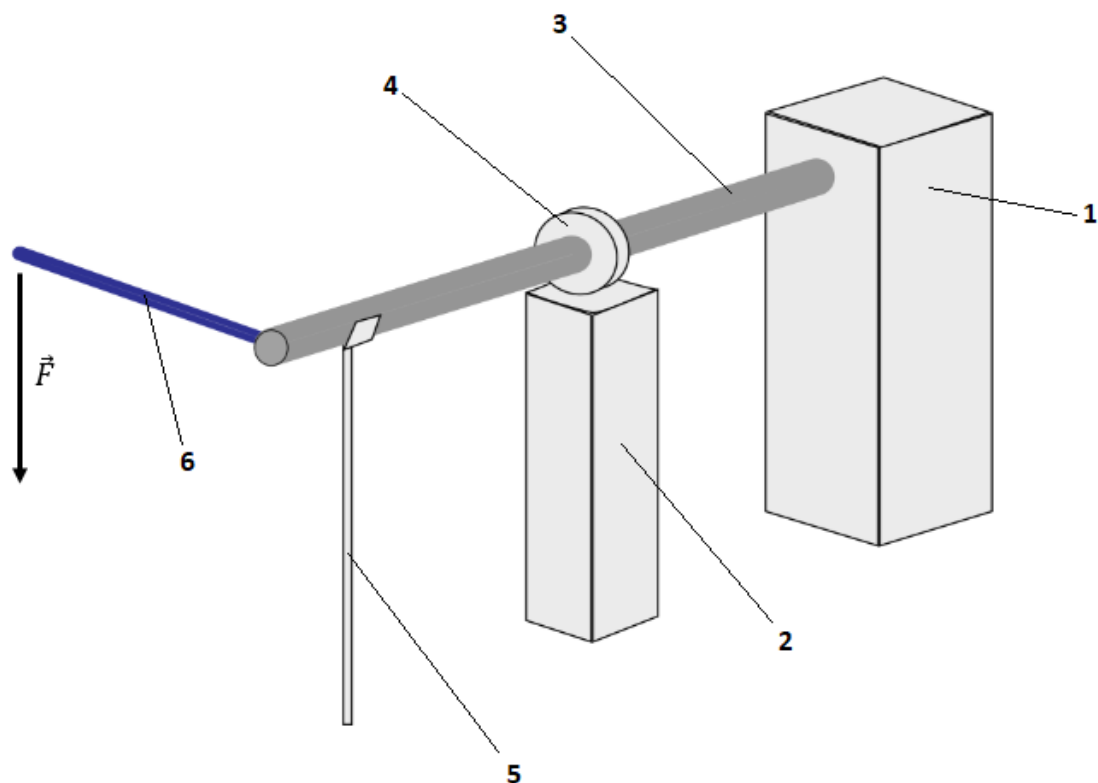


Рисунок 4.1 – Схематическое представление простого стенда

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На рисунке выше: 1 – основная опора для консольной заделки вала; 2 – вторичная опора для крепления БМД; 3 – исследуемый вал; 4 – БМД; 5 – опора для исключения прогиба вала; 6 – стержень для задания усилия (плечевой стержень).

Опора 5 выполнена таким образом, что исключает вертикальный прогиб вала, но не создаёт существенного статического момента при его скручивании. Диаметр исследуемого вала 3 выберем равным 70 мм.

Усилие  $\vec{F}$  может задаваться как вручную, так и при помощи грузов. Во втором случае на свободном конце предусматривается крепление ещё одного стержня перпендикулярно вниз. На нижнем конце этого стержня заглушка, на которую необходимо складывать груз. Схематическое изображение данного стержня представлено ниже (рисунок 4.2).

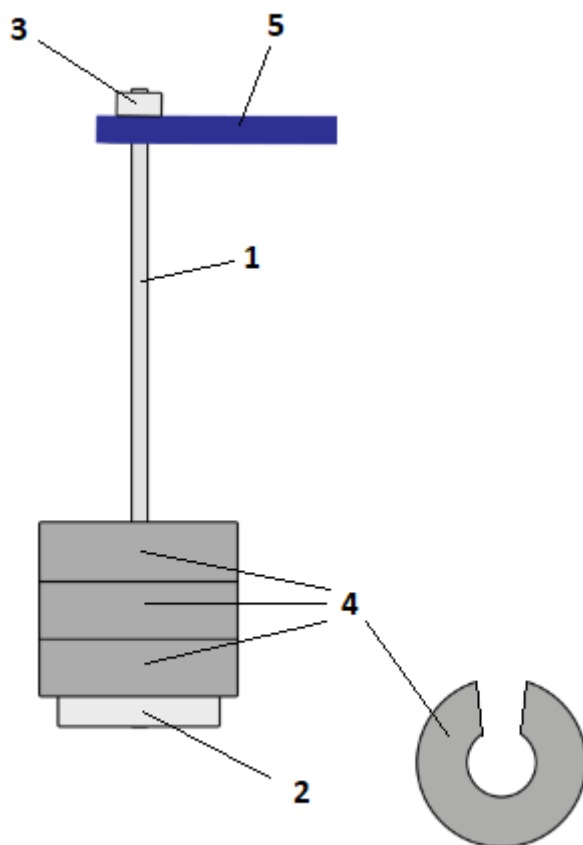


Рисунок 4.2 – Схематическое изображение стержня с грузом



На рисунке: 1 – стержень для груза; 2 – заглушка для груза; 3 – заглушка для стержня; 4 – нагрузочные шайбы; 5 – стержень для задания усилия.

Нагрузочные шайбы должны иметь выемку под стержень для удобства эксплуатации стенда.

#### 4.1.1 Расчёт прочности стержней

Прежде, чем рассчитывать момент, реализуемый данным стендом, необходимо произвести расчёт нагрузочного ресурса стержней, на которые оказывается усилие.

Из условий комфортности при эксплуатации стенда, возьмём длину плечевого стержня  $b$  (рисунок 4.1)  $L_{ПС} = 1$  м; максимальную нагрузку шайбами  $m_{ш} = 60$  кг.

Произведём расчёт массы стержня для груза 1 (рисунок 4.2) и всех его составляющих. Примем диаметр стержня  $D_{СТ} = 15$  мм; длину стержня  $L_{СТ} = 0,5$  м.

Масса стержня:

$$m_{СТ} = \rho \cdot V, \quad (4,1)$$

где  $\rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность стали;

$V_{СТ}$  – объём изделия.

Площадь поперечного сечения стержня:

$$S_{СТ} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad (4,2)$$

$$S_{СТ} = \frac{3,14 \cdot 0,015^2}{4} = 176,6 \text{ мм}^2.$$

Объём стержня:

$$V_{СТ} = S_{СТ} \cdot L_{СТ}; \quad (4,3)$$

$$V_{СТ} = 0,0001766 \cdot 0,5 = 88312,5 \text{ мм}^3.$$

Масса стержня по (4,1):

$$m_{СТ} = 7850 \cdot 0,0000883125 = 0,69 \text{ кг.}$$

Заглушка для груза 2 (рисунок 4.2) имеет следующие параметры:

$D_{зГ} = 0,10$  м – диаметр заглушки;  $L_{зГ} = 0,01$  м – длина заглушки.

Объём заглушки для груза по (4,3):

$$V_{зГ} = 0,00785 \cdot 0,01 = 78500 \text{ мм}^3.$$

Масса заглушки для груза по (4,1):

$$m_{зГ} = 7850 \cdot 0,0000785 = 0,62 \text{ кг.}$$

Массу заглушка для стержня 3 (рисунок 4.2) возьмём:

$$m_{зС} = \frac{m_{зГ}}{3}; \quad (4,4)$$

$$m_{зС} = \frac{0,62}{3} = 0,21 \text{ кг.}$$

Общая масса стержня для груза и всех его составляющих:

$$m_{СО} = m_{СТ} + m_{зГ} + m_{зС}; \quad (4,5)$$

$$m_{СО} = 0,69 + 0,62 + 0,21 = 1,52 \text{ кг.}$$

Примем максимальную нагрузку для станда:

$$m_{max} = m_{СО} + m_{ш}; \quad (4,6)$$

$$m_{max} = 1,52 + 60 = 61,52 \text{ кг.}$$

#### 4.1.1.1 Расчёт плечевого стержня на прогиб

Для проверки плечевого стержня на прочность произведём расчёт на изгиб. Так как исследуемый вал должен оставаться неподвижным, рассчитываем место соединения с ним стержня как консольную заделку. Стержень для груза представляет собой сосредоточенную силу на его конце (на расстоянии 2 см от свободного конца).

Нарисуем схему для расчёта стержня на прогиб и построим эпюры моментов и поперечных сил (рисунок 4.3).

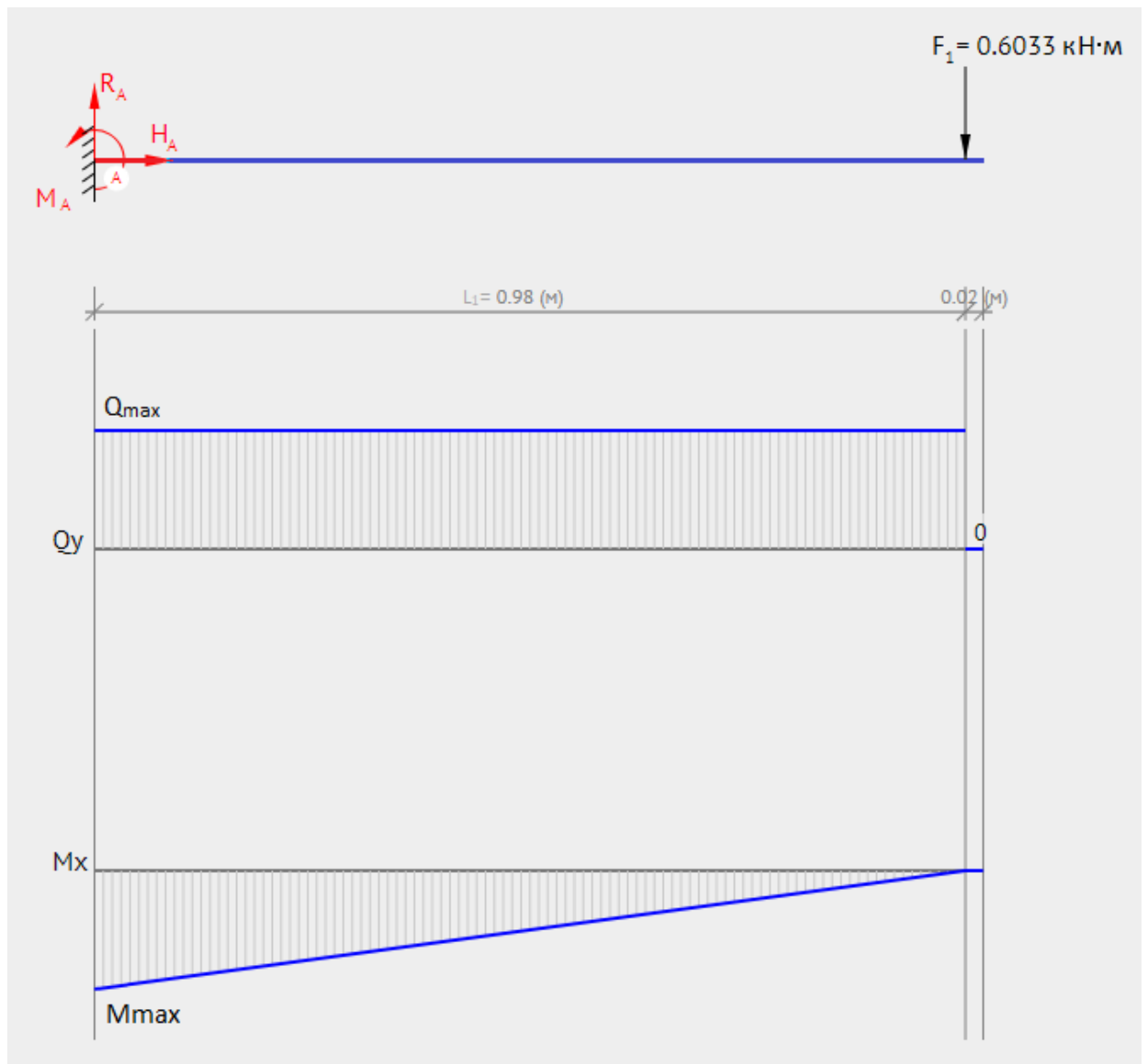


Рисунок 4.3 – Схема расчёта на прогиб и эпюры моментов и поперечных сил

Консольная заделка предполагает ограничение движения стержня по оси X, по оси Y, а также в плоскости XY, поэтому в точке A рисуем составляющие  $R_A$  (по оси Y),  $H_A$  (по оси X) и  $M_A$  (крутящий момент в плоскости XY).

Силу  $\vec{F}$  определим по известной формуле:

$$F_1 = m_{max} \cdot g; \quad (4,7)$$

$$F_1 = 61,52 \cdot 9,807 = 603,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Так как стержень не должен двигаться ни в одной из плоскостей, сумма всех сил в каждой плоскости относительно точки A должны равняться нулю.

Сумма моментов всех сил относительно точки A равняется нулю [13]:

$$\sum M^A = -M_A + \sum q_n \frac{(b_n - a_n)(b_n + a_n)}{2} + \sum F_n \cdot L_n + \sum M_n = 0. \quad (4,8)$$

В данной схеме мы имеем только одну сосредоточенную силу  $F_1$ , поэтому уравнение (44) имеет вид (учитывая направление силы):

$$\begin{aligned} \sum M^A &= -M_A - F_1 \cdot L_1 = 0; \\ \sum M^A &= -M_A - 603,3 \cdot 0,98 = 0. \end{aligned}$$

Отсюда:

$$M_A = -603,3 \cdot 0,98 = -591,234 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сумма проекций всех сил на ось Y равна нулю:

$$\sum Y = R_A + \sum q_n (b_n - a_n) + \sum F_n = 0. \quad (4,9)$$

Приведём уравнение (45) в соответствие нашему проекту (с учётом направлений сил):

$$\begin{aligned} \sum Y &= R_A - F_1 = 0; \\ \sum Y &= R_A - 603,3 = 0. \end{aligned}$$

Отсюда:

$$R_A = 603,3 \text{ Н.}$$

Произведём проверку. Для этого вычислим сумму всех моментов относительно свободного конца стержня:

$$\begin{aligned} \sum M^{CB} &= -M_A - R_A \cdot (L_1 + L_2) - \sum q_n \frac{(b_n - a_n)(b_n + a_n)}{2} \\ &\quad - \sum F_n \cdot L_n + \sum M_n. \end{aligned} \quad (4,10)$$

Уравнение (46) с учётом направлений:

$$\begin{aligned} \sum M^{CB} &= -M_A - R_A \cdot (L_1 + L_2) + F_1 \cdot L_2; \\ \sum M^{CB} &= 591,234 - 603,3 \cdot (0,98 + 0,02) + 603,3 \cdot 0,02 = 0. \end{aligned}$$

Представленный выше расчёт верен.

Необходимый минимальный момент сопротивления равен [14]:

$$W = \frac{M_{max}}{[\sigma]}, \quad (4,11)$$

где  $M_{max} = M_A$  – максимальный рассчитанный крутящий момент стержня по модулю;

$[\sigma] = 140$  МПа – допускаемые напряжения при изгибе для стали Ст5 при переменной нагрузке [15].

Отсюда:

$$W_{ПС} = \frac{591,234}{140 \cdot 10^6} = 4,223 \text{ см}^3.$$

Момент сопротивления круга:

$$W_{ПС} = \frac{\pi \cdot D_{ПС}^3}{32}. \quad (4,12)$$

Отсюда вычислим минимально необходимый диаметр стержня:

$$D_{ПС} = \sqrt[3]{\frac{W_{ПС} \cdot 32}{\pi}}; \quad (4,13)$$

$$D_{ПС} = \sqrt[3]{\frac{0,000004223 \cdot 32}{3,14}} = 3,5 \text{ см.}$$

Для учёта изгиба стержня под собственным весом, а также для обеспечения запаса по нагрузке примем  $D_{ПС} = 4$  см и проведём все приведённые выше расчёты с учётом собственного веса стержня.

Данное сечение подходит для обеспечения заданной нагрузки с учётом собственного веса балки, а также обеспечивает дополнительную грузовую нагрузку до 240 Н (~ 24,5 кг). Таким образом суммарный вес шайб не должен превышать 84,5 кг. Максимальный прогиб для данного стержня с необходимой нагрузкой  $m_{max}$  составит 0,4 см [16].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

#### 4.1.2 Расчёт стержня для груза на растяжение

Представим данный элемент в качестве одноступенчатого однородного участка стержня, который необходимо рассчитать на растяжение (рисунок 4.4).

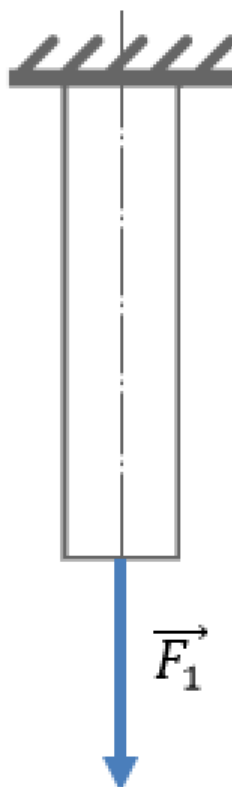


Рисунок 4.4 – Схема для расчёта стержня на растяжение

Так как нагрузочные шайбы оказывают давление на заглушку, которая в свою очередь закреплена на нижней части стержня, примем, что сила прикладывается к одной точке в нижней части.

Ввиду того, что мы имеем достаточно прочный материал стержня ( $[\sigma] = 140$  МПа) сравнительно маленькой длины, собственный вес этого стержня можно не учитывать при расчётах на растяжение [17].

Определим величину и знак внутренней силы в прямом вертикальном стержне, нагруженном продольной растягивающей силой  $\vec{F}_1 = 603,3$  Н · м.

Так как участок однородный, внутренняя сила будет одинакова во всех поперечных сечениях.

Воспользуемся методом сечений. Разделим участок в произвольном месте на две части (рисунок 4.5). Нижняя часть удерживается верхней благодаря внутренней силе  $\vec{N}$ .

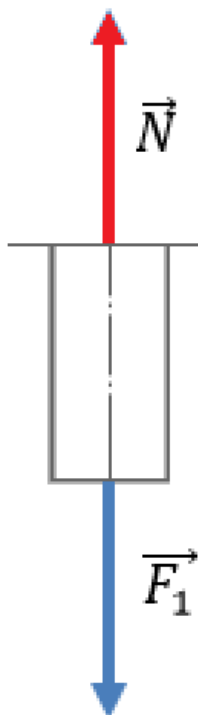


Рисунок 4.5 – Метод сечений

Так как стержень неподвижен внутренняя сила должна быть равна  $\vec{N} = \vec{F}_1$ . Следовательно,  $\vec{N} = 603,3$  Н.

Условие прочности при продольной нагрузке:

$$\sigma = \frac{N}{S_{\text{СТ}}} \leq [\sigma]. \quad (4,14)$$

Отсюда:

$$S_{\text{СТ}} \geq \frac{N}{[\sigma]}; \quad (4,15)$$

$$S_{\text{СТ}} \geq \frac{603,3}{140 \cdot 10^6} = 4,3 \text{ мм}^2.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Так как принятый диаметр стержня для нагрузки образует площадь поперечного сечения в  $S_{СТ} = 176,6 \text{ мм}^2$ , то данный стержень обеспечивает данную нагрузку с внушительным запасом до 24 кН.

Рассчитаем удлинение стержня для нагрузки при предельном суммарном весе шайб (84,5 кг) и построим эпюры с учётом собственного веса.

Общая масса по [37]:

$$m_{max} = 1,52 + 84,5 = 86,02 \text{ кг.}$$

Растягивающая сила при этом по (4,7):

$$F_{max} = 86,02 \cdot 9,807 = 843,6 \text{ Н.}$$

Продольная сила на  $n$  расстоянии от приложения силы:

$$N_n = F_n + S_n \cdot \gamma \cdot L_n. \quad (4,16)$$

где  $F_n$  – сила на расстоянии  $n$ ;

$S_n$  – поперечное сечение участка стержня на расстоянии  $n$ ;

$\gamma = 76930 \text{ Н}$  – удельный вес стали;

$L_n$  – расстояние  $n$  до точки приложения силы.

Таким образом:

$$N_0 = 843,6 + 0,0001766 \cdot 76930 \cdot 0 = 843,6 \text{ Н;}$$

$$N_{0,5} = 843,6 + 0,0001766 \cdot 76930 \cdot 0,5 = 850,4 \text{ Н.}$$

Напряжения в стержне:

$$\sigma_n = \frac{N_n}{S_n}. \quad (4,17)$$

Отсюда:

$$\sigma_0 = \frac{843,6}{0,0001766} = 4,78 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{0,5} = \frac{850,4}{0,0001766} = 4,82 \text{ МПа.}$$

Так как продольная сила в стержне непостоянна ввиду учёта собственного веса, возьмём её среднее значение [18]:

$$N_{ср} = \frac{N_0 + N_1}{2}; \quad (4,18)$$



$$N_{cp} = \frac{843,6 + 850,4}{2} = 847 \text{ Н.}$$

Удлинение стержня определим по закону Гука в относительной форме, учитывая модуль упругости материала  $E = 200000 \text{ МПа}$  для стали:

$$\Delta l = \frac{N_{cp} \cdot L_{СТ}}{E \cdot S_{СТ}}; \quad (4,19)$$

$$\Delta l = \frac{847 \cdot 0,5}{200000 \cdot 10^6 \cdot 0,0001766} = 1,199 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Эпюры продольных нагрузок представлены ниже (рисунок 4.6).

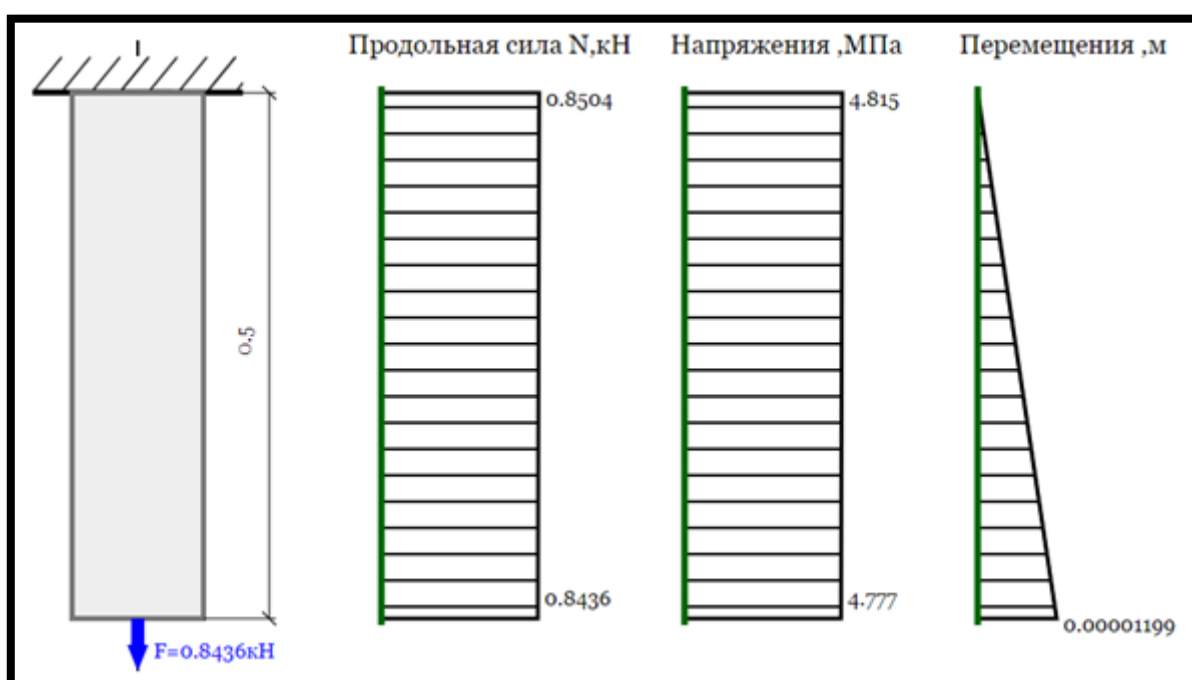


Рисунок 4.6 – Эпюры продольных нагрузок для предельных условий

Таким образом, данный стенд способен обеспечивать крутящий момент на валу не более  $843,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Достоинствами стенда является его простота и дешевизна составляющих элементов, а также относительно высокая точность задания момента ввиду простоты его вычисления.

К недостаткам можно отнести необходимость изготовления уникальных для данного стенда элементов (нагрузочных шайб, стержней).

## 4.2 Проектирование автоматизированного стенда

В качестве более продвинутого варианта был спроектирован автоматизированный стенд для контроля крутящего момента. В основе данного стенда лежит электродвигатель. Крутящий момент на валу этого двигателя создаёт встречно включенная нагрузочная машина (2-й электродвигатель). Таким образом, нагрузочная машина препятствует исследуемому электродвигателю, создавая для него тем самым статический момент, скручивающий вал.

На общий вал двух электродвигателей, на равно удалённом расстоянии от серединной муфты установим 2 датчика крутящего момента: бесконтактный магнитоупругий и тензометрический. Такое решение позволит проверить отклонение в показаниях БМД от показаний аналогичного устройство, уже использующегося в некоторых технологических процессах.

Основные требования к данному стенду следующие:

- номинальный крутящий момент электродвигателей в диапазоне от  $600 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до  $800 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- относительно небольшие массогабаритные показатели стенда;
- сравнительно небольшая мощность электродвигателей (до 5 кВт).

Требование к мощности электродвигателей обусловлено экономией денежных средств и места: двигатели с большой мощностью имеют внушительные массогабаритные параметры.

Для обеспечения требуемого крутящего момента при такой низкой мощности требуется установка редукторов для каждого из двигателей. Скорость исследуемого вала при этом будет достаточно низкой, но для проектируемого стенда нет никаких требований к скорости.

						Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ	

#### 4.2.1 Выбор исследуемого вала и датчиков крутящего момента

Выберем диаметр исследуемого вала  $D_{ИВ} = 70$  мм. И подберём под него два датчика крутящего момента.

Тензометрические датчики, как правило, используют участок контролируемого вала в закрытом корпусе, поэтому устанавливать его необходимо врезая в вал, а значит основным критерием для выбора тензометрического датчика, помимо диапазона момента будет  $D_{ТД} = 70$  мм – диаметр вала тензометрического датчика.

В соответствие с заявленными требованиями выберем тензометрический датчик крутящего момента TRC-200K (рисунок 4.7). Каталожные данные датчика представлены ниже (таблица 4.1).



Рисунок 4.7 – Тензометрический датчик TRC-200K

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таблица 4.1 – Технические характеристики датчика TRC-200K

Наименование	Значение
Номинальный диапазон (н.д.)	1 кгс*м...2000 кгс*м
Номинальный выходной сигнал (н.с.)	1,3 мВ/В
Нелинейность (от н.с.)	0,5 %
Гистерезис (от н.с.)	0,5 %
Повторяемость (от н.с.)	0,5 %
Температурный диапазон	0...+60 °С
Температурный коэффициент для выходного сигнала (от н.д./10°С)	0,3 %
Температурный дрейф баланса нуля (от н.с./10°С)	0,2 %
Сопротивление	350 Ом ±1%
Рекомендованное питание	2 В (переменный ток)
Допустимая перегрузка (от н.д.)	120 %
Кабель	Ø10 мм, 4 жилы в экране, 5 м

Ниже представлены схема подключения датчика (рисунок 4.8) и использование данного устройства в составе с измерительным модулем (цифровым интерфейсом) (рисунок 4.9).

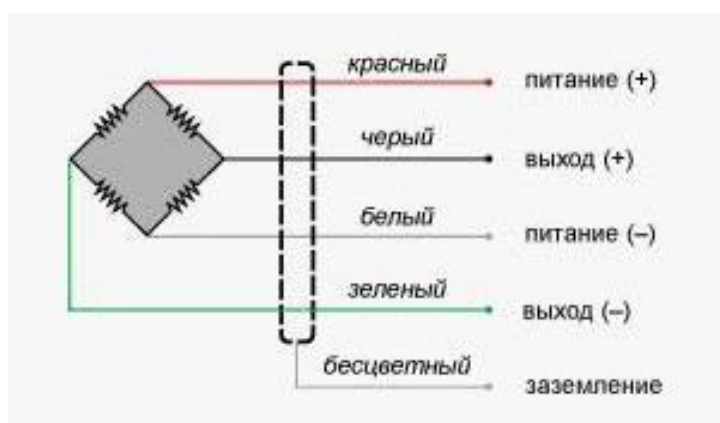


Рисунок 4.8 – Схема подключения датчика TRC-200K

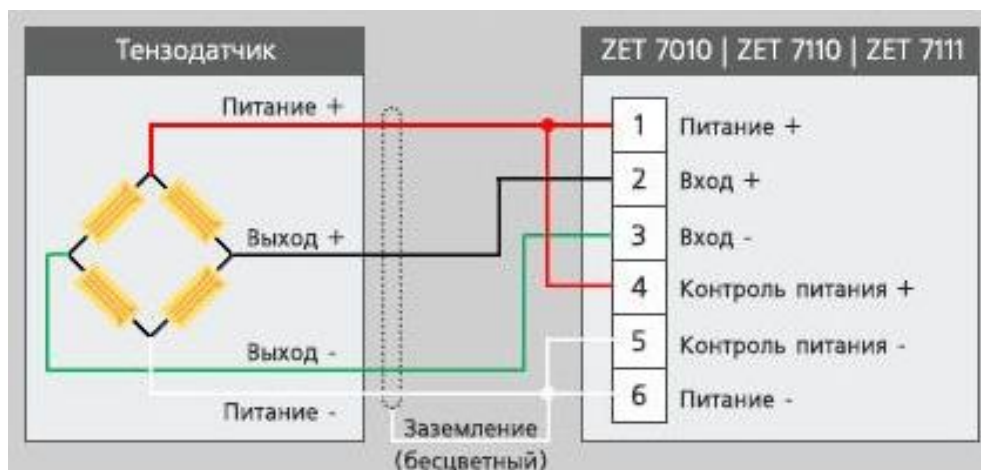


Рисунок 4.9 – Схема подключения датчика TRC-200K в составе с измерительным модулем

Магнитоупругий датчик рассчитывается при помощи уже известного программного обеспечения (рисунок 2.15). Основным критерием для расчёта является диаметр исследуемого вала  $D_{ИВ} = 70$  мм.

Подключение датчика с цифровым интерфейсом произведём через модуль измерений ZET 7010 (рисунок 4.10). Данный модуль производит конвертирование сигнала с датчика в RS-485. Далее подключается модуль конвертирования сигнала RS-485 → USB для передачи сигнала на ПК. Пример подключения измерительной сети к системе ZETLAB показан ниже (рисунок 4.11).



Рисунок 4.10 – Интерфейс передачи данных RS-485

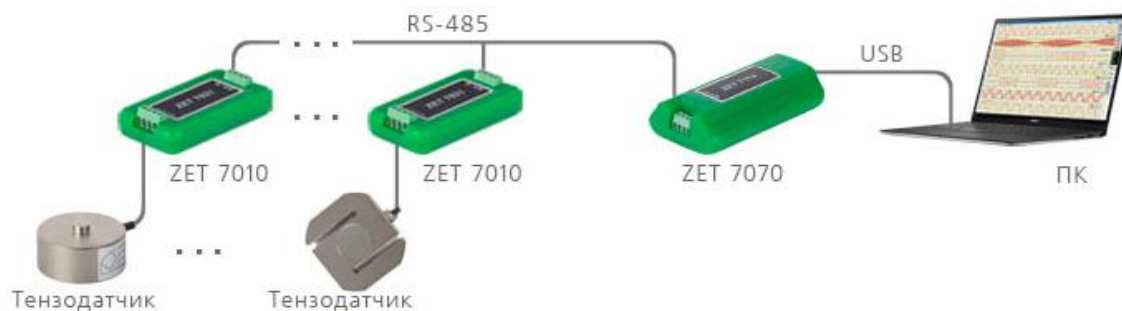


Рисунок 4.11 – Подключение измерительной сети к системе ZETLAB

Питание датчика осуществляется от модуля ZETSENSOR. Для отслеживания измеряемых значений необходим ПК с установленной системой ZETLAB.

#### 4.2.2 Выбор двигателя для стенда

Как уже описывалось ранее, необходимо выбрать электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения мощностью до 5 кВт. Исходя из этого выбираем электродвигатель LAK 2132 М. Технические данные двигателя представлены ниже (таблица 4.3).

Так как для стенда имеются ограничения по габаритам, приведём чертёж (рисунок 4.12) и размеры (таблица 4.2) выбранного двигателя.

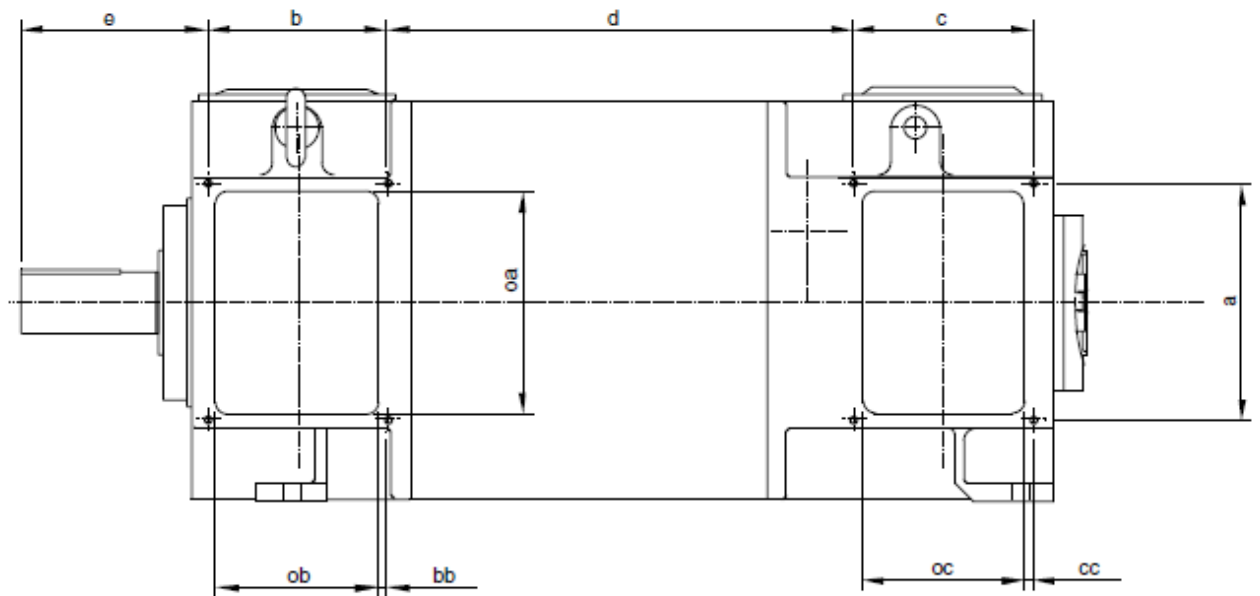


Рисунок 4.12 – Чертёж двигателя LAK 2132 М

Таблица 4.2 – Габаритные размеры двигателя LAK 2132 М (в мм)

a	b	bb	c	cc	d	Θ	oa	ob	oc	Вес (кг)
150	125	7,5	125	7,5	286	116,5	145	110	110	132

Таблица 4.3 – Технические данные двигателя ЛАК 2132 М

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Величина
Мощность	$P_H$	кВт	4,6
Частота вращения	$n$	об/мин	700
Ток якоря	$I_{я}$	А	16,4
Номинальный момент	$M_H$	Нм	63,1
Напряжение	$U_{я}$	В	440
Сопротивление обмотки якоря	$r_{я}$	Ом	8,93
Индуктивность обмотки якоря	$L_{я}$	мГн	132
Момент инерции якоря	$J_{я}$	кгм <sup>2</sup>	0,090
Максимальная скорость вращения	$n_{max}$	об/мин	5000

Частота вращения электродвигателя по (3,1):

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n}{60};$$

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot 700}{60} = 73,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Величина произведения номинального потока возбуждения на конструктивный коэффициент по (3,2):

$$k\Phi_H = \frac{U_{я} - I_{я} \cdot r_{я}}{\omega_H};$$

$$k\Phi_H = \frac{440 - 16,4 \cdot 8,93}{73,3} = 4,005 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Номинальный момент на валу электродвигателя по (3,3):

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H};$$

$$M_H = \frac{4600}{73,3} = 62,76 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$



Скорость идеального холостого хода по (3,4):

$$\omega_{0H} = \frac{U_H}{k\Phi_H};$$

$$\omega_{0H} = \frac{440}{4,005} = 109,86 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

#### 4.2.3 Выбор нагрузочной машины для стенда

Так как кроме создания на валу необходимого крутящего момента нет никаких дополнительных требований к стенду, в качестве нагрузочной машины выберем точно такой же двигатель, как и исследуемый (LAK 2132M).

#### 4.2.4 Выбор редукторов

Так как на исследуемом валу двигателя необходимо обеспечить крутящий момент в 700 Н·м, необходимо с каждой стороны создать крутящий момент хотя бы в 350 Н·м.

По имеющимся данным выбираем цилиндрический горизонтальный редуктор 1Ц2У-125 (рисунок 4.13). Технические данные редуктора представлены ниже (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Технические данные редуктора 1Ц2У-125

Наименование	Обозначение	Величина
Номинальное передаточное отношение	$i_p$	10
Номинальный момент на выходном валу (Н·м)	$M_{\text{вых}}$	630
КПД (%)	$\eta_p$	98
Масса, кг	$m$	55

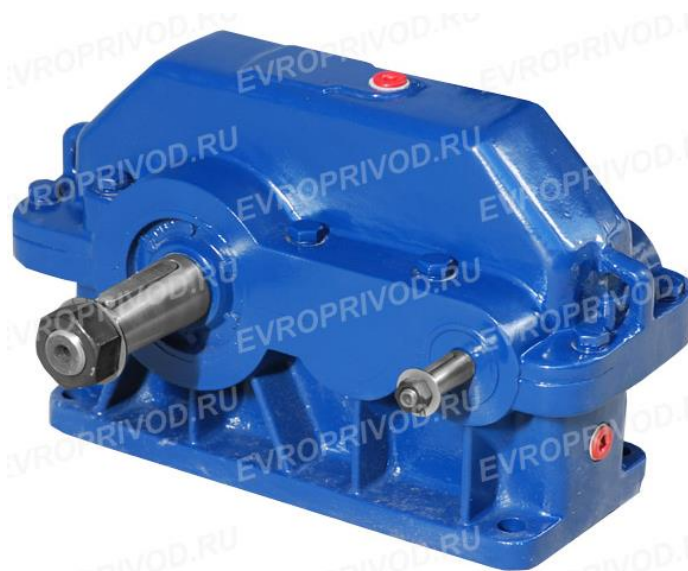


Рисунок 4.13 – Внешний вид редуктора 1Ц2У-125

Такой же редуктор установим и со стороны нагрузочной машины. Результирующая схема автоматизированного стенда контроля крутящего момента на валу продемонстрирована ниже (рисунок 4.14)

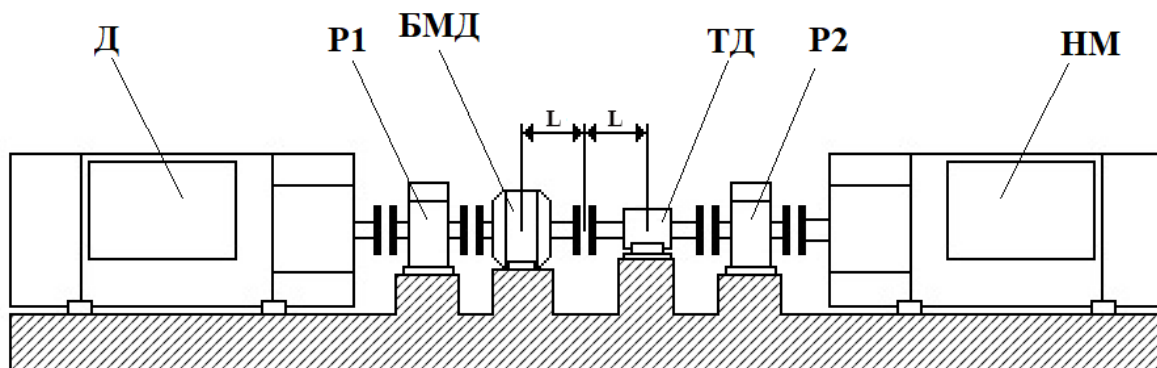


Рисунок 4.14 – Схема автоматизированного стенда для контроля крутящего момента

На рисунке выше: Д – исследуемый двигатель; P1 – редуктор исследуемого двигателя; БМД – бесконтактный магнитоупругий датчик; ТД – тензометрический датчик; P2 – редуктор нагрузочной машины; НМ – нагрузочная машина.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Основное требование к данной схеме – одинаковое расстояние  $L$  от чувствительных элементов датчиков до центральной муфты. Для экономии места основной вал следует выбирать с небольшим запасом по длине. Исходя из габаритных размеров датчика ТД, расстояние от чувствительного элемента до центральной муфты  $L = 168 \text{ мм} = 0,168 \text{ м}$ . Исходя из этого, примем длину основного вала  $L_{\text{ов}} = 1 \text{ м}$ .

#### 4.2.5 Выбор тиристорного преобразователя

По условию выбора (5) и (6) выбираем преобразователь MentorMP MP25A4R. Каталожные данные преобразователя представлены ниже (таблица 4.5).

Таблица 4.5– Технические характеристики тиристорного преобразователя

Марка	Напряжение нагрузки $U_d, \text{ В}$	Ток нагрузки $I_d, \text{ А}$	Напряжение на входе $U_{\text{вх}}, \text{ В}$	Габарит	Ток возбуждения $I_b, \text{ А}$
MP25A4R	450	25	480	1А	8

#### 4.2.6 Приведение моментов к валу двигателя

После выбора двигателя и редуктора, проведём расчёт крутящего момента, приведённого к валу двигателя:

$$M_{\text{пр}} = \frac{M_c}{i_p}; \quad (4,20)$$

$$M_{\text{пр}} = \frac{350}{10} = 35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Рассчитаем приведённый к валу двигателя момент с учётом потерь в редукторе:

$$M_{уп} = \frac{M_{ПР}}{\eta_P}; \quad (4,21)$$

$$M_{уп} = \frac{35}{0,98} = 35,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент холостого хода машины  $M_{хх}$  берётся равным 5% от номинального. С его учётом приведённый момент равен:

$$M_{П} = M_{уп} + M_{хх}; \quad (4,22)$$

$$M_{П} = 35,7 + 62,76 \cdot 0,05 = 38,84 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

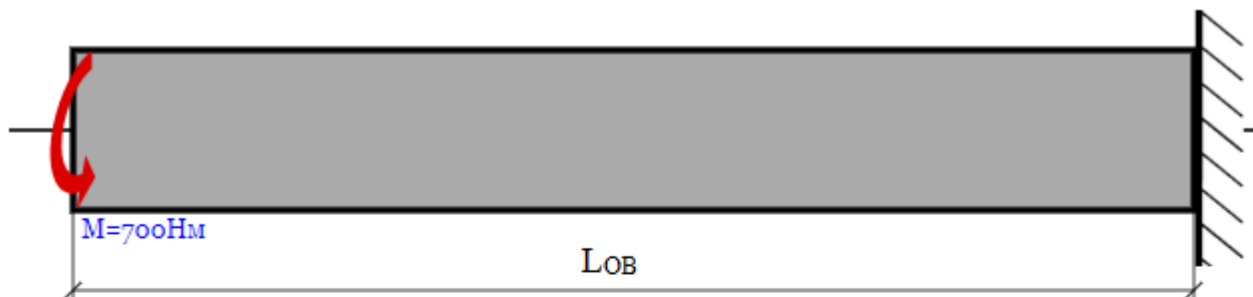
Таким образом, получившийся приведённый к валу двигателя крутящий момент ниже номинального момента, реализовываемого двигателем, что предоставляет дополнительный запас по нагрузке.

#### 4.2.7 Расчёт вала на скручивание

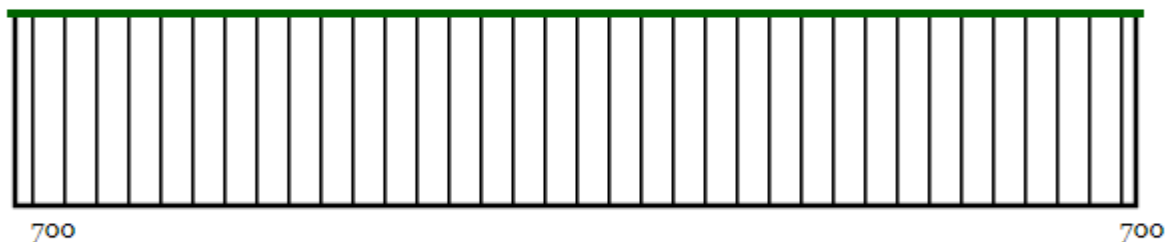
Для того, чтобы убедиться в механической прочности вала при задании необходимого крутящего момента, необходимо произвести расчёт основного вала на скручивание.

Для построения эпюр представим основной вал как цилиндрический участок с жесткой заделкой с одной из сторон. С другой стороны к валу приложен крутящий момент  $M = 700 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , который необходимо реализовывать в данной системе.

Нарисуем схему основного участка вала и построим соответствующие эпюры (рисунок 4.15)



Эпюра крутящих моментов, Нм



Угол закручивания, рад.

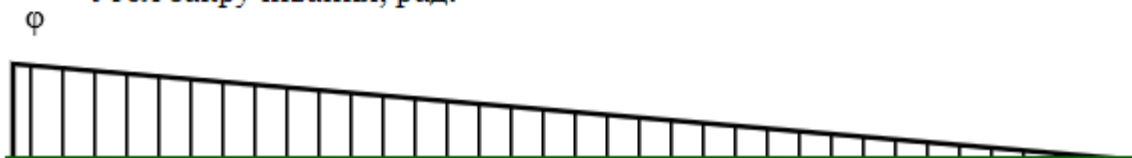


Рисунок 4.15 – Эпюры для расчёта вала на кручение

Произведём расчёт максимального угла закручивания, а затем проверим, подходит ли выбранное сечение вала по условию прочности.

Момент инерции для сечения вала:

$$J_c = \frac{\pi \cdot d^4}{32}; \quad (4,23)$$

$$J_c = \frac{3,14 \cdot 0,14^4}{32} = 0,0000377 \text{ м}^4.$$

Угол закручивания определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{M \cdot L_{0B}}{G \cdot J_c}, \quad (4,24)$$

где  $G = 80 \text{ ГПа}$  – модуль сдвига для стали.

$$\varphi = \frac{700 \cdot 1}{80 \cdot 10^9 \cdot 0,0000377} = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Условие прочности при кручении:

$$\tau_{max} \leq [\tau_{кр}], \quad (4,25)$$

где  $[\tau_{кр}] = 90$  МПа – допускаемые напряжения при кручении для стали Ст5 в условиях изменяющейся от нуля до максимума нагрузки.

Момент сопротивления сечения вала:

$$W_c = \frac{\pi \cdot d^3}{16}; \quad (4,26)$$
$$W_c = \frac{3,14 \cdot 0,14^3}{16} = 0,00054 \text{ см}^3.$$

Максимальные напряжения с выбранным сечением вычислим по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{M}{W_c}; \quad (4,27)$$
$$\tau_{max} = \frac{700}{0,00054} = 1,3 \text{ МПа.}$$

Условие прочности (60) выполняется с внушительным запасом для выбранного сечения основного вала.

Таким образом, все выбранные элементы системы соответствуют предъявленным к проектируемому станку требованиям. Кроме того, обеспечивается запас по нагрузке вала, на котором производится измерение крутящего момента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выпускной квалификационной работы был произведён анализ существующих решений по контролю крутящего момента в системах электропривода.

Составлены виртуальные модели различных конструктивных исполнений бесконтактного магнитоупругого датчика крутящего момента. В каждом случае были заданы одинаковые условия для чистоты полученных результатов. Произведено сравнение разных исполнений и выявление наилучшего варианта. Получены картины магнитных полей на поверхности исследуемого вала для наглядности действия устройств.

Разработано и описано программное обеспечение для автоматизации расчёта проектируемого устройства в конструктивном исполнении, выявленном на предыдущем этапе.

Выбрано оборудование для составления математической модели системы управления электроприводом. Рассчитана и составлена математическая модель системы управления электроприводом. Получены результаты работы системы в случае с идеальным измерением необходимых величин и в случае с применением датчика в обратной связи. Произведено сравнение данных результатов и проведена оценка влияния математической модели устройства на систему управления электроприводом в сравнении с идеальной системой.

Выполнено проектирование двух вариантов испытательного стенда для контроля крутящего момента на исследуемом валу. Для мануального стенда составлена схема исполнения, продумана возможность задания момента, произведён расчёт прочности элементов стенда. Для автоматизированного стенда составлена схема соединения элементов, выбран исследуемый двигатель и нагрузочная машина, теристорных преобразователей, произведён выбор редукторов и тензометрического датчика крутящего момента. Исследуемый вал рассчитан на прочность при скручивании.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Копп, Е.А. Противобуксовочная система тягового электропоезда.: ВКР / Е.А. Копп. – Челябинск, 2016. – 78 с.

2 Умурзаков, А.Д. Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе.: дис.... канд. тех. Наук / А.Д. Умурзаков. – Томск, 2015. – 116 с.

3 В. А. Олещук. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / А. С. Верещагина. – Комсомольск-на-Амуре: Изд. ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 92 с.

4 Датчики момента. – [http://www.eope.ee/\\_download/euni\\_repository/file/2393/Teooria.zip/\\_60.html](http://www.eope.ee/_download/euni_repository/file/2393/Teooria.zip/_60.html)

5 Левинтов, С.Д. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента / С.Д. Левинтов, А.М. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.

6 Бродов, Г.С. Технологические измерения и автоматизация процесса бурения / Г.С. Бродов, И.Г. Шелковников, Э.К. Егоров – Спб.; ФГУ НЛП «Геологоразведка», Санкт-Петербургский горный институт, 2004. – 105 с.

7 Развитие и будущие технологии измерения крутящего момента // Сайт производителя Lorenz – [http://www.lorenz-m.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=45&Itemid=143](http://www.lorenz-m.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=45&Itemid=143)

8 Гуманюк, М.Н. Магнитоупругие датчики / М.Н.Гуманюк. – Киев: Изд. «Техніка», 1968. – 157с.

9 Инженерная методика определения упора гребного винта / Н. Б. Проскурина, Н. С. Сенюшкин, А. В. Суханов, Р. Р. Ямалиев – Уфа: УГАТУ, 2011. – С. 44-48.

10 Технология Magneto-Elastic // Сайт производителя Methode Electronics.inc. – <http://ru.methode.com/sensors-and-switches/magneto-elastic.html>

11 Torque Sensors Calculation Software / N Ashikhmin, E A Kopp, A S Nesterov, A N Shishkov – Санкт-Петербург: Изд. «Institute of Physics Publishing», 2017 – 6 с.

										Лист
										82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.255.01ПЗ					



12 Системы управления электроприводов – Учебное пособие / Ю.С. Усынин, А.Е. Бычков, 2015 – 36с.

13 Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев, 1999 – 592с.

14 Подбор диаметра круглого сечения балки – <http://isopromat.ru/sopromat/primery-reshenia-zadach/raschet-balki/podbor-diametra-sechenia>

15 Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Емин, А. И. Кареновский – НИИмаш, М., 1974.

16 Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С. – Киев: Изд. «Наукова думка», 1988.

17 Подбор сечений с учетом собственного веса (при растяжении и сжатии) – <http://www.toehelp.ru/theory/sopromat/14.html>

18 Расчет стержней на растяжение – сжатие – <https://sopromat.xyz/projects/tension?id=624059>