

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Филиал федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» в г. Миассе
Факультет «Электротехнический»
Кафедра «Автоматика»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ С.С. Голощанов
_____ 2018 г.

Автоматический измеритель веса стальных слитков системы подачи в печь
предварительного нагрева

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 270304.2018.338 ПЗ ВКР

Консультант
к.т.н. доцент кафедры АиУ
_____ А.В. Ямщиков
_____ 2018 г.

Руководитель проекта
начальник отдела АСУ ТП
_____ Э.У. Латыпов
_____ 2018 г.

Автор проекта
студент группы МиЭТ-482
_____ Н.В. Плющай
_____ 2018 г.

Нормоконтролер
кафедры АиУ
_____ Т.А. Барбасова
_____ 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

История Урала тесно связана с тяжелой промышленностью. Среди таких промышленных гигантов как Уралмашстрой, Челябинский тракторный завод, Магнитогорский металлургический комбинат, занимает свое место Челябинский трубопрокатный завод. Челябинский трубопрокатный завод (ЧТПЗ) – это промышленный комплекс, входящий в десятку крупнейших трубных компаний мира, который объединяет отечественные и зарубежные предприятия и компании: Челябинский трубопрокатный завод, Первоуральский новотрубный завод, компанию по переработке металлолома «МЕТА», предприятия по производству магистрального оборудования «СОТ», «ЭТЕРНО», MSA (Чехия), нефтесервисную компанию «Римера» [58].

Челябинский трубопрокатный завод как единица подразделения в первую очередь занимается производством сварных и бесшовных стальных труб, в том числе занимается уникальным производством труб большого диаметра. Основным направлением работы группы ЧТПЗ является обслуживание сектора нефтегазовой отрасли. Предоставляет комплексные услуги по разведке и разработке месторождений, проектированию и строительству нефтегазовых трубопроводов. Наиболее востребованными в нефтегазовой отрасли являются бесшовные трубы.

Методика изготовления бесшовных конструкций имеет ряд особенностей. Она характеризуется трудоемкостью производства и сложным технологическим процессом. Существует две технологии прокатки: горячая и холодная.

При горячей прокатке стальную заготовку помещают в специальную печь, в которой происходит нагрев детали на 50 °С выше температуры рекристаллизации стали. Точная температура зависит от марки используемой стали. Затем заготовку помещают в прошивной пресс. Под воздействием давления происходит формирование изделия. После этого с помощью валов трубе придается окончательная форма. Заключительный этап производства – водяное охлаждение и калибровка.

При холодной прокатке процесс практически полностью аналогичен горячей. Исключение составляет окончательная обработка заготовки. После первичной

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

деформации она охлаждается, и вальцы придают поверхности правильную форму. Эта технология характеризуется меньшей трудоемкостью. Однако в итоге ассортимент несколько уступает горячедеформированным изделиям.

Независимо от технологии, трубы изготавливаются из стали, которая поставляется и доставляется на территорию цеха по внутренней железной дороге в виде стальных заготовок массой от 1700 до 3770 кг и размерами от 1200 до 1950 мм. Перед запуском стальных заготовок в производственный процесс их нагревают при определенных температурных и временных режимах в печи предварительного нагрева. Загрузка в печь осуществляется по рольганговой транспортной линии.

Для увеличения эффективности и экономичности процесса предварительного нагрева необходимо знать точную массу стали, загружаемой в печь. Поэтому было принято решение модифицировать линию, установив измеритель веса на ней.

Целью дипломного проекта является разработка системы управления процессом измерения массы стальных заготовок на линии подачи их в печь. А именно, обоснование выбора метода измерения и его реализация, разработка процедуры обработки измерения и интеграция измерителя в уже существующую систему, то есть создание алгоритма работы линии и измерителя как единого целого.

Промышленность выпускает готовые конвейерные весы, или по-другому чеквейеры, для легкой и пищевой промышленности, предлагает достаточно широкий выбор различных исполнений весов для лент транспортировки малогабаритных объектов и сыпучих веществ. Такие весы широко распространены и глубоко востребованы. Однако промышленные весы для крупногабаритных, тяжелых объектов, как правило, выпускаются единичными партиями, изготавливаются под заказ и проектируются совместно с самой транспортной линией. На заводе ЧТПЗ в первом цеху уже есть транспортная линия, она эксплуатируется и к замене не планируется. Таким образом, с учетом всех экономических и управленческих соображений, управляющим составом завода совместно с управляющим составом цеха и отделом систем управления было принято решение разработать собственный автоматический измеритель веса на основе известных конструкций и на базе отечественных компонентов.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ

В настоящий момент транспортная линия системы подачи стальных слитков в печь предварительного нагрева функционирует в первом цеху челябинского трубопрокатного завода. Управление линией организовано с использованием программно-аппаратного комплекса Siemens.

Линия состоит из пяти роликовых рольгангов, каждый из которых оборудован отдельным электроприводом, по длине и ширине соразмерных с размерами заготовок. Рольганг представляет собой ряд роликов, приводимых в движение электроприводом, набор оптических датчиков для установления наличия и контроля положения заготовки на рольганге.

Заготовки доставляются в цех по внутренней заводской железнодорожной транспортной сети, загружаются краном на линию и транспортируются по территории цеха к печи.

Входной рольганг стоит в начале линии, принимает заготовки на линию с железнодорожной вагонетки, имеет три оптических датчика: два по краям и один в середине.

С выходного рольганга заготовка снимается краном с линии и помещается на площадку, после чего укладывается в печь, где заготовка проходит дальнейшую подготовку в течение нескольких часов.

Исходная схема размещения изображена на рисунке 1.1.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕСА

2.1 Устройство измерителя

Процесс измерения веса всегда предполагает наличие движущихся или деформируемых частей в устройстве измерителя, что учитывается в определении надежности измерителя.

По своему принципу работы измерители веса бывают динамическими и статическими. Статические измерители веса предполагают неподвижность измеряемого объекта, являются более точными и надежными. Во время измерения, когда объект расположился на платформе положенным образом, линия останавливается, включаются измерители, после измерители отключаются и линия продолжает движение. Такой способ измерения значительно снижает скорость движения линии, однако позволяет также снизить износ измерительных органов (датчиков), так как воздействие на них оказывается лишь в непродолжительные отрезки от всего времени работы конвейера [42].

Динамические измерители предполагают, что если измеряемый объект находится в движении, то он продолжит его, и не будет останавливаться на измеряющей платформе. Такой метод применяется, например, в транспортной ленте сыпучих веществ (зерно, уголь и т.д.), где остановка ленты неуместна, или железнодорожных путях, где остановка всего состава для измерения веса вагона недопустима. Так как измерения не требуют остановки конвейера, не снижается его скорость движения. Однако, постоянное воздействие на измерительные органы (датчики веса) значительно увеличивает износ измерительных органов, что увеличивает требования к надежности датчиков. Требования к точности датчиков также возрастают, а методы обработки измерений значительно усложняются, что в совокупности значительно увеличивает сложность и стоимость системы.

В результате изучения обоих подходов было решено использовать статический метод измерения. Рассмотрим устройство статического измерителя подробнее. Рассматривается устройство измерителя, предложенное в патенте 2079116 G01G11/14 под названием «Устройство для взвешивания массивных слитков в

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

технологической линии», авторами которого являются Н.А. Фомин, В.И. Веревкин, В.К. Буторин, А.Е. Кошелев [45].

Устройство измеряет массу слитка во время его кратковременной остановки на технологической линии. Для этого секция приводных роликов рольганга на участке взвешивания отключается. Слиток останавливается, по возможности, симметрично над весоизмерительными роликами, число которых равно четырем. После успокоения слитка, включается эксцентриковый механизм подъема весоизмерительных роликов. Механизм одновременно начинает поднимать все ролики.

Весоизмерительные ролики поднимаются над опорной поверхностью рольганга на высоту эксцентриситета и снимают массу слитка с движущих роликов. Тензодатчики, расположенные в опорах весоизмерительных роликов, получают нагрузку, начинается измерение, на выходах датчиков образуется информационный сигнал. При достижении определенной высоты подъема срабатывает датчик положения, установленный на выходном валу механизма подъема. Привод механизма подъема останавливается. По сигналу от датчика положения сигнал с датчиков регистрируется [45].

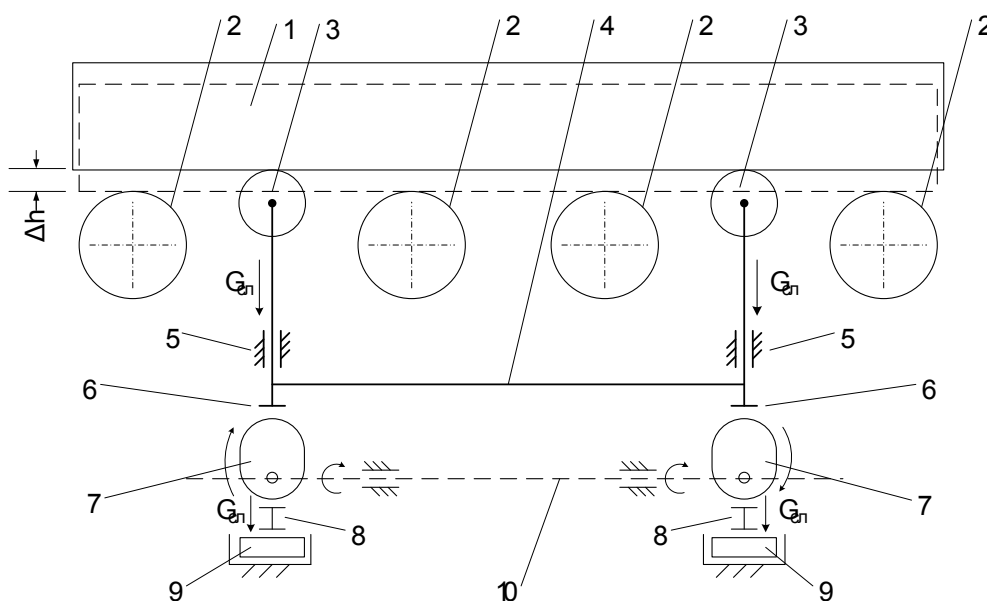


Рисунок 2.1 – Схема устройства весоизмерителя

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

На рисунке 3.1 приведена схема устройства для взвешивания массивных слитков в линии и содержит: измеряемый слиток 1, приводные ролики транспортера 2, весоизмерительные ролики 3, механическая связь ползунов 4, направляющие ползунов с подшипниками 5, ползуны 6, эксцентрические кулачки 7, бобышки 8, тензодатчики 9 в стакане, ось привода кулачков эксцентриков 10.

$G_{сл}$ – усилие, передаваемое со стороны слитка на датчик нагрузки;

Δh – высота подъема, равная высоте эксцентриситета кулачков 7.

В результате вращения кулачков 7 происходит перемещение площадки 4, а с ней - ползунов 6. В качестве тензометрических датчиков используются таблеточные датчики веса.

Расположение частей системы подачи стальных слитков в печь с автоматическим измерителем веса в своем составе приведена в документе 270304.2018.338.01.01 С7 Система подачи слитков в печь предварительного нагрева (в приложении Б на схеме 1).

В рамках проектирования автоматического измерителя должны быть рассмотрены его информационная и силовая составляющие. Информационная составляющая включает в себя аппарат и процедуры измерения физической величины, преобразование в электрический сигнал и конечное представление. Силовая часть автоматического измерителя является сопровождающей, призвана обеспечить необходимые условия для прохождения измерения.

2.2 Информационное устройство измерителя

2.2.1 Виды тензометрических датчиков

На производстве измерение массы преследует как технологические цели: в рамках технологического процесса или контроля качества; так и экономические цели: контроль и учет выпуска продукции. От измерительных устройств требуется точность и достоверность измерений, надежность и безотказность работы, легкость в установке, обслуживании и эксплуатации.

Измерение массы осуществляется через измерение силы тяжести. Существует несколько принципиально различных методов измерения усилия: измерение силы

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

по уравновешивающей усилие, измерение давления в среде-измерителе и измерение деформации под действием усилия.

К первому относится уравновешивание измеряемого усилия силой, например, пневматического, гидравлического или электродинамического устройства, и в этом случае какой-либо деформации не происходит вообще.

Во втором случае при воздействии усилия на среду-измеритель через поршень, изменяется её давление и фиксируется манометром, затем информация об изменении давления сопоставляется с величиной усилия.

В третьем случае измерение происходит за счет деформации твердого измеряющего органа: балки, пружины, пластины, нити и так далее. После чего происходит преобразование степени деформации в уровень электрического сигнала.

Если преобразование производят вторичные измерители (оптические, индуктивные, резистивные), то измеритель называют с электрически неактивным элементом.

Если деформируемый орган в результате деформации вырабатывает электрический сигнал или меняет свои электрические или магнитные свойства, то его называют электрически активным. В электрически активных элементах используются следующие физические явления: магнитоупругость, пьезоэлектрический и тензорезистивный эффект.

Рассмотрим тензорезистивные датчики, как наиболее надежные, точные, универсальные и распространенные в промышленной среде.

2.2.2 Принципы работы

Принцип действия тензорезистора заключается в изменении длины и поперечного сечения проводников или полупроводников, и, как следствие, изменении величины сопротивления, что показано в формуле 2.1.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

где R , ΔR – начальное значение и приращение сопротивления;

ρ , $\Delta \rho$ – начальное значение и приращение удельного сопротивления;

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$S, \Delta S$ – начальное значение и приращение поперечного сечения;

$L, \Delta L$ – начальное значение и приращение длины.

Выразив площадь через диаметр сечения, а также их отношение и отношение их приращений:

$$S = \pi d^2/4, \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta S}{\Delta d} = 2\pi/4, \quad \frac{S}{d} = \pi/4, \quad (2.3, 2.4)$$

получаем:

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d}.$$

Тогда

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (2\nu + 1) \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.5)$$

где $\nu = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta L}{L}$ – коэффициент Пуассона, безразмерный коэффициент отношения поперечного сжатия к продольному растяжению, зависящий только от природы материала [49, с. 414]. Может измеряться в миллиметрах на миллиметр (мм/мм), миллиметрах на метр (мм/м) или микрострейнах.

Для металлов удельное сопротивление при деформации почти не меняется, поэтому:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_f \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.6)$$

где K_f – относительный коэффициент деформации или коэффициент тензочувствительности. Для большинства металлических датчиков $K_f \approx 2$.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Полупроводниковые тензоэлементы обладают гораздо большей чувствительностью $K_f \approx 50 \dots 200$ [49, с. 290].

Тензорезистор конструктивно представляет собой змейку тонких проводящих полосок, сделанных из тонкой проволоки, фольги или напыления, на гибкой подложке из ткани, бумаги или полимерной пленки. Длина пластины резистора может быть от 0,4 до 150 мм. Номинал тензорезистора варьируется, применяются и 350, и 600 Ом, но наиболее распространенным и оптимальным является номинал 120 Ом [47, с. 45].

Измерительный мост представляет собой схему моста Уитстона, которая представляет собой четыре соединенных резистора: сопротивление одного требуется определить, номинал двух других известен, и один с регулируемым сопротивлением для балансировки моста (рисунок 3.2). К двум узлам подводится питание, с двух других снимается выходное напряжение, которое определяется как разность потенциалов в узлах.

$$U_d = \varphi_{12} - \varphi_{43} = I_{12} \cdot R_1 - I_{43} \cdot R_4 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot U_{\text{пит}} \quad (2.7)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивления резисторов (рисунок 2);

$\varphi_{12}, \varphi_{43}$ – потенциалы между соответствующими сопротивлениями;

I_{12}, I_{43} – токи, протекающие через соответствующие пары резисторов;

$U_d, U_{\text{пит}}$ – напряжение на выходе датчика и напряжение питания.

При установке тензодатчика, обычно проводят балансировку моста – устанавливают такое значение регулировочного резистора, что напряжение на выходе датчика равно нулю, при отсутствии усилия на измеряемом органе. Тем самым производится аппаратная регулировка нуля шкалы прибора. Регулировку можно выполнить программно, в контроллере, и не прибегать к балансировке моста, однако, в таком случае на выходе датчика всегда будет присутствовать некоторое напряжение смещения, и ограничивать работу прецизионного усилителя мощности.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

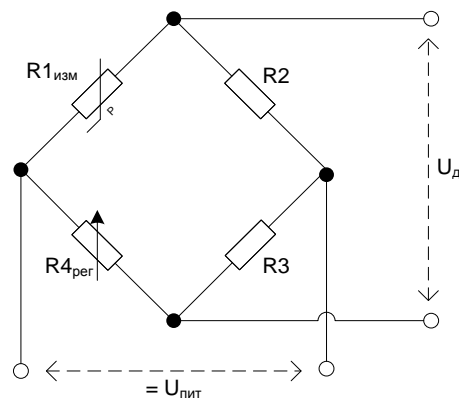


Рисунок 2.2 – Схема измерительного моста

На работу тензорезистивного элемента оказывает значительное влияние температура окружающей среды, так как при измерении деформации сопротивление меняется в пределах десятых долей процента, поэтому тензорезисторы изготавливают из материалов с низким температурным коэффициентом, например из константана – термостабильного сплава меди, никеля и марганца. Также на схеме измерительного моста Уитстона в смежное с измеряющим тензорезистором плечо на место R_2 (рисунок 2.2) подключают идентичный компенсирующий резистор, который не подвергается действию деформации, но находится на общей подложке перпендикулярно измеряющему. Таким образом, тепловой эффект действует одинаково на два резистора из противоположенных веток моста и согласно формуле 2.7 компенсируется, а деформации остается подвержен только один.

Для того чтобы учесть падение напряжения на питающих проводах и устранить влияние их длины на результат измерения, используют шестипроводную схему подключения датчика. Два провода включаются в узлы вместе с питанием и служат для контроля и учета реальной величины питающего напряжения в расчетах по формуле 2.7.

Сама информация о массе, извлекаемая при помощи датчика веса, проходит некоторые преобразования перед своим конечным представлением.

Во-первых, на выходе измерительного моста сигнал усиливается прецизионным усилителем, точность которого в значительной степени определяет точность всего измерения. Далее информационный сигнал в виде напряжения преобразуется в

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

битовую последовательность в аналогово-цифровом преобразователе (АЦП). Разрядность АЦП также как и прецизионный усилитель накладывает ограничение на конечную точность измерения.

Схема измерительных преобразований при использовании тензорезистивного датчика представлена на рисунке 2.3.

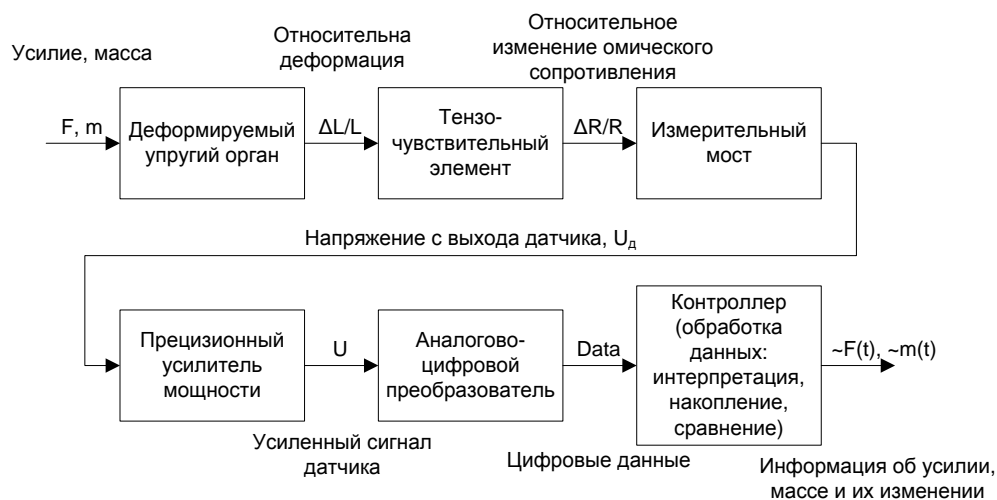


Рисунок 2.3 – Цепочка измерительных преобразований

В записке к патенту, на основе которого разрабатывается рассматриваемое устройство, был предложен к использованию отечественный таблеточный тензорезистивный датчик 9035 ДСТ [51] с четырехпроводной схемой подключения. Номинальное усилие находится как:

$$G_{\text{ном}} = \frac{G_{\text{сл}}}{4} = \frac{37700}{4} \approx 1000 \text{ (Н)}. \quad (2.8)$$

Таблица 2.1 – Паспортные данные тензодатчика 9035 ДСТ

Номинальное усилие, кН	Класс точности	Погрешность, %	Диапазон температур, °С
10	0,10	±0,10	-50... + 50

Регистрация измерения с выхода датчика происходит на модуле аналогового входа контроллера Siemens S7-300. Процесс преобразования сигнала с выхода датчика до регистратора представлен на блок-схеме на рисунке 2.4.

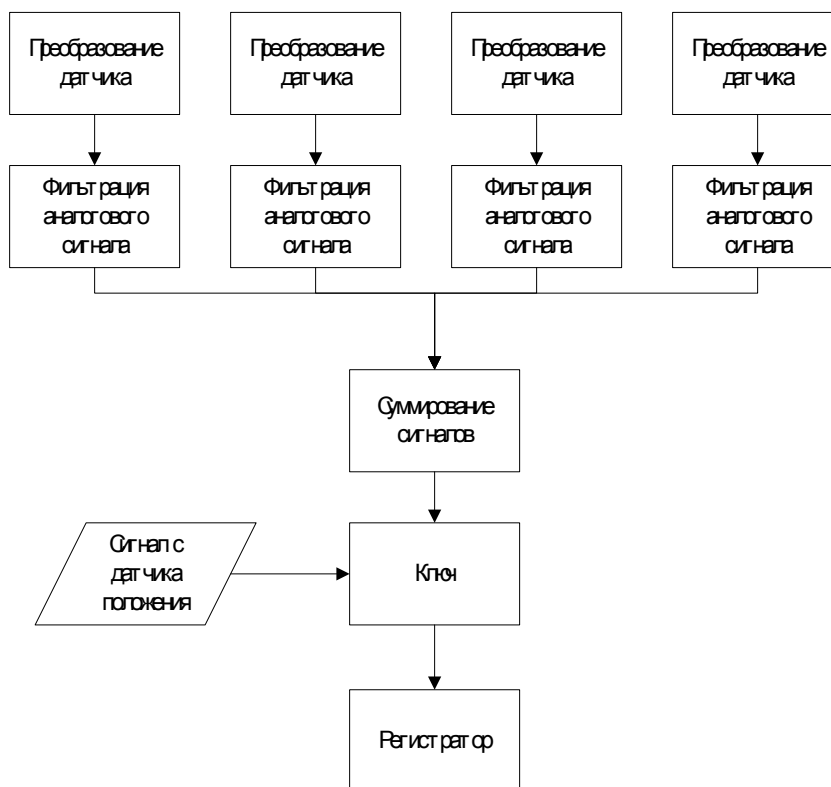


Рисунок 2.4 – Блок-схема измерения и преобразования сигнала датчика

Преобразование датчика, фильтрация и усиление происходят в части датчика. Считывание, суммирование и регистрация сигналов происходят в части контроллера.

2.3 Механический расчет

2.3.1 Определение нагрузки

Перед выбором привода необходимо определить характер нагрузки, какую работу будет выполнять привод, и режим в котором работа будет выполняться приводом.

Найдем полную мощность процесса как сумму статической и динамической составляющих.

$$P = P_{\text{стат}} + P_{\text{дин}}, \quad (2.9)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

$$P = (M_{\text{дин}} + M_{\text{стат}}) \cdot \omega_{\text{max}}, \quad (2.10)$$

где $M_{\text{дин}}$ – динамический момент кулачка;

$M_{\text{стат}}$ – статический момент;

ω_{max} – максимальная скорость вращения.

Электропривод через эксцентрический передаточный механизм, представленный на рисунке 2.5, осуществляет подъем стального слитка массой от 1700 кг до 3770 кг на высоту $\Delta h = 30$ мм, равную разнице большего диаметра $D = 40$ (мм) и меньшего диаметра $d = 10$ (мм) эксцентрикового кулачка. Кинематическое соотношение, связывающее линейный подъем с углом поворота у такого механизма имеет вид [6, с. 281]:

$$h = \Delta h \cdot \sin(\alpha), \quad (2.11)$$

где α – угол положения вала кулачка (от 0 до 90°).

Передача скорости из вращательной в линейную в механизме равна:

$$v(t) = \dot{h} = \Delta h \cdot \cos(\alpha) \cdot \omega(t). \quad (2.12)$$

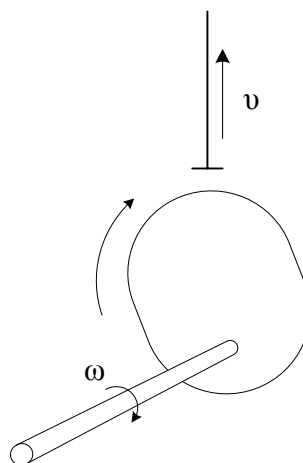


Рисунок 2.5 – Механическая передача

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Момент сопротивления нагрузки равен произведению векторов усилия нагрузки и радиус-вектора направленного от оси вращения к точке приложения силы. Все вектора представлены на рисунке 2.6.

$$\vec{M} = \vec{G}_{\text{сл}} \times \vec{r}, \quad (2.13)$$

$$M = |G_{\text{сл}}| \cdot |r| \cdot \sin(\theta), \quad (2.14)$$

где $G_{\text{сл}} = M_{\text{сл}} \cdot g$ – вес слитка, как его масса, умноженная на ускорение свободного падения;

$r = \frac{d}{2} + h$ – длина радиус-вектора;

θ – угол между вектором силы и радиус-вектором.

Причем, несложно заметить, что при увеличении угла α , угол θ уменьшается, и наоборот. Для углов имеет место соотношение: $\theta = 90 - \alpha$. И тогда:

$$\sin(\theta) = \cos(\alpha).$$

Тогда, с учетом всех определений, перепишем уравнение (2.13):

$$M = G_{\text{сл}} \cdot \left(\frac{d}{2} + \Delta h \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot \cos(\alpha), \quad (2.15)$$

и статический момент силы найдем как максимум этого выражения:

$$M_{\text{стат}} = \max(M). \quad (2.16)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

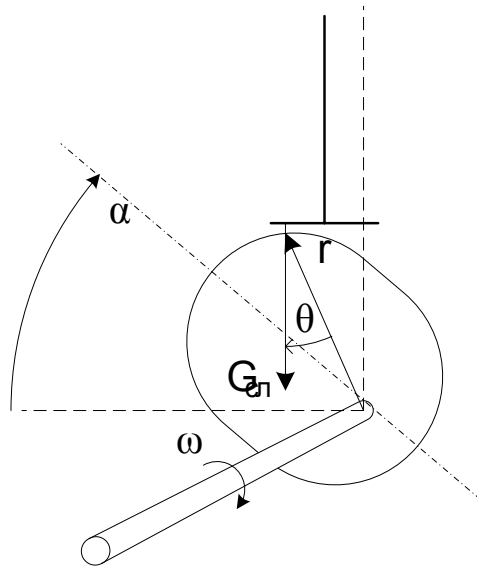


Рисунок 2.6 – Механическая передача с векторами

Динамический момент возникает под действием сил инерции при изменении скорости движения:

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon, \quad (2.17)$$

где J – момент инерции нагрузки;

ε – угловое ускорение.

Найдем момент инерции. Для этого предположим, что кинетическая энергия вращения, выражаемая как:

$$E_{\text{к}_\omega} = J \cdot \frac{\omega^2}{2}; \quad (2.18)$$

полностью передается в кинетическую энергию поступательного движения ползуна:

$$E_{\text{к}_v} = m \cdot \frac{v^2}{2}. \quad (2.19)$$

Тогда, исходя из равенства (2.17) и (2.18) и с учетом (2.12):

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$J \cdot \frac{\omega^2}{2} = m \cdot \frac{v^2}{2} \Rightarrow J = m \cdot \frac{v^2}{\omega^2} = m \cdot \Delta h^2. \quad (2.20)$$

2.3.2 Описание процесса

В процессе измерения, после установления положения взвешиваемой заготовки и до фиксации измерения необходимо предусмотреть время для затухания колебательного процесса в системе, для чего выделяется 6 секунд времени всего процесса. Все этапы измерения должны укладываться в 10 секунд. Таким образом, составим временную диаграмму процесса и приведем её на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Временная диаграмма процесса

Процесс подъема требует невысокую продолжительность включения привода, но интенсивную отработку небольшого перемещения, при котором двигатель не успевает разогнаться до полной скорости. Двигатель разгоняется с ускорением, ограниченным максимальным током якоря двигателя, после чего отработав половину пути, тормозит с максимальным замедлением. Такому характеру работы двигателя соответствует рабочий график, представленный на рисунке 2.8 [53, с. 30-32].

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

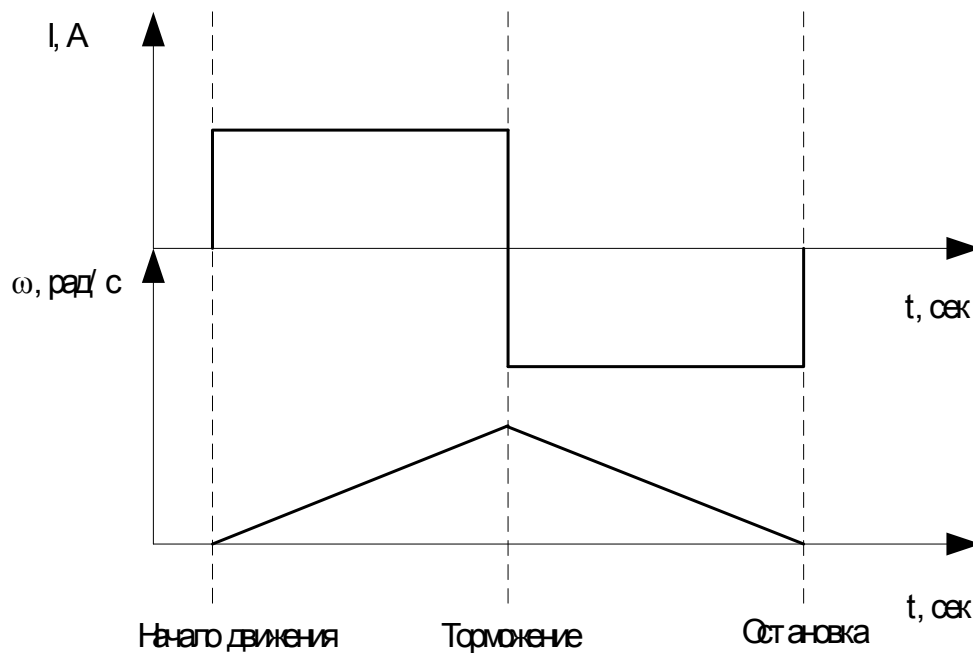


Рисунок 2.8 – Рабочий график привода

2.3.3 Расчет параметров

Из рисунка 2.8 становится ясно, что за 2 секунды вал должен провернуться на 90° вокруг оси. С учетом графика из рисунка 2.6 найдем максимальную скорость вращения.

$$\frac{\pi}{2} = \int \omega dt = \int \varepsilon \cdot t dt = \varepsilon \cdot \frac{t^2}{2}, \quad (2.21)$$

Так как процессы разгона и торможения симметричны, найдем интеграл на всем участке от 0 до 2 секунд как удвоенный интеграл на участке от 0 до 1 секунды.

$$\frac{\pi}{2} = 2 \cdot \varepsilon \cdot \frac{1^2}{2} + 0 \Rightarrow \varepsilon = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right).$$

Максимальную скорость кулачка найдем как произведение ускорения на время разгона.

$$\omega_{\max} = \frac{\pi}{2} \cdot 1 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right).$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Согласно формуле (2.19) найдем момент инерции, затем по формуле (2.16) найдем момент динамической нагрузки:

$$J = 3770 \cdot 0,03^2 = 3,393 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)},$$

$$M_{\text{дин}} = 3,393 \cdot \frac{\pi}{2} = 5,33 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Для нахождения статической нагрузки воспользуемся средством MathCAD и формулами (2.14, 2.15).

$$M(\alpha) = 3770 \cdot 10 \cdot \left(\frac{0,01}{2} + 0,03 \sin(\alpha) \right) \cdot \cos(\alpha),$$

Построим зависимость момента нагрузки от угла положения эксцентрика и найдем максимум:

$$M(\alpha) := G_{\text{сд}} \cdot \left(\frac{d}{2} + \Delta h \cdot \sin(\alpha) \right) \cdot \cos(\alpha), \quad \text{где } \alpha := 0, \frac{\pi}{120} \dots \frac{\pi}{2}$$

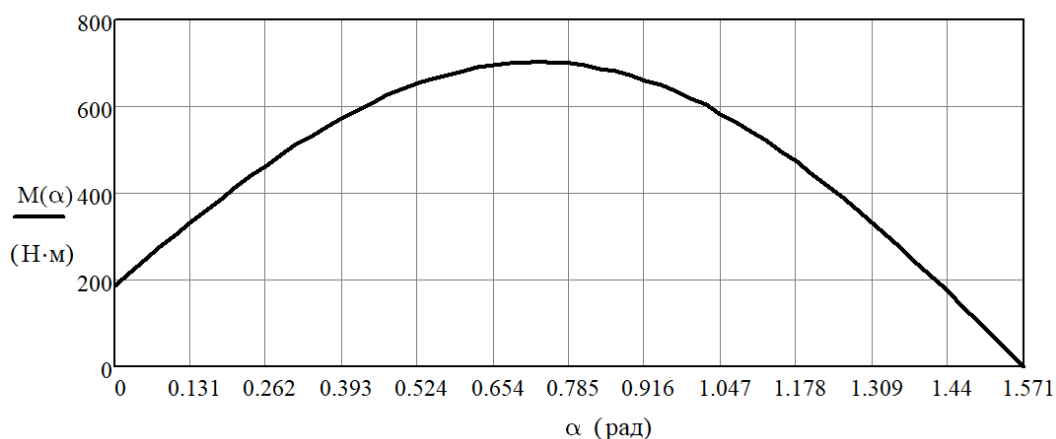


Рисунок 2.9 – Зависимость M(α)

Найдем точное значение максимума, воспользовавшись функцией Maximize предварительно задав начальное значение.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\alpha := 0.654 \text{ (рад)}$$

$$P := \text{Maximize}(M, \alpha) = 0.73 \text{ (рад)}$$

$$M(P) = 702.498 \text{ (Н·м)}$$

Рисунок 2.10 – Снимок экрана программы

Таким образом,

$$M_{\text{стат}} = 702,5 \text{ (Н·м)}.$$

Суммарная требуемая мощность по формуле (2.9):

$$P = (702,5 + 5,33) \cdot \frac{\pi}{2} = 1112 \text{ (Вт)}.$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.4 Электропривод кулачкового механизма

2.4.1 Выбор электропривода

При выборе электропривода в первую очередь следует решить, какой тип двигателя в этом приводе будет использоваться, постоянного тока (ДПТ) или переменного. Асинхронные машины переменного тока долговечнее, проще в обслуживании, их коэффициент полезного действия (КПД) выше, чем у машин постоянного тока, а стоимость ниже [7, с.164]. Однако они требуют более сложного управления, имеют низкие пусковые моменты и не способны работать на низких оборотах. Синхронные машины переменного тока обладают самым высоким КПД и надежностью, но конструктивно сложнее и, следовательно, дороже [7, с.222].

Машины постоянного тока начали применяться гораздо раньше машин переменного, их работа лучше изучена, регулировка оказывается проще. Скорость выходного вала пропорциональна напряжению якорной обмотки и во всем диапазоне от нуля до номинальной скорости может развивать полный крутящий момент. Их использование уместно везде, где требуется обеспечить высокий момент при низкой скорости. Двигатели постоянного тока меньше по габаритам и массе аналогичных асинхронных двигателей, они обладают более низким моментом инерции, что дает им преимущество в реверсивных приводах, так как требуется меньше времени на разгон и торможение.

В целом, в соответствии с вышесказанным и по расчетам и описанию технологического процесса в пунктах 2.3.2 и 2.3.3 можно сделать вывод, что для выполнения задачи отработки низкоскоростного движения со сменой направления целесообразно выбрать привод постоянного тока.

По результатам механического расчета можно сделать вывод, что нужен электропривод позиционный, с трехфазным реверсивным тиристорным преобразователем, построенным по мостовой схеме, для управления направлением тока в якорной обмотке и вращения вала ротора. Мощность двигателя определим из диапазона, учитывающего некоторый запас к расчетной мощности, полученной в пункте 2.3 [28, с. 291]

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P = 1,2 \dots 2,5 \cdot P_{\text{расч.}} \quad (2.22)$$

В качестве электропривода выберем электропривод постоянного тока ЭПТ-2, включающий схему питания, схему возбуждения, систему импульсно-фазового управления, мостовую схему реверсивного включения, трехфазную тиристорную схему преобразования напряжения, двухконтурную схему регулирования на ПИ-регуляторе по току и П-регуляторе по скорости.

Элетропривод комплектуется датчиком тока LT100-P. Его параметры приведены в таблице 2.2 [52].

Таблица 2.2 – Паспортные данные датчика тока LT100-P

Диапазон преобразований, А	Коэффициент преобразования, В/А
±150	0,09

Расчет элементов привода проводится с опорой на пособие «Тиристорный следящий электропривод» А.М. Лебедева из НИИ Электропривода [38].

2.4.2 Выбор двигателя

Исходя из формулы (2.22) выберем электродвигатель постоянного тока по мощности в диапазоне от 1 350 до 2 780 Вт. Условиям удовлетворяет двигатель марки 2ПН160М Г УХЛ4 со встроенным тахогенератором ТС1М. Паспортные данные двигателя приведены в таблице 2.3, тахогенератора в таблице 2.4 [33, с. 372].

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 2.3 – Паспортные данные двигателя 2ПН160М Г УХЛ4

Мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Скорость, об/мин		Момент инерции, кг·м ²	КПД, %
		номинальная	максимальная		
3	220	750	2500	0,048	76,5
Сопrotивление обмотки, Ом					
Якоря	Возбуждения	Добавочных полюсов		Индуктивность якоря, мГн	Напряжение обмотки возбуждения, В
0,732	128	0,485			
				20,2	220
					39

Таблица 2.4 – Паспортные данные тахогенератора ТС1М

Крутизна выходного напряжения, В/мин ⁻¹	Скорость вращения, об/мин			Номинальное сопротивление нагрузки, кОм	Масса, кг	Марка щеток
	Макс.	Ном.	Мин.			
0,03 ±15%	5000	3000	0,1	2	2,7	ЭГ74 4x5x12,5 мм

2.4.3 Выбор редуктора

Подключение электропривода к нагрузке осуществляется через понижающий редуктор, когда задачей привода является небыстрое перемещение массивного объекта. Исходя из механического расчета нагрузки в п. 2.3 выходной вал привода должен осуществлять вращение со скоростью $\omega_c = \omega_{max} = \pi/2$ (рад/с) или:

$$n_c = \omega_c \cdot \frac{60}{2\pi} = 30 \left(\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right), \quad (2.23)$$

создавая усилие равное:

$$M_c = M_{\text{стат}} + M_{\text{дин}} = 707,83 \text{ (Н·м)}. \quad (2.24)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

По паспортным данным двигателя из таблицы 2.1 найдем номинальные скорость и момент двигателя. Номинальная скорость равна $n_{\text{НОМ}} = 750$ (об/мин) или:

$$\omega_{\text{НОМ}} = n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{2\pi}{60} = 750 \cdot \frac{2\pi}{60} = 78,54 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right), \quad (2.25)$$

а значение номинального момента найдем из скорости и мощности, учитывая коэффициент полезного действия машины:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{ДВИГ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \cdot \eta = \frac{3000}{78,54} \cdot 0,765 = 29,22 \text{ (Н}\cdot\text{м)}, \quad (2.26)$$

где $P_{\text{ДВИГ}} = 3000$ (Вт) – мощность двигателя;

$\eta = 0,765$ – коэффициент полезного действия.

Определим передаточное число редуктора через отношение моментов и скоростей:

$$M_{\text{с2}} = \frac{M_{\text{с1}}}{i_{\text{ред}}} = \frac{708}{25} = 28,32 \text{ (Н}\cdot\text{м)} \quad (2.27)$$

$$\frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{707,83}{29,22} = 24,223,$$

$$\frac{n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{с}}} = \frac{750}{30} = 25.$$

Выберем редуктор с передаточным отношением $i_{\text{ред}} = 25$ и номинальным моментом на выходном валу от 707,83 (Н·м). Из ряда редукторов 1Ц2У выберем 1Ц2У-160 с передаточным числом 25. Паспортные данные редуктора приведены в таблице 2.5 [56].

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 2.5 – Паспортные данные редуктора 1Ц2У-160

Передаточное число	Номинальный момент на тихоходном валу, Н · м	КПД, %	Масса, кг
25	1250	97	95

2.4.4 Расчет схемы питания

Схема питания включает в себя трансформатор, модель которого нужно выбрать исходя из мощности и питающего напряжения двигателя.

Теоретическое значение фазной ЭДС:

(2.28)

$$E_{2\phi} = k_H \cdot U_{\text{ном}} = 0,755 \cdot 220 = 166,1 \text{ (В)},$$

где $k_H = 0,922$ – коэффициент схемы трансформатора по напряжению.

Фазное напряжение вторичной обмотки с учетом необходимого запаса:

(2.29)

$$U_{2\phi} = k_u \cdot k_\alpha \cdot k_R \cdot E_{2\phi},$$

где $k_u = 1,1$ – коэффициент запаса снижения напряжения сети;

$k_\alpha = 1,1$ – коэффициент запаса неполного открытия тиристорov;

$k_R = 1,05$ – коэффициент запаса внутреннего сопротивления тиристорov.

(2.30)

$$U_{2\phi} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 202,84 = 211,03 \text{ (В)}.$$

Ток вторичной обмотки:

(2.31)

$$I_2 = k_i \cdot k_{T2} \cdot I_{\text{ном}},$$

где $k_i = 1,1$ – коэффициент запаса по форме тока;

$k_{T2} = 0,815$ – коэффициент схемы по току вторичной обмотки;

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

$I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток обмотки якоря электродвигателя, который можно найти по следующей формуле:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}/\eta - U_{\text{ВО}}^2/R_{\text{ВО}}}{U_{\text{НОМ}}}, \quad (2.32)$$

где $P_{\text{НОМ}} = 3$ (кВт) – мощность двигателя;

$\eta = 0,765$ – его коэффициент полезного действия;

$U_{\text{НОМ}} = 220$ (В) – номинальное напряжение обмотки якоря;

$U_{\text{ВО}} = 220$ (В) – номинальное напряжение обмотки возбуждения;

$R_{\text{ВО}} = 128$ (Ом) – сопротивление обмотки возбуждения.

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{3000/0,765 - 220^2/128}{220} = 16,107 \text{ (A)}.$$

Тогда:

$$I_2 = 1,1 \cdot 0,815 \cdot 16,107 = 14,44 \text{ (A)}.$$

Найдем коэффициент трансформации:

$$k_{\text{ТР}} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot U_{2\phi}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 257,708} = 1,04, \quad (2.33)$$

где $U_1 = 380$ (В) – сетевое линейное напряжение.

Коэффициент схемы по току первичной обмотки: $k_{\text{T1}} = 0,815$; ток первичной обмотки:

$$I_1 = k_i \cdot k_{\text{T1}} \cdot \frac{I_{\text{НОМ}}}{k_{\text{ТР}}} = 1,1 \cdot 0,815 \cdot \frac{16,107}{0,851} = 13,889 \text{ (A)}. \quad (2.34)$$

Мощность трансформатора:

$$P_{\text{T}} = k_u \cdot k_\alpha \cdot k_i \cdot k_M \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}}, \quad (2.35)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где $k_M = 1,065$ – коэффициент схемы по мощности.

Тогда:

$$P_T = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,065 \cdot 220 \cdot 16,107 = 5023 \text{ (Вт)}.$$

2.4.5 Выбор трансформатора

Выберем трехфазный трансформатор с естественным охлаждением и защитным исполнением мощностью до 7,5 (кВА) ТСЗИ-7.5 и приведем его паспортные данные в таблице 2.6 [9].

Таблица 2.6 – Паспортные данные трансформатора ТСЗИ-7.5

Номинальная мощность, Вт	Напряжение, В	Схема соединения	Масса
7,5	380; 220	Y-Y	60

2.4.6 Расчет параметров якорной цепи

Для ограничения уравнительных токов, дополнительно нагружающих вентили и трансформаторы, применяют уравнительные дроссели. Индуктивность их выбирают такой, чтобы уравнительный ток не превышал 10 % от номинального тока нагрузки.

Примем ток реактора равным:

(2.36)

$$I_{ур} = 0,3 \cdot I_{ном} = 0,3 \cdot 16,107 = 4,832 \text{ (А)}.$$

С учетом коэффициента для принятой схемы выпрямления $k_y = 0,18$ рассчитаем индуктивность двух реакторов:

$$L_y = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\phi}}{2\pi \cdot f \cdot I_{ур}} \cdot k_y = \frac{\sqrt{2} \cdot 257,708}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,832} \cdot 0,18 = 0,035 \text{ (Гн)}, \quad (2.37)$$

где $f = 50$ (Гц) – частота питающей сети.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Индуктивность одного реактора:

$$L_{1y} = 0,7 \cdot L_y = 0,7 \cdot 0,035 = 0,025 \text{ (Гн)}. \quad (2.38)$$

Примем сопротивление реактора равным:

(2.39)

$$R_y = 0,4 \cdot (R_{я} + R_{доб}) = 0,4 \cdot (0,732 + 0,485) = 0,293 \text{ (Ом)},$$

где $R_{я}$ – сопротивление обмоток якоря.

Заданная активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_a = 0,03 \text{ (В)}.$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке:

(2.40)

$$R_T = \frac{U_a \cdot U_{2\phi}}{I_2} = \frac{0,03 \cdot 257,708}{10,258} = 0,438 \text{ (Ом)}.$$

Заданное индуктивное составляющее напряжения короткого замыкания:

$$U_L = 0,095 \text{ (В)}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора, приведенное ко вторичной обмотки:

$$X_T = \frac{U_L \cdot U_{2\phi}}{I_2} = \frac{0,095 \cdot 257,708}{10,258} = 1,388 \text{ (Ом)}. \quad (2.41)$$

Сопротивление, которое вносится за счет перекрытия анодных токов:

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$R_{\Pi} = \frac{3 \cdot X_T}{2\pi} = \frac{3 \cdot 2,387}{2\pi} = 0,663 \text{ (Ом)}. \quad (2.42)$$

Сопротивление щеточного контакта:

$$R_{\text{щ}} = \frac{2}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{2}{16,107} = 0,124 \text{ (Ом)}.$$

В итоге полное активное сопротивление цепи якоря равно:

$$\begin{aligned} R_{\text{полн}} &= 1,2 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}) + R_{\text{y}} + R_{\text{T}} + R_{\Pi} + R_{\text{щ}} = \\ &= 1,2 \cdot (0,732 + 0,485) + 0,293 + 0,438 + 0,663 + 0,124 = 3,1 \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке:

$$L_{\text{T}} = \frac{X_{\text{T}}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,387}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,419 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}. \quad (2.44)$$

В итоге полная индуктивность якорной цепи равна:

$$\begin{aligned} L_{\text{полн}} &= L_{\text{я}} + L_{\text{T}} + L_{\text{ly}} = \\ &= 20,2 \cdot 10^{-3} + 4,419 \cdot 10^{-3} + 0,025 = 0,049 \text{ (Гн)}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Электромагнитная постоянная времени цепи якоря:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{полн}}}{R_{\text{полн}}} = \frac{0,049}{3,173} = 0,016 \text{ (с)}. \quad (2.46)$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя с нагрузкой, приведенной к валу двигателя:

$$T_{\text{м}} = \frac{(J + J_{\text{с2}}) \cdot R_{\text{полн}}}{K_{\text{е}} \cdot K_{\text{м}}} = 0,027 \text{ (с)}, \quad (2.47)$$

где $K_{\text{е}} = C_{\text{е}} \cdot \Phi$ и $K_{\text{м}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi$ – конструктивные коэффициенты двигателя;

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$J = 0,048$ (кг·м²) – момент инерции двигателя;

J_{c2} – приведенный момент инерции нагрузки, кг·м².

$$J_{c2} = \frac{J_{c1}}{i_{ред}^2} = \frac{3,393}{25^2} = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ (кг·м}^2\text{)}, \quad (2.48)$$

где $J_{c1} = 3,393$ (кг·м²) – неприведенный момент инерции, рассчитанный в п. 3.3.

$$K_e = \frac{U_{ном} \cdot 1,2 \cdot (R_{я} + R_{доб}) \cdot I_{ном}}{\omega_{ном}} = \quad (2.49)$$
$$= \frac{220 \cdot 1,2 \cdot (0,732 + 0,485)}{78,54} = 2,5 \left(\frac{\text{В·с}}{\text{рад}} \right).$$

$$T_M = \frac{(0,048 + 5,43 \cdot 10^{-3}) \cdot 3,173}{2,502 \cdot 2,502} = 0,027 \text{ (с)}.$$

Расчет был выполнен с помощью средства MathCAD. Текст программы с расчетами приведен в приложении А данной пояснительной записки.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 Функциональная схема электропривода

Электропривод ЭПТ-2 состоит из ряда модулей:

- тиристорный модуль регулирования (МРТ) формирующий напряжение питания электродвигателя постоянного тока;
- модуль питания (МП) тиристорного преобразователя;
- блок предохранителей (БПР) для защиты МП от коротких замыканий;
- модуль возбуждения (МВ) для управления и питания обмотки возбуждения;
- блок ввода (БВ) для подключения МП к сети.

Подключение модулей изображено на рисунке 3.1.

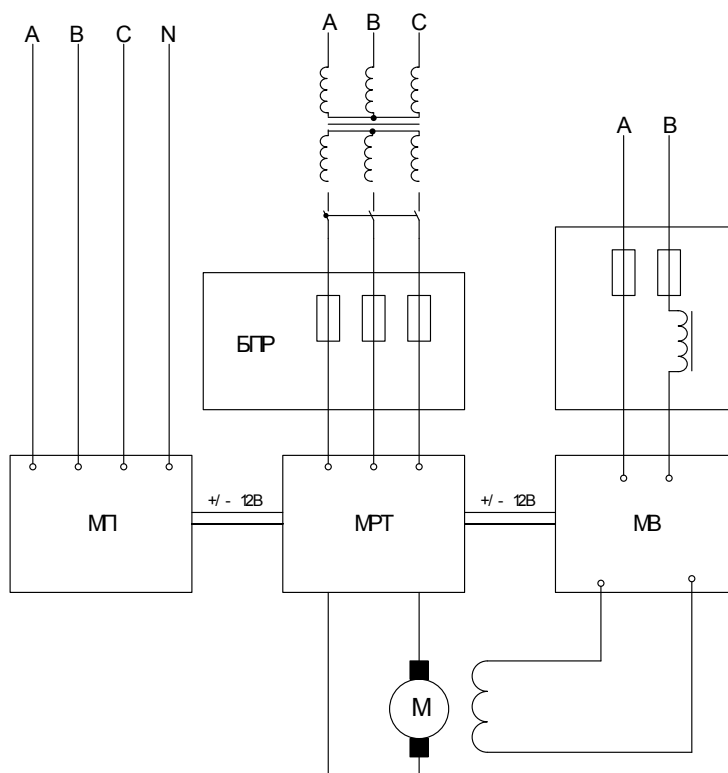


Рисунок 3.1 – Функциональная схема ЭПТ-2

Подробная функциональная электрическая схема модуля МРТ приведена в документе 270304.2018.338.02.01 Э2 (на схеме 2 в приложении Б к данной пояснительной записке).

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.2 Построение структурной схемы

Структурная схема - графическое отображение операторных уравнений объекта. Найдем передаточные функции элементов силовой части автоматического измерителя и построим структурные схему, для дальнейшего моделирования.

3.2.1 Структурная схема двигателя

Точная структурная схема двигателя постоянного тока (ДПТ) представлена на рисунке 4.1.

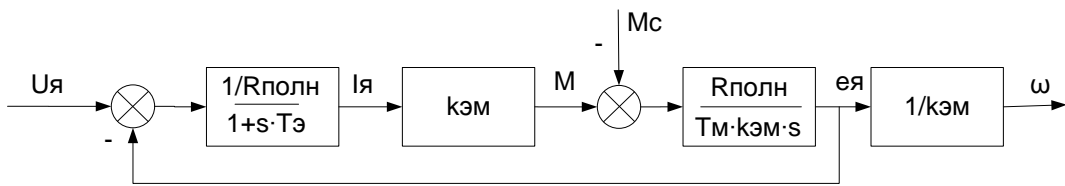


Рисунок 3.2 – Структурная схема двигателя

3.2.2 Передаточная функция тиристорного преобразователя

Передаточную функцию замещения схемы тиристорного преобразователя представим в виде апериодического звена первого порядка [38, с. 53].

$$W_{ТП}(s) = \frac{K_{ТП}}{1 + sT_{ТП}}, \quad (3.1)$$

где $K_{ТП}$ – коэффициент передачи управляющего сигнала тиристорного преобразователя;

$T_{ТП}$ – среднестатистическое запаздывание преобразователя, связанное с частотой напряжения сети, с.

$$K_{ТП} = \frac{U_{я}}{U_{мрт}} = \frac{220}{10} = 22, \quad (3.2)$$

где $U_{я} = 220$ (В) – номинальное якорное напряжение;

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

$U_{\text{мрт}} = 10$ (В) – максимальное напряжение операционного усилителя в тиристорном модуле регулирования (МРТ).

Постоянная времени $T_{\text{тп}}$:

$$T_{\text{тп}} = \frac{1}{m \cdot f} = \frac{1}{6 \cdot 50} = 3,33 \text{ (мс)}, \quad (3.3)$$

где m – количество пульсаций напряжения на выходе мостовой схемы выпрямителя за один период сетевого напряжения трехфазной сети;

$f = 50$ (Гц) – частота напряжения трехфазной сети.

Таким образом:

$$W_{\text{тп}}(s) = \frac{22}{1 + 0,003 \cdot s}.$$

3.3 Настройка контуров регулирования

Определение передаточных функций регуляторов, которые обеспечивают желаемое качество статических характеристик и переходных процессов, называется настройкой регуляторов. Настройка начинается с внутреннего контура, затем переходит к следующему внешнему. Настройку регуляторов контуров тока и скорости будем осуществлять на технический или, по-другому, модульный оптимум (ТО или МО). При настройке на ТО сначала определяется минимальная постоянная времени T_{μ} , затем выбирается регулятор с такой передаточной функцией, чтобы замкнутый контур имел вид передаточной функции фильтра Баттерворта второго порядка:

$$\Phi_{\text{жел}} = \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s + 1}. \quad (3.4)$$

где $k_{\text{ос}}$ – коэффициент обратной связи замкнутого контура.

Для этого передаточная функция цепи разомкнутого контура должна быть равна [1, с. 17]:

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$W_{\text{жел}} = \frac{1}{2T_{\mu}s(1 + s \cdot T_{\mu})}. \quad (3.5)$$

3.3.1 Настройка контура тока

Рассмотрим структурную схему двигателя на рисунке 3.1. При настройке регулятора на технический оптимум схема представляется в упрощенном виде, при следующих допущениях, что обратная связь по ЭДС ($e_{\text{я}}$) отсутствует, и момент сопротивления ($M_{\text{с}} = 0$). Первое объясняется тем, что противо-ЭДС пропорциональна угловой скорости и более инерционна, чем ток якоря, поэтому на переходный процесс влияния не оказывает и в рассмотрение её можно не принимать. Второе объясняется тем, что момент не влияет на характеристическое уравнение системы и может быть принят с любым значением, поэтому для упрощения принимаем его равным нулю.

Тогда структурная схема принимает вид:

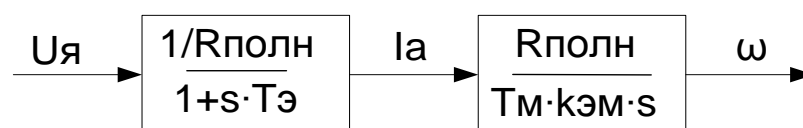


Рисунок 3.3 – Упрощенная структурная схема ДПТ

Составим структурную схему контура управления тока. Тиристорный преобразователь заменим апериодическим звеном из п.3.2.2.

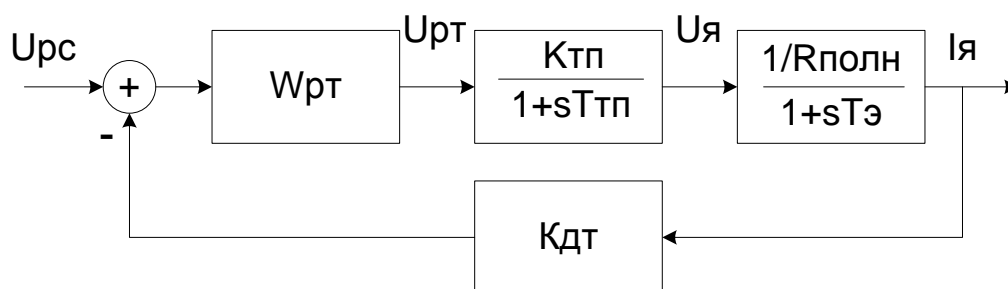


Рисунок 3.4 – Структурная схема контура тока

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Запишем передаточную функцию разомкнутого контура тока.

$$W_{кт}(s) = W_{пт} \cdot \frac{K_{дт} \cdot K_{тп} / R_{полн}}{(1 + s \cdot T_{тп}) \cdot (1 + s \cdot T_э)}, \quad (3.6)$$

где $K_{дт}$ – коэффициент усиления датчика тока, складывается из наклона характеристики датчика тока и коэффициента усиления прецизионного усилителя на его выходе. Найдем его значение как:

$$K_{дт} = \frac{U_{мрт}}{I_{ном}} = \frac{10}{16,107} = 0,621 \text{ (В/А)}. \quad (3.7)$$

Минимальной постоянной времени является время запаздывания тиристорного преобразователя, так как $T_{тп} = 3,33$ (мс), $T_э = 16$ (мс), $T_{тп} < T_э$.

$$T_{\mu} = T_{тп}. \quad (3.8)$$

Приравняем формулы (3.5) и (3.6) и с учетом найдем значение $W_{кт}$.

$$\frac{1}{2T_{тп}s(1 + s \cdot T_{тп})} = W_{пт} \cdot \frac{(K_{дт} \cdot K_{тп} / R_{полн})}{(1 + s \cdot T_{тп}) \cdot (1 + s \cdot T_э)}, \quad (3.9)$$

Упростив и преобразовав выражение, получим:

$$W_{пт} = \frac{K_{дт} \cdot K_{тп}}{R_{полн}} \cdot \left(\frac{1}{2T_{тп}s} + \frac{T_э}{2T_{тп}} \right).$$

И на самом деле, регулятор тока представляет собой пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор с коэффициентами K_i и K_p , которые находятся как:

$$K_p = \frac{K_{дт} \cdot K_{тп}}{R_{полн}} \cdot \frac{T_э}{2T_{тп}}, \quad (3.10)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$K_i = \frac{K_{дт} \cdot K_{тп}}{R_{полн}} \cdot \frac{1}{2T_{тп}}. \quad (3.11)$$

Тогда передаточная функция регулятора тока:

$$W_{рт}(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s}.$$

Подставим числовые значения в выражения (3.10) и (3.11) и найдем эти коэффициенты:

$$K_p = \frac{0,621 \cdot 22}{3,173} \cdot \frac{0,021}{2 \cdot 0,003} = 0,542,$$

$$K_i = \frac{0,621 \cdot 22}{3,173} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,003} = 34,846.$$

Чтобы проверить правильность настройки воспользуемся средствами моделирования Matlab Simulink.

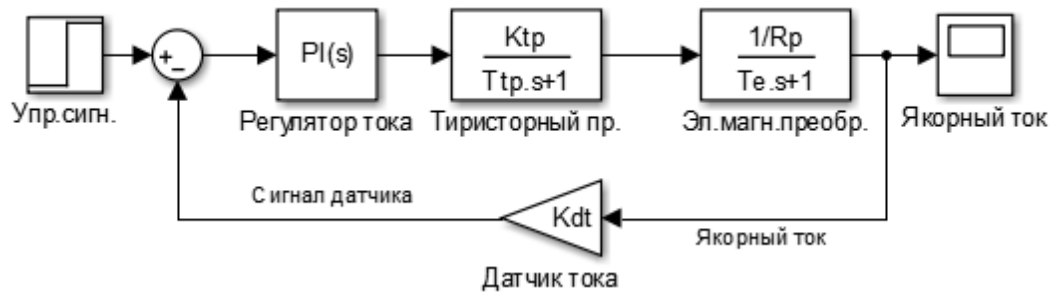


Рисунок 3.5 – Снимок экрана со схемой контура тока

Установим на входе значение управляющего сигнала равное 10 вольт.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

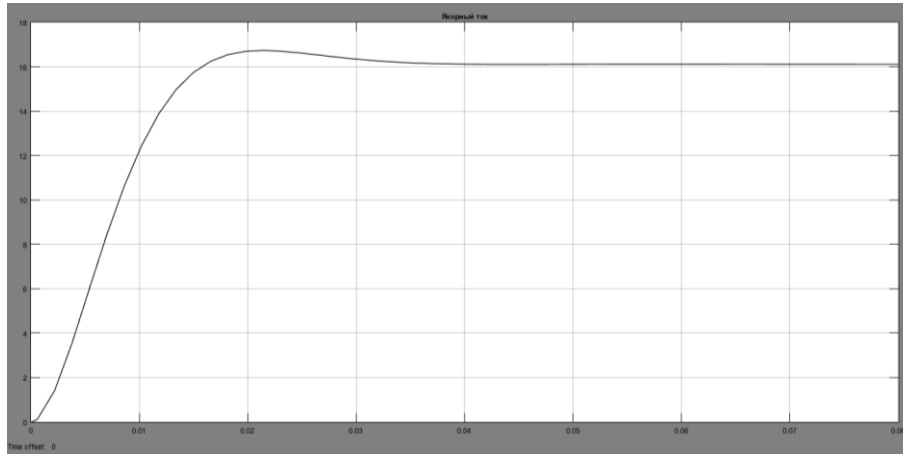
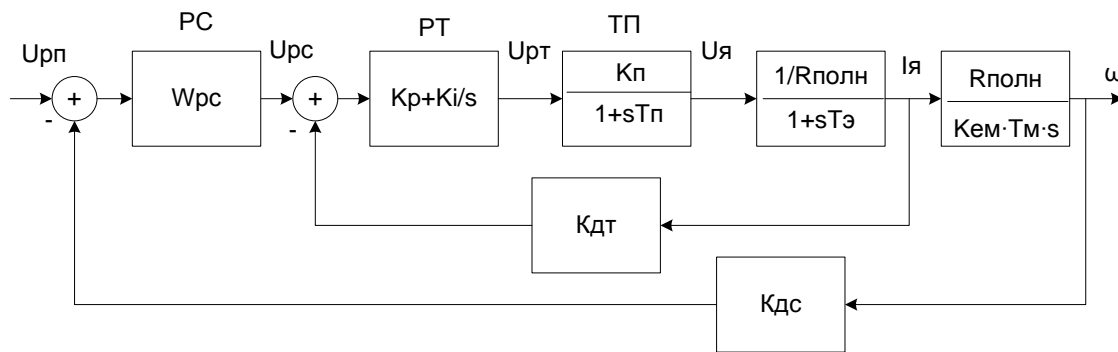


Рисунок 3.6 –Переходная характеристика контура тока

3.3.2 Настройка контура скорости

Построим структурную схему контура скорости и по ней составим передаточную функцию контура.



Рисунок

3.7 – Структурная схема контура скорости

Таким образом, разомкнутый контур скорости описывается произведением передаточной функции регулятора скорости, замкнутого контура тока, настроенного на технический оптимум, передаточной функции двигателя, ответственной за механическое преобразование и датчика скорости.

$$W_{КС} = W_{РС} \cdot \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{ТП}^2 s^2 + 2T_{ТП} s + 1} \cdot \frac{R_{Полн}}{K_{ЭМ} \cdot T_{М} \cdot s} \cdot K_{ДС}, \quad (3.12)$$

где $K_{ЭМ} = 2,621 \left(\frac{В}{рад/с} \right)$ – конструктивный коэффициент двигателя, найденный в п.

2.4.6;

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$K_{дс}$ – коэффициент передачи датчика скорости, состоящего из тахогенератора и некоторого делителя напряжения.

$$K_{дс} = \frac{K_{дп}}{\omega_{ном}} = \frac{10}{78,54} = 0,127 \left(\frac{В}{рад/с} \right). \quad (3.13)$$

На относительно инерционный контур скорости высокочастотная часть функции $2T_{тп}^2 s^2$ не оказывает значительного влияния, и ею можно пренебречь. Тогда минимальная постоянная времени может быть найдена как:

$$T_{\mu} = 2 \cdot T_{тп}. \quad (3.14)$$

Приравнивая уравнения (3.5) и (3.12) получаем:

$$\frac{1}{4T_{тп}s(1 + s \cdot 2T_{тп})} = W_{рс} \cdot \frac{1/K_{дт}}{2T_{тп}s + 1} \cdot \frac{R_{полн}}{K_{ем} \cdot T_{м} \cdot s} \cdot K_{дс}. \quad (3.15)$$

Упростим и выразим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{рс} = \frac{K_{дт} \cdot K_{ем} \cdot T_{м}}{4T_{тп} \cdot K_{дс} \cdot R_{полн}}.$$

Регулятор скорости представляет собой пропорциональный (П) регулятор с коэффициентом K_p , который находится как:

$$K_p = \frac{K_{дт} \cdot K_{ем} \cdot T_{м}}{4T_{тп} \cdot K_{дс} \cdot R_{полн}}. \quad (3.16)$$

Подставим числовые значения на место буквенных и вычислим значение коэффициента.

$$K_p = \frac{0,621 \cdot 2,502 \cdot 0,027}{4 \cdot 0,003 \cdot 0,127 \cdot 3,173} = 7,812.$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Построим модель контура тока.

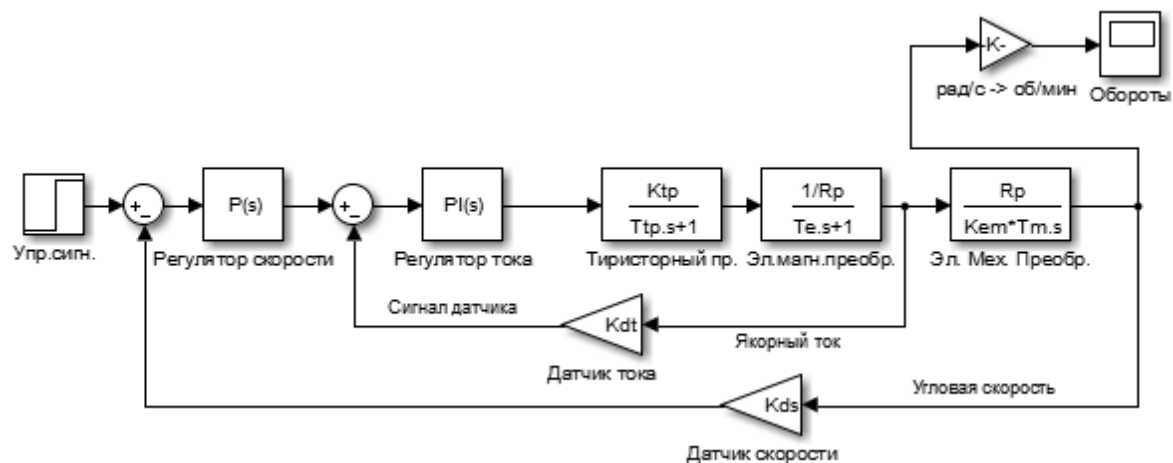


Рисунок 3.8 – Снимок экрана со схемой контура скорости

Установим на вход значение равное 10 вольт и снимем переходную характеристику.

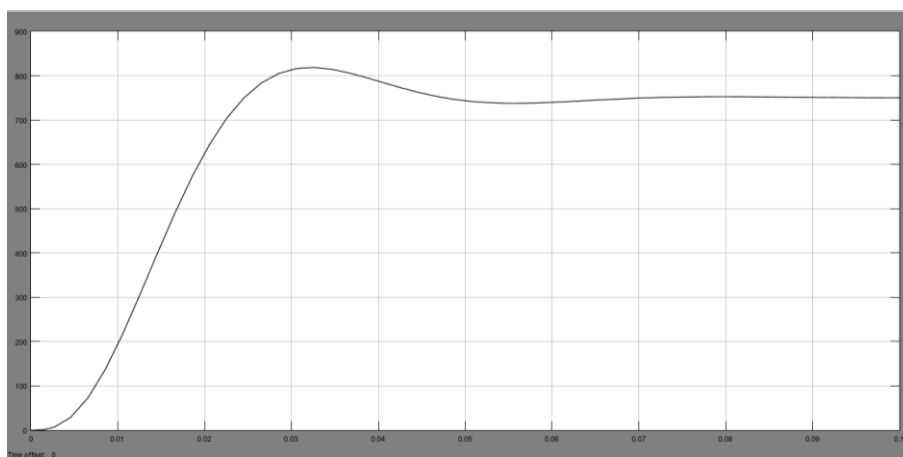


Рисунок 3.9 – Переходная характеристика контура скорости

3.3.3 Настройка контура положения

При настройке контура положения мы не можем использовать критерии технического оптимума и симметричный оптимум, но также появляется перерегулирование, что категорически недопустимо в нашей установке. Рассмотрим ещё один критерий настройки регуляторов – настройка на приведение к виду Бинома Ньютона.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

Бином Ньютона – это разложение целой степени суммы двух переменных на отдельные слагаемые. В общем случае имеет вид:

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} b^k a^{n-k} = \quad (3.17)$$

$$= c_0 a^n + c_1 a^{n-1} b + \dots + c_k a^{n-k} b^k + \dots + c_n b^n,$$

где a и b – некоторые переменные;

n – целое число;

c_k – коэффициент слагаемого.

Бином Ньютона образует Пирамиду Паскаля – пирамиду чисел, где каждые два числа в строке в сумме образуют число, находящееся между ними на строке ниже [43, 59].

1														
1		1												
1			2		1									
1				3		3		1						
1					4		6		4		1			
1						5		10		10		5		1
						...								

Рисунок 3.10 – Пирамида Паскаля

Контур скорости, настроенный на ТО имеет вид:

$$\Phi_{\text{кc}} = \frac{1/K_{\text{дc}}}{8T_{\text{тп}}^2 s^2 + 4T_{\text{тп}} s + 1}. \quad (3.18)$$

На выходе контура скорости ставится редуктор, коэффициент которого был рассчитан в п. 2.4.3, а также интегрирующее звено, так как угловое положение есть

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

интеграл, взятый от угловой скорости по времени. В обратной связи ставится датчик положения – абсолютный энкодер.

Составим структурную схему и запишем по ней передаточную функцию разомкнутой цепи.

Алгоритм синтеза регулятора, изложенный в трудах звание В.В. Григорьева [21], используем для расчета параметров регулятора в нашей работе. Сам алгоритм основан на трудах, изложенных в учебном пособии И.В. Мирошника [40].

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

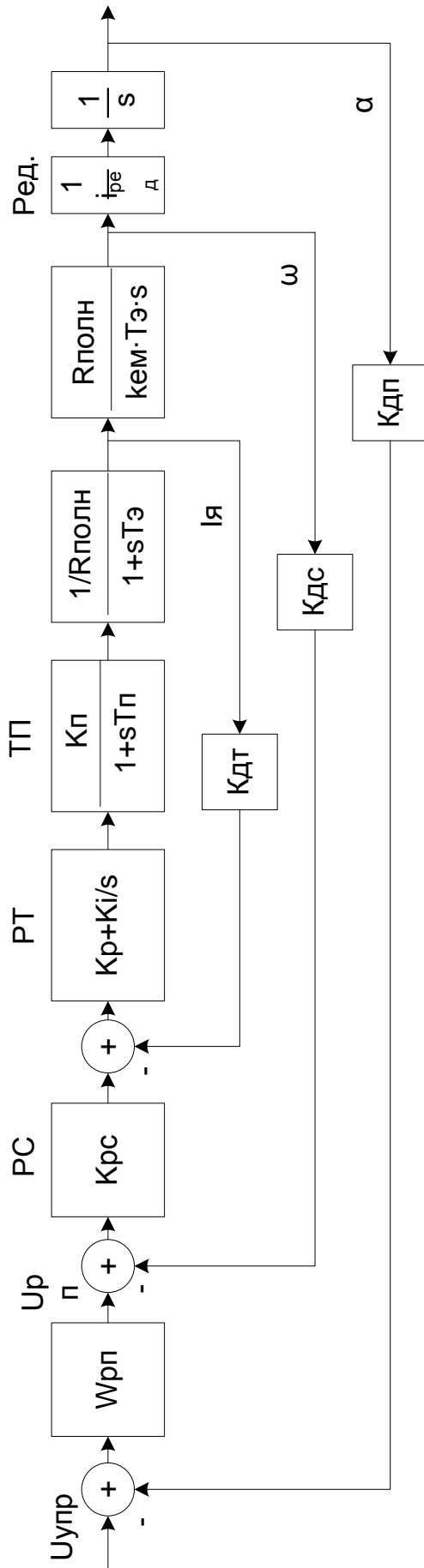


Рисунок 3.11 – Структурная схема контура положения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

270304.2018.338.00 ПЗ

Лист
50

Настройка регулятора на Биноме Ньютона заключается в приведении функции замкнутого контура к виду:

$$\Phi_{\text{жел}}(s) = \frac{1/k_{\text{ос}}}{(Ts + 1)^n}. \quad (3.19)$$

Для начала определим порядок объекта управления. Замкнутый контур скорости описывается функцией:

$$\Phi_{\text{кс}}(s) = \frac{1/K_{\text{дс}}}{8T_{\text{тп}}^2 s^2 + 4T_{\text{тп}} s + 1}. \quad (3.20)$$

Для упрощения модели убираем из рассмотрения высокочастотную составляющую $8T_{\text{тп}}^2 s^2$. На выходе контура скорости ставится редуктор, коэффициент которого был рассчитан в п. 2.4.3, а также интегрирующее звено, так как угловое положение есть интеграл, взятый от угловой скорости по времени. В обратной связи ставится датчик положения – абсолютный энкодер.

Составим структурную схему и запишем по ней передаточную функцию разомкнутой цепи.

$$W_{\text{кп}}(s) = W_{\text{рп}} \cdot \frac{1/K_{\text{дс}}}{4T_{\text{тп}} s + 1} \cdot \frac{1}{i_{\text{ред}}} \cdot \frac{1}{s} \cdot K_{\text{дп}}, \quad (3.21)$$

где $W_{\text{рп}}$ – функция регулятора положения;

$i_{\text{ред}} = 25$ – передаточное число редуктора;

$K_{\text{дп}}$ – коэффициент датчика положения.

Датчик положения – абсолютный энкодер – передает информацию о положении рабочего вала на регулятор положения в виде бинарного кода. Движение механизма дискретно – вал используется в двух положениях: исходное либо повернутое на 90° . Поэтому значение $K_{\text{дп}}$ целесообразно принять таким, чтобы при поступлении на вход высокого уровня, то есть логической единицы, вал поворачивался на 90° , а при

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

поступлении низкого уровня, логического нуля, возвращался в исходное положение.

Тогда:

$$K_{дп} = \frac{1}{\pi/2} = 0,637.$$

Передаточная функция замкнутого контура положения:

$$\Phi_{кп}(s) = \frac{1/K_{дп}}{\frac{K_{дс} \cdot i_{ред}}{K_{дп} \cdot K_{рп}} \cdot 4 T_{тп} \cdot s^2 + \frac{K_{дс} \cdot i_{ред}}{K_{дп} \cdot K_{рп}} \cdot s + 1}. \quad (3.22)$$

Система второго порядка, то есть $n = 2$. Тогда вид желаемого замкнутого контура будет записываться так:

$$\Phi_{жел}(s) = \frac{1/k_{ос}}{T^2 s^2 + 2Ts + 1} \quad (3.23)$$

и разомкнутая цепь:

$$W_{жел}(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2Ts}. \quad (3.24)$$

Приравняем разомкнутый контур положения к желаемому.

$$\frac{1}{T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu}s} = W_{рп} \cdot \frac{1/K_{дс}}{8T_{тп}^2 s^2 + 4T_{тп}s + 1} \cdot \frac{1}{i_{ред}} \cdot \frac{1}{s} \cdot K_{дп}. \quad (3.25)$$

где $T_{\mu} = 8 T_{тп}$ – минимальная постоянная времени контура.

Преобразуем:

$$\frac{1}{16 T_{тп}s \cdot (4 T_{тп}s + 1)} = W_{рп} \cdot \frac{1/K_{дс}}{4T_{тп}s + 1} \cdot \frac{1}{i_{ред}} \cdot \frac{1}{s} \cdot K_{дп}, \quad (3.26)$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Упростив выражение, получим значение регулятора.

$$W_{pp} = \frac{i_{ред} \cdot K_{дс}}{16 T_{пп} \cdot K_{дп}} \quad (3.27)$$

Подставим числовые значение и вычислим.

$$W_{pp} = \frac{25 \cdot 0,127}{16 \cdot 0,003 \cdot 0,637} = 93,759.$$

Регулятор является пропорциональным звеном. Построим структурную схему контура положения в Matlab и промоделируем процесс.

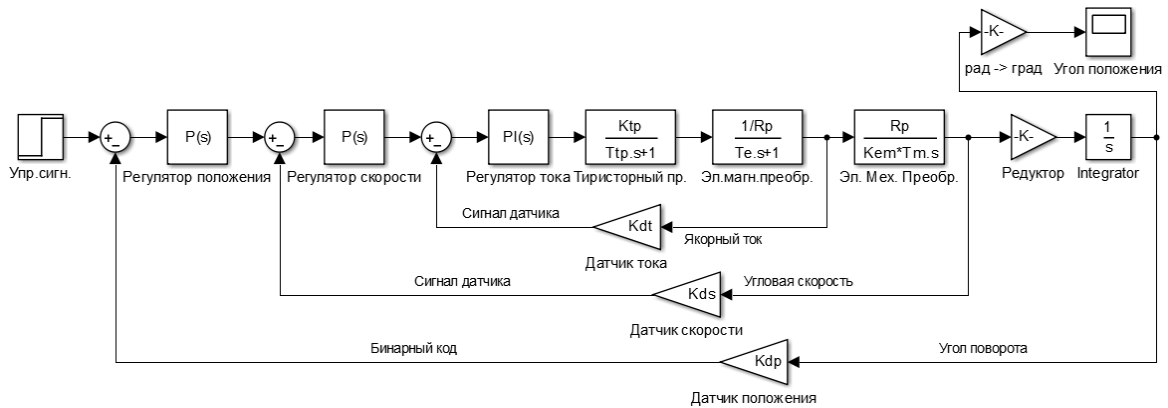


Рисунок 3.12 – Снимок экрана со схемой контура положения

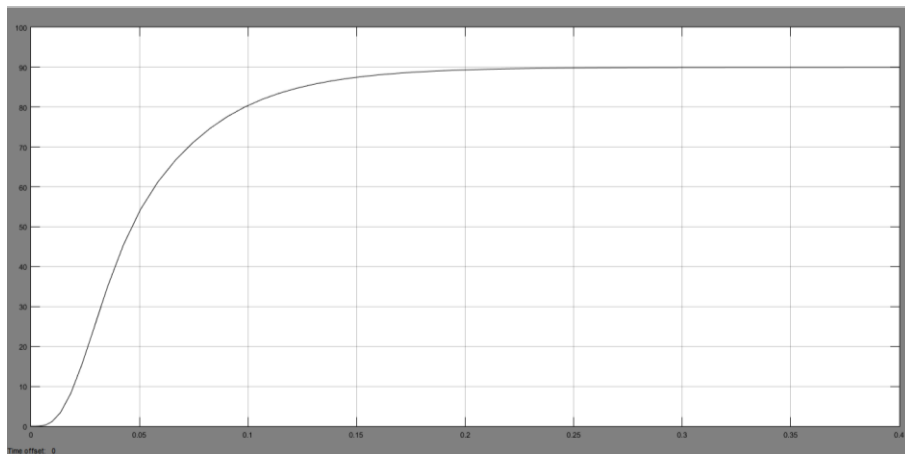


Рисунок 3.13 – Переходная характеристика контура положения

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

Как видно из графика, перерегулирование равно нулю, время переходного процесса 0,138 (с).

3.4 Уточнение модели

Для того чтобы скорректировать регуляторы и полностью убедиться в работоспособности системы, уточним модель электропривода.

Вернем в модель электродвигателя обратную связь по противо-ЭДС, для этого организуем обратную связь по скорости с коэффициентом обратной связи K_{em} .

Введем ограничитель тока: по паспортным данным двигателя 2ПН160М, приведенным в справочнике д.т.н. И.П. Копылова [32] ток якорной цепи не может превышать $2,25 I_{ном}$.

Введем ограничение на напряжение якорной обмотки. Это ограничение связано с номиналом фазного напряжения трехфазной сети, поэтому на выходе тиристорного преобразователя напряжение не может превышать $1,1 U_{ном}$.

Также, согласно расчетам механической нагрузки в пункте 2.3 настоящей пояснительной записки, составим структурную схему зависимости величины нагрузки от состояния системы, а именно от текущего угла поворота вала рабочей машины и ускорения его движения. Структурная схема приведена на рисунке 3.15.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

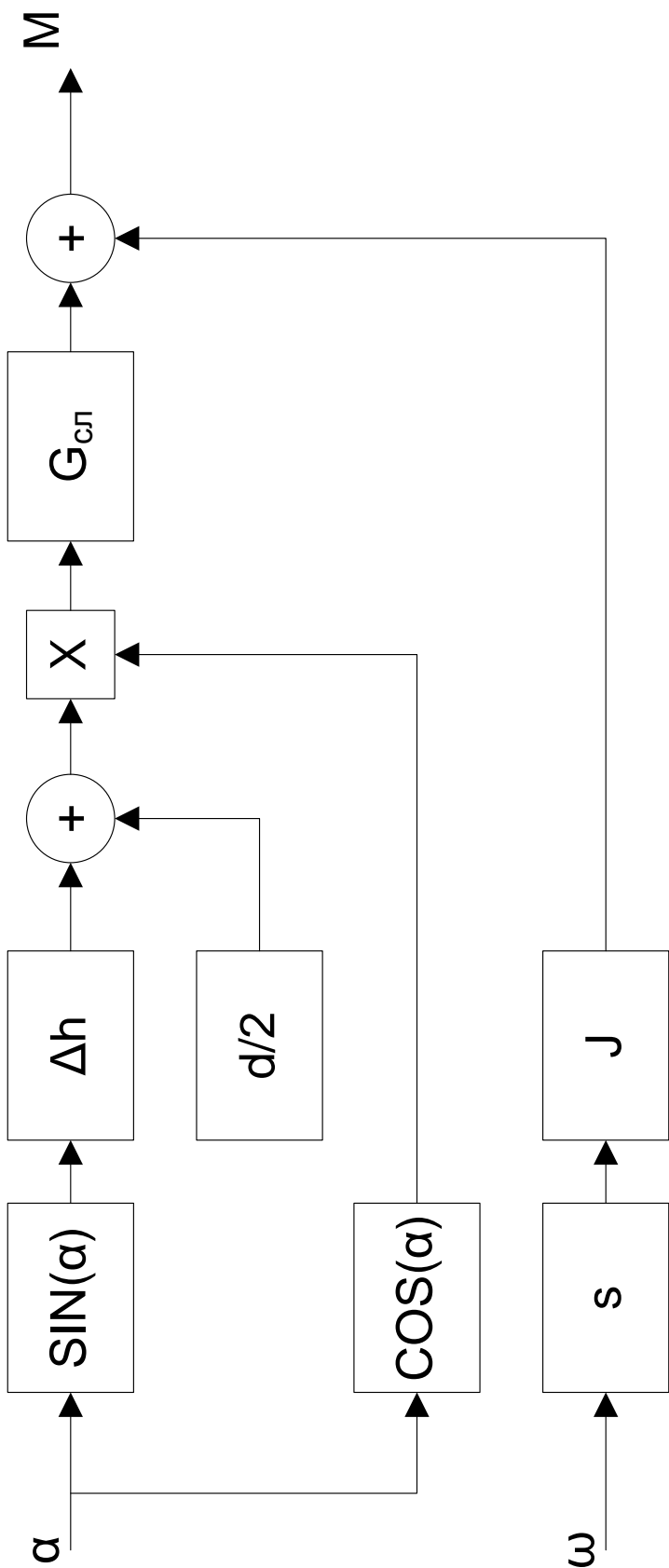


Рисунок 3.14 – Структурна схема зависимой нагрузки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

270304.2018.338.00 ПЗ

Построим модель подъемного механизма в виде структурной схемы в Matlab.

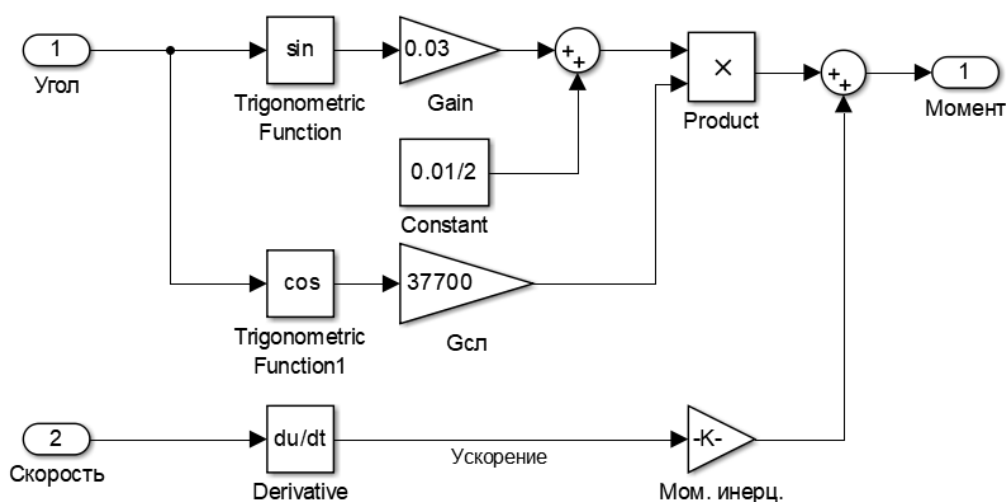


Рисунок 3.15 – Структурная схема зависимой нагрузки в Matlab

Полная структурная схема, описывающая электропривод подъемного механизма и зависимую нагрузку, приведена в документе 270304.2018.338.03.01 С1 (в приложении Б на схеме 3).

Промоделируем поведение системы при установлении угла в 90 градусов.

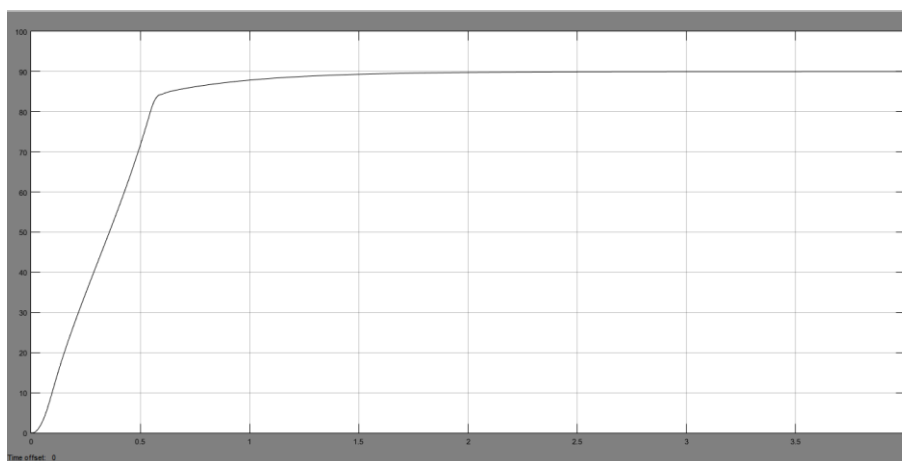


Рисунок 3.16 – Переходный процесс установления угла

Как мы видим из переходной характеристики, переходный процесс занимает меньше одной секунды, при этом перерегулирование отсутствует, что подтверждает выполнение нами требования задания.

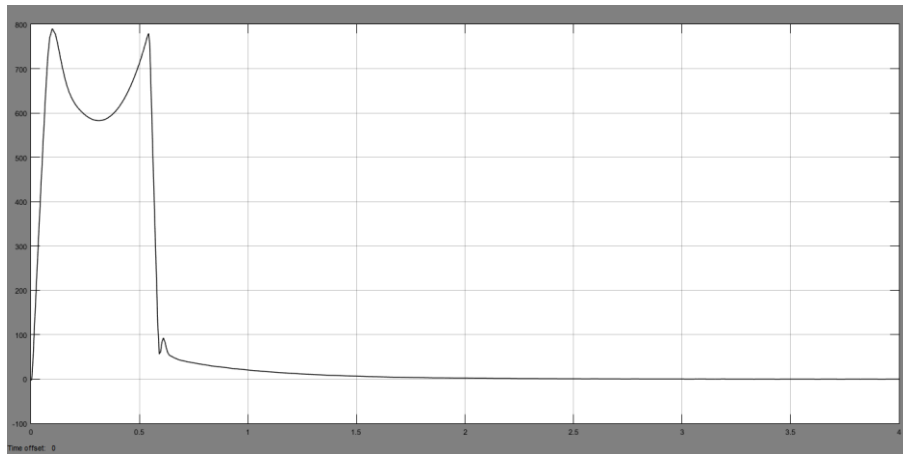


Рисунок 3.17 – Временная диаграмма скорости рабочего вала (об/мин)

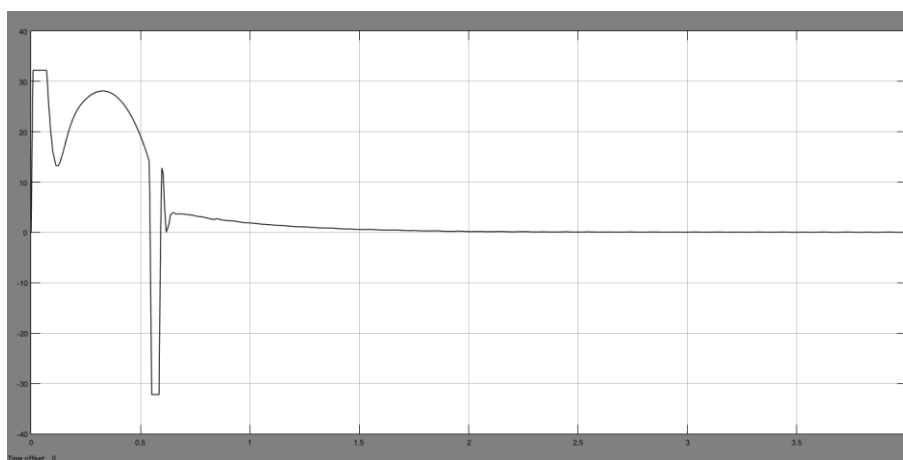


Рисунок 3.18 – Временная диаграмма тока якоря (А)

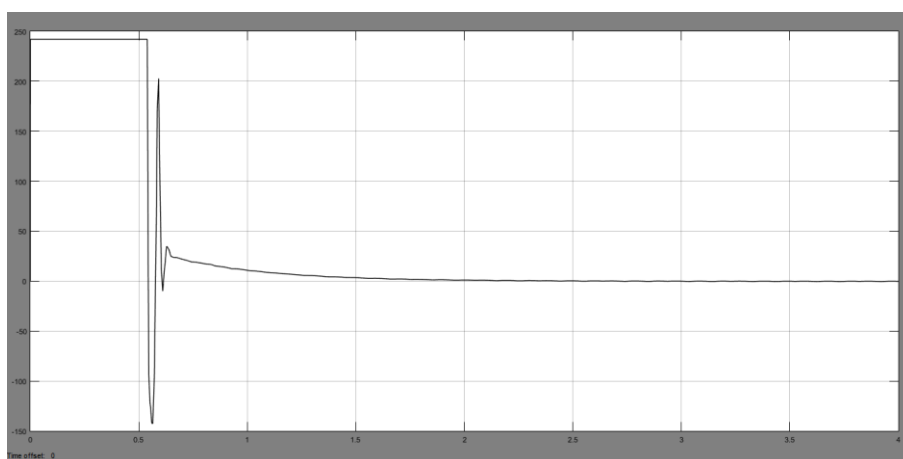


Рисунок 3.19 – Временная диаграмма напряжения якоря (В)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

270304.2018.338.00 ПЗ

Лист

57

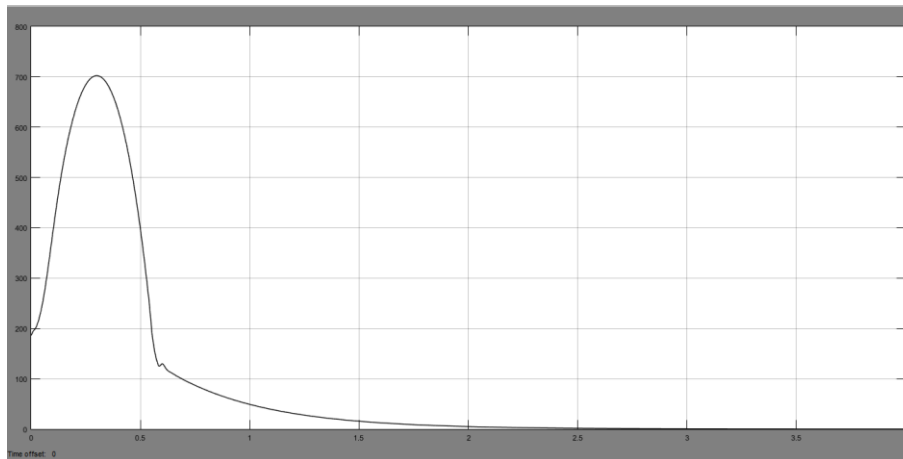


Рисунок 3.20 – Временная диаграмма нагрузочного момента (Н·м)

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

4 ИНТЕГРАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ В СИСТЕМУ

4.1 Модификация алгоритма системы подачи

Транспортерная линия системы подачи стали в печь управляется при помощи программно-аппаратного комплекса Siemens Simatic S7-300. Исходная система, рассмотрение и модификация которой являются целями данной работы, имеет свой алгоритм работы, который не учитывает возможность присутствия каких-либо процедур, будь то измерения веса, измерение длины или маркировка. Поэтому алгоритм требует доработки, и в соответствии с заданием, модификация будет рассмотрена в этой главе данной работы. Алгоритм работы транспортерной линии системы подачи реализуется на аппаратной базе контроллеров Siemens. Блок управления линией реализован в виде сенсорной графической панели оператора.

Исходный алгоритм работы системы подачи

Исходный алгоритм управления работой системы подачи, реализованный в контроллере, включает в себя выполнение двух действий: включение и выключение электроприводов всех пяти рольгангов. Содержит одно инициализирующее событие – нажатие кнопки «Старт» панели оператора, и одно событие, влекущее к завершению работы линии – нажатие кнопки «Стоп» панели оператора.

Схема исходного алгоритма приведена на рисунке 4.1.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

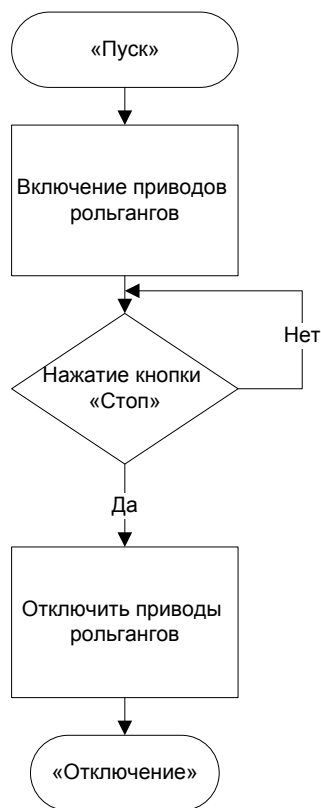


Рисунок 4.1 – Схема исходного алгоритма работы линии подачи

4.2 Создание алгоритма работы системы подачи

Исходный алгоритм работы системы подачи необходимо дополнить с учетом введения автоматического измерителя в систему подачи.

Перед запуском приводов должна осуществляться проверка положения подъемного механизма автоматического измерителя. Механизм проверки осуществляется при помощи установленного на валу кулачкового механизма датчика положения. Если механизм поднят и мешает движению, то на дисплей оператора выводится сообщение об ошибке, а на привод подъемника подается сигнал опустить подъемник, вернуть измерительные ролики в исходное положение.

Во время движения линии система следит за положением каждой заготовки на ней и, в момент, когда одна из заготовок достигает измерительного рольганга, отключая привода рольгангов, останавливает перемещение по линии так, чтобы заготовка расположилась на середине платформы.

После этого включается подъемный механизм. Система при помощи того же датчика положения следит за тем, чтобы механизм полностью поднял заготовку,

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

оторвал ее от контакта с рольгангом и перенес всю массу на тензодатчики, установленные в его основании.

После установления исходного для измерения положения происходит задержка в 6-10 секунд, точное время задается инженером-технологом. Задержка нужна для стабилизации заготовки и ее полного перехода в состояние покоя.

Затем регистратор фиксирует показания тензодатчиков и заносит их в энергонезависимую память контроллера. При этом данные также выводятся на дисплей панели оператора. В дальнейшем данные из энергонезависимой памяти могут быть переданы на операторскую станцию, на верхний уровень управления.

После фиксации измерения заготовка опускается на рольганговую платформу и продолжает движение.

Схема алгоритма программы контроллера приведена в документе 270304.2018.338.04.01 ОВ Алгоритм работы автоматического измерителя (в приложении Б к данной пояснительной записке на схеме 4).

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы по проектированию автоматического измерения в системе подачи стальных слитков в печь предварительного нагрева были решены задачи разработки информационной и силовой частей измерителя, а также задача по его интеграции в существующую систему.

Измерительная часть включает в себя таблеточный датчик веса 9035 ДСТ класса точности 0,10 с относительной погрешностью 0,1%. Был описан физический принцип работы тензодатчиков и структурная схема процесса обработки информации измерения.

Для построения силовой части автоматического, а именно подъемного механизма на эксцентриковых кулачках, были рассчитаны кинематические соотношения. Согласно этим соотношениям был определен критерий выбора электродвигателя и электропривода, а именно номинальная мощность, номинальный момент и скорость. Электродвигатель 2ПН160М со встроенным тахогенератором с номинальной мощностью 3000 (Вт) в составе электропривода ЭПТ-2 был определен как оптимальный для решения поставленной задачи. Были рассчитаны все параметры и характеристики электродвигателя и тиристорного преобразователя, необходимые для построения математической модели системы электропривода и синтеза регуляторов тока, скорости и угла положения. В ходе моделирования были учтены нелинейности и ограничения по току и напряжению. В итоге была получена система управления с длительностью переходного процесса 0,8 (с) и перерегулированием 0%, что полностью соответствует требованию задания.

Также была проведена работа по изменению алгоритма программы контроллера, управляющего работой транспортной линии системы подачи слитков так. Созданный алгоритм учитывает наличие и работу автоматического измерителя при управлении транспортной линией и управляет силовой и информационной частями автоматического измерителя.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башарин А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский – СПб.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для высших заведений / М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
3. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука 1975. – 768 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
5. Васильев Г. Г. Трубопроводный транспорт нефти / Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак, М.В. Лурье, В.М. Писаревский, А.Д. Прохоров, А.Е. Сощенко, А.М. Шаммазов. – М.: Недра, 2002 – 658 с.
6. Ваткин Я.Л. Бесшовные трубы / Я.Л. Ваткин, О.А. Пляцковский, Ю.И. Ващенко. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 182 с.
7. Венецкий С.И. В мире металлов / С.И. Венецкий. – М.: Metallurgiya, 1982 – 256 с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский М. – Л.: Энергия, 1977. – 432 с.
9. Вибрации в технике. Справочник: в 6 т./под ред. В. Н. Челомей, Э. Э. Лавендела.– М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины – 509 с.
10. Волков Н.И.Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров – М: Изд-во «Высшая школа», 1986. – 327 с.
11. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink: проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
12. ГК «РусТехника»: Трансформатор ТСЗИ-7.5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tszi.ru/catalog/tszi/tszi-7-5.html> – (дата обращения 24.05.2018)
13. ГОСТ 19.104-78. Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению. – М.: Стандартиформ, 2010. – 40 с.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

14. ГОСТ 19.404-79. Основные надписи. – М.: Стандартиформ, 2010. – 4 с
15. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 24 с.
16. ГОСТ 2.104-2006. Основные надписи. – М.: Стандартиформ, 2006. – 15 с.
17. ГОСТ 2.701-2008. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М.: Стандартиформ, 2009. – 15 с
18. ГОСТ 21.404-85. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Стандартиформ, 2009. – 9 с
19. ГОСТ 21.408-2013. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. – М.: Стандартиформ, 2014. – 41 с.
20. ГОСТ 24.302-80. Система технической документации на АСУ. Общие требования к выполнению схем. – М.: Стандартиформ, 2009 – 4 с.
21. ГОСТ 34.201-89. Виды, комплектность и обозначение документов при создании автоматизированных систем. – М.: Изд-во, 2002. – 11 с.
22. ГОСТ 7.9-95. Реферат и аннотация. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2009. – 8 с.
23. ГОСТ 8.417-2002. Единицы величин. – М.: Стандартиформ, 2009. – 24 с.
24. Григорьев В.В. Синтез систем автономного управления методом модального управления // В.В. Григорьев, Н.В. Журавлёва, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев. – СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
25. Гудвин Г.К., Гребне С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. – 212 с.
26. Гумеров А.Г. Трещестойкость бесшовных труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалеев. – М.: Недра, 2001. – 231 с.
27. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации Ч.1 / Современные технологии автоматизации (СТА), №4 – 2007. – С 86-90
28. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. пер. с англ. Б.И. Копылова – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
29. Дюрягин В.Р. Полупроводниковые преобразователи робототехнических устройств: Учебное пособие / В.Р. Дюрягин, О.Н. Казьмин, И.С. Пинчук и др. – Челябинск: ЧПИ. 1987. – 79с

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

30. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин - М.: Высшая школа, 1982. – 500 с.
31. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
32. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих / Я.Б. Зельдович. – М.: Физмалит. 1963.– 784 с.
33. Интетехникс: Пять доводов использования двигателей постоянного тока [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.intechnics.ru/article_24.htm – (дата обращения 23.05.2018)
34. Казаринов, Л.С. Автоматизированные информационно-управляющие системы: учебное пособие / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, Т.А. Барбасова. - Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 296 с.
35. Килов А.С. Производство заготовок. Трубы. / А.С. Килов, Р.Ш. Мансуров, – Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2007. – 216 с.
36. Ким, Д.П. Теория автоматического управления – М.: Физматлит, 2003. – 287 с.
37. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 520 с.
38. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.1 – 456 с.
39. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т.2 – 688 с.
40. Краснов М.Л. Вся высшая математика. / М.Л. Краснов, А.И. Киселев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – Т.1 – 336 с.
41. Краснов М.Л. Вся высшая математика. / М.Л. Краснов, А.И. Киселев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – Т.2 – 294 с.
42. Краснов М.Л. Вся высшая математика. / М.Л. Краснов, А.И. Киселев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – Т.3 – 482 с.
43. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2008. – 56 с

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

44. Лебедев А.М. Тиристорный следящий электропривод / А.М. Лебедев В.А. Найдис, Р.Т. Орлова, и др. – М.: Энергия, 1972. -182 с.
45. Макаров, И.М. Линейные автоматические системы / И.М. Макаров, Б.М. Менский – М.: Машиностроение 1982. – 505 с.
46. Мирошник И.В. Теория автоматического управления: линейные системы // И.В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2005. – 337 с.
47. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов / В.В. Москаленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с
48. Никитин В.А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля / В.А. Никитин, С.В. Бойко – Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2004. – 474 с.
49. Ньютона бином // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1969-1978.
50. Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов и др. – М.: РАСНХ, 2001. – 520 с.
51. Пат. 2079116 Российская Федерация, МПК G01G11/14 Устройство для взвешивания массивных слитков в технологической линии / Н.А. Фомин, В.И. Веревкин, В.К. Буторин, А.Е. Кошелев – заявл. 05.07.94; опубл. 10.05.97
52. Петраков, Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие для студентов вузов / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев – М.: Машиностроение 2008. – 336 с.
53. Поляков К.Ю Теория автоматического управления / К.Ю.Поляков. – СПб., 2008 – 80
54. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989. – 712 с.
55. Профос, П. Измерения в промышленности. Справочник. Кн. 2. / П. Профос. – М.: Изд-во Металлургия, 1990. – 492 с.
56. Пустовойтенко И. П. Применяемые технологии бурения скважин / И. П. Пустовойтенко, А.П. Сельващук. – М.: Недра, 1983 – 890 с.
57. Сабинин Ю.А., Электромашинные устройства автоматики: Учебник для вузов.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. - 408 с

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

58. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика / Д.В. Сивухин – М.: Изд-во Физматлит, 2005. – 560 с.
59. Солодовников, В.В. Основы автоматического регулирования теория / В.В. Солодовников, М.А. Айзерман и др. – М.: МАШГИЗ Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы 1954. – 1144 с
60. Тензоприбор: тензодатчик 9035 ДСТ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tenzo-pribor.ru/production/tenzo/tenzodatchiki/9035/> – (дата обращения 30.05.2018)
61. Техномаш: Электропривод постоянного тока ЭПТ-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.techno-mash.ru/implement/387400/387450/387458/475/> – (дата обращения 30.05.2018)
62. Тюлёвский Ю.Н. Инновации в электронно-дуговых печах / Ю.Н. Тюлёвский, И.Ю. Зинуров. – Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 282 с.
63. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов. Учебное пособие / Ю.С. Усынин – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 359 с.
64. Фролов А.В. Конспект лекций по курсу «Теория электропривода» / А.В. Фролов – Бишкек: Изд-во КГТУ, 2009. – 137 с.
65. Фролов К.В. Машиностроение. Энциклопедия. Электропривод / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 2012. – Т.IV-2, Кн. 1 – 520 с.
66. Челябинский завод Редуктор: Редуктор 1Ц2У 160 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://74red.ru/catalog?item = 7> – (дата обращения 25.05.2018)
67. Черных И.В. Моделирование электронных устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 290 с.
68. Чиликин М. Г., Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А.С. Сандлер – М: Энергия, 1979. – 616 с.
69. ЧТПЗ: О компании [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://chelpipe.ru/about/> – (дата обращения 23.05.2018)
70. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: Бином Ньютона. в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб., 1890 – 1907.

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет параметров привода

Расчеты параметров электропривода выполнены средствами MathCAD. Текст программы с расчетами приведен ниже.

Расчет параметров электродвигателя по каталожным данным.

Каталожные данные электродвигателя 2ПН160М Г УХЛ4

Тип двигателя: 2ПН160М Г УХЛ4

Мощность, Вт: $P_{\text{ном}} := 3000$

Скорость вращения, об/мин: $n_{\text{ном}} := 750$

Напряжение, В: $U_{\text{ном}} := 220$

Момент инерции, кг*м²: $J_{\text{двиг}} := 0.048$

Масса двигателя, кг: $G_{\text{двиг}} := 39$

КПД двигателя: $\text{КПД}_{\text{двиг}} := 0.765$

Сопротивление обмотки якоря, Ом: $R_{\text{якоря}} := 0.732$

Индуктивность обмотки якоря, Гн: $L_{\text{якоря}} := 0.0202$

Добавочные полюса, Ом: $R_{\text{доб}} := 0.485$

Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В: $U_{\text{во}} := 220$

Сопротивление обмоток возбуждения, Ом: $R_{\text{во}} := 128$

Номинальный ток якоря, А:
$$I_{\text{ном}} := \frac{\frac{P_{\text{ном}}}{\text{КПД}_{\text{двиг}}} - \frac{U_{\text{во}}^2}{R_{\text{во}}}}{U_{\text{ном}}} = 16.107$$

Номинальная скорость нагрузки, об/мин: $n_c := 30$

Номинальная нагрузка, Н*м: $M_c := 707.83$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

Расчет номинального момента двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} := \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}} \cdot \text{КПД}_{\text{ДВИГ}} = 29.221 \quad (\text{Н} \cdot \text{м})$$

Расчет передаточного числа редуктора:

$$\frac{M_c}{M_{\text{НОМ}}} = 24.223 \quad \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_c} = 25$$

Момент инерции нагрузки $J_{c1} := 3.393 \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$

Приведенный момент инерции нагрузки к валу машины $J_{c2} := \frac{J_{c1}}{25^2} = 5.429 \times 10^{-3} \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$

Расчет параметров:

Коэффициент схемы трансформатора по напряжению:

$$k_H := 0.755$$

Теоретическое значение фазной ЭДС:

$$E_{2\phi} := k_H \cdot U_{\text{НОМ}} = 166.1 \quad (\text{В})$$

Фазное напряжение вторичной обмотки с учетом необходимого запаса

$k_U := 1.1$ - коэффициент запаса снижения напряжения сети

$k_{\alpha} := 1.1$ - коэффициент запаса неполного открытия тиристоров

$k_R := 1.05$ - коэффициент запаса внутреннего сопротивления тиристоров

$$U_{2\phi} := k_U \cdot k_{\alpha} \cdot k_R \cdot E_{2\phi} = 211.03 \quad (\text{В})$$

Ток вторичной обмотки

$k_{T2} := 0.815$ - коэффициент схемы по току вторичной обмотки

$k_I := 1.1$ - коэффициент запаса по форме тока

$$I_2 := k_I \cdot k_{T2} \cdot I_{\text{НОМ}} = 14.44 \quad (\text{А})$$

Коэффициент трансформации

$U_1 := 380$ - сетевое линейное напряжение, В

$f := 50$ - сетевая частота, Гц

$$k_{\text{тр}} := \frac{380}{\sqrt{3} \cdot U_{2\phi}} = 1.04$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Коэффициент схемы по току первичной обмотки:

$$k_{T1} := 0.815$$

Ток первичной обмотки

$$I_1 := k_I \cdot k_{T1} \cdot \frac{I_{\text{НОМ}}}{k_{\text{ТР}}} = 13.889 \quad (\text{А})$$

Коэффициент схемы по мощности

$$k_M := 1.065$$

Мощность трансформатора

$$k_U \cdot k_{\alpha} \cdot k_I \cdot k_M = 1.418$$

$$P_T := k_U \cdot k_{\alpha} \cdot k_I \cdot k_M \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 5.023 \times 10^3 \quad (\text{Вт})$$

Таким образом, для обеспечения работы тиристорного преобразователя требуется трехфазный трансформатор с типовой мощностью

не менее:

$$P_T = 5.023 \times 10^3 \quad (\text{Вт})$$

Расчет индуктивности уравнительных дросселей (реакторов) и параметров цепи якоря

Примем ток реактора равным:

$$I_{\text{УР}} := 0.3 \cdot I_{\text{НОМ}} = 4.832 \quad (\text{А})$$

Расчетный коэффициент для принятой схемы выпрямления:

$$k_Y := 0.18$$

Индуктивность двух реакторов:

$$L_Y := \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2\Phi}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{\text{УР}}} \cdot k_Y = 0.035 \quad (\text{Гн})$$

Индуктивность одного реактора:

$$L_{1Y} := 0.7 \cdot L_Y = 0.025 \quad (\text{Гн})$$

Сопrotивление реактора:

$$R_Y := 0.4 \cdot (R_{\text{якоря}} + R_{\text{доб}}) = 0.487 \quad (\text{Ом})$$

Заданная активная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_{\alpha} := 0.03 \quad (\text{В})$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке:

$$R_T := \frac{U_{\alpha} \cdot U_{2\Phi}}{I_2} = 0.438 \quad (\text{Ом})$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Заданная индуктивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$U_L := 0.095 \quad (\text{В})$$

Индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке:

$$X_T := \frac{U_L \cdot U_{2\phi}}{I_2} = 1.388 \quad (\text{Ом})$$

Сопротивление, вносимое за счет анодных токов:

$$R_{\Pi} := \frac{3 \cdot X_T}{2 \cdot \pi} = 0.663 \quad (\text{Ом})$$

Сопротивление щеточного контакта:

$$R_{\text{Щ}} := \frac{2}{I_{\text{НОМ}}} = 0.124 \quad (\text{Ом})$$

Полное активное сопротивление цепи якоря:

$$R_{\text{полн}} := 1.2 \cdot (R_{\text{якоря}} + R_{\text{доб}}) + R_T + R_{\Pi} + R_{\text{Щ}} + R_Y = 3.173 \quad (\text{Ом})$$

Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке:

$$L_T := \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = 4.419 \times 10^{-3} \quad (\text{Гн})$$

Полная индуктивность цепи якоря:

$$L_{\text{полн}} := L_{\text{якоря}} + L_T + L_{1Y} = 0.049 \quad (\text{Гн})$$

$$\omega_{\text{НОМ}} := \frac{n_{\text{НОМ}} \cdot \pi}{30} = 78.54$$

Электромагнитная постоянная времени цепи якоря:

$$T_{\text{э}} := \frac{L_{\text{полн}}}{R_{\text{полн}}} = 0.016 \quad (\text{с})$$

Конструктивные коэффициенты двигателя по паспортным данным:

$$K_e := \frac{U_{\text{НОМ}} - 1.2 \cdot (R_{\text{якоря}} + R_{\text{доб}}) \cdot I_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = 2.502 \quad \left(\text{В} \cdot \frac{\text{с}}{\text{рад}} \right)$$

$$K_m := K_e = 2.502$$

Электрохимическая постоянная времени двигателя:

$$T_M := \frac{(J_{\text{двиг}} + J_{\text{с2}}) \cdot R_{\text{полн}}}{K_e \cdot K_m} = 0.027 \quad (\text{с})$$

					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

$m := 6$ число пульсаций

$f := 50$ (Гц) сетевая частота

$$T_{\text{шп}} := \frac{1}{m \cdot f} = 3.333 \times 10^{-3} \quad (\text{с})$$

$$T_{\text{шп}} := 3.333 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{\text{шп}} := \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{РТ}}}$$

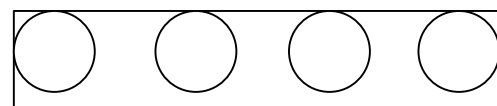
$U_{\text{ном}} = 220$ (В) номинальное напряжение питания двигателя

$U_{\text{РТ}} = 10$ (В) максимальное напряжение на выходе регулятора тока

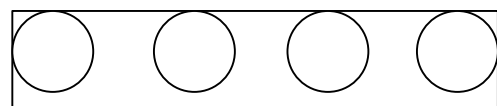
$$K_{\text{шп}} := \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{РТ}}} = 22$$

$$W_{\text{ТП}}(s) := \frac{K_{\text{шп}}}{1 + T_{\text{шп}} \cdot s} \rightarrow \frac{22}{0.003333 \cdot s + 1}$$

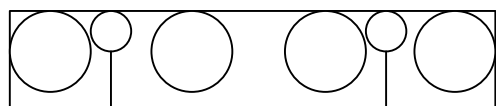
					270304.2018.338.00 ПЗ	Лист
						73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



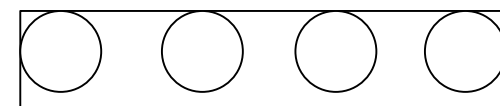
Входной рольганг 1



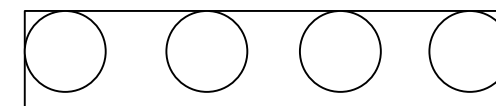
Промежуточный рольганг 2



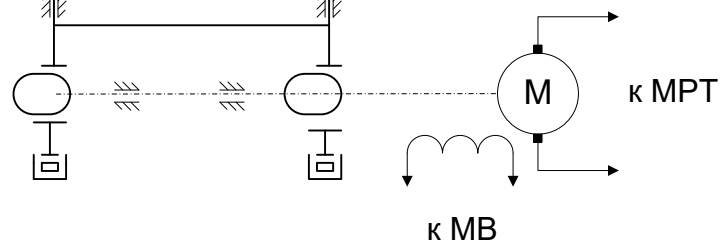
Измерительный рольганг 3



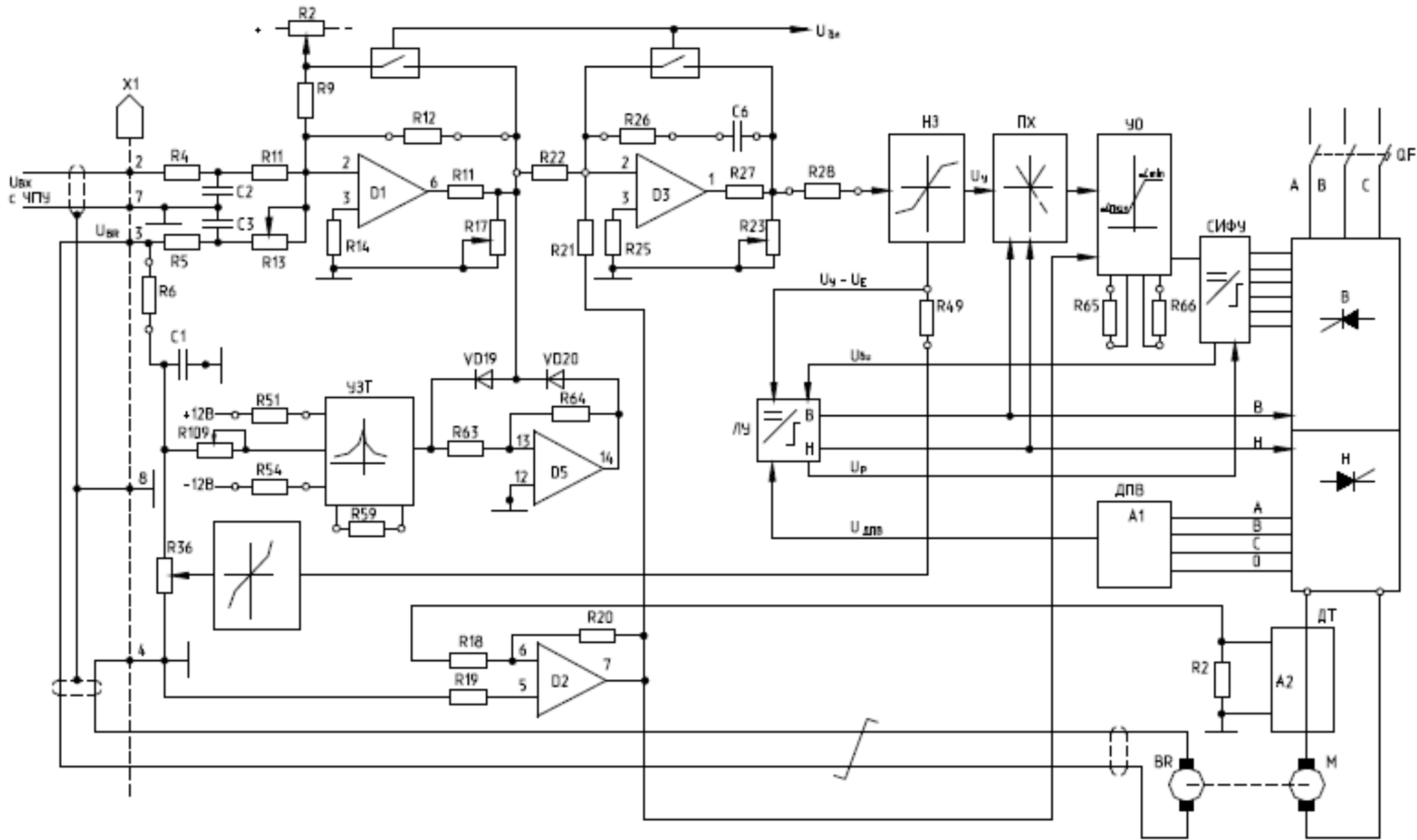
Промежуточный рольганг 4



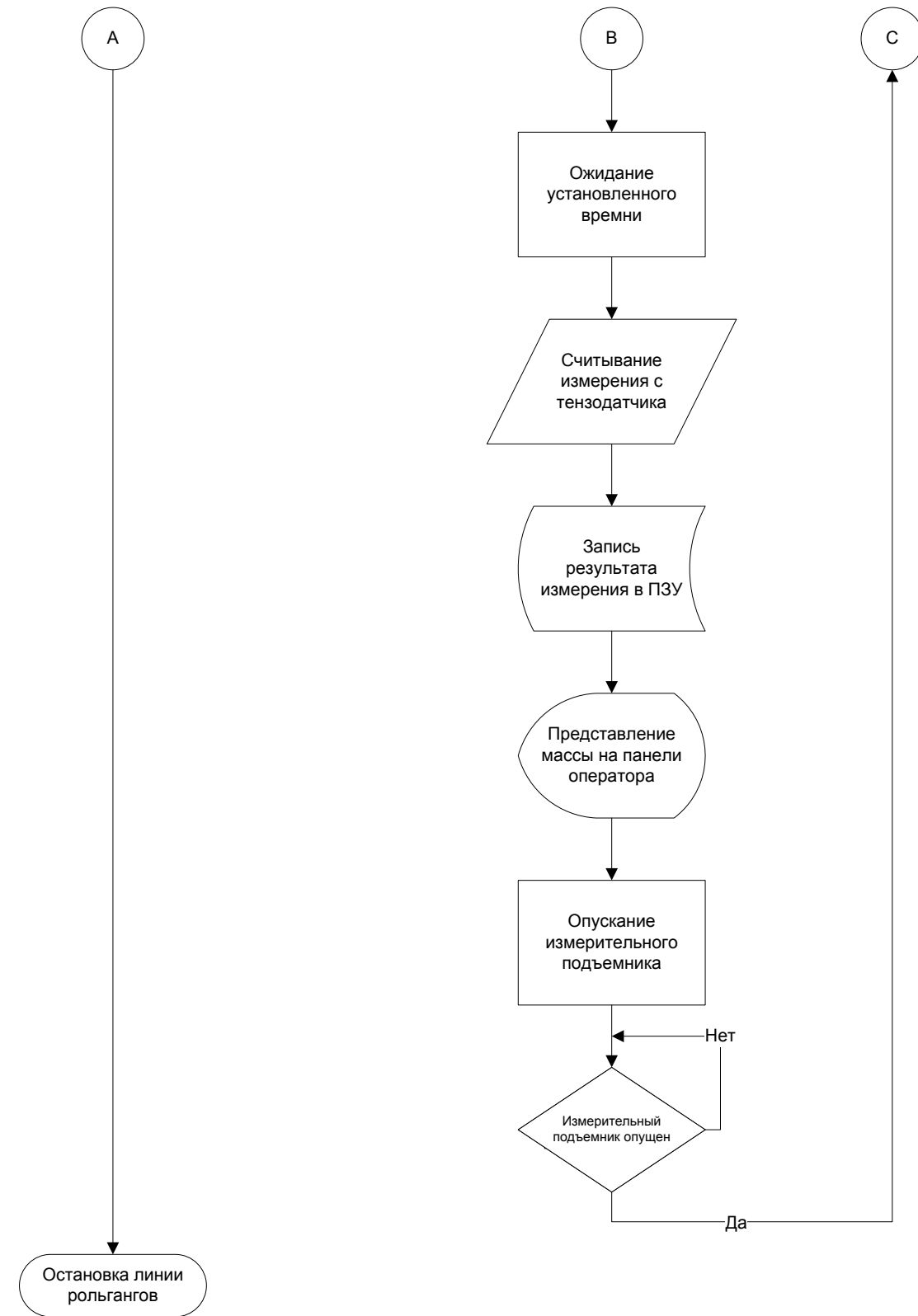
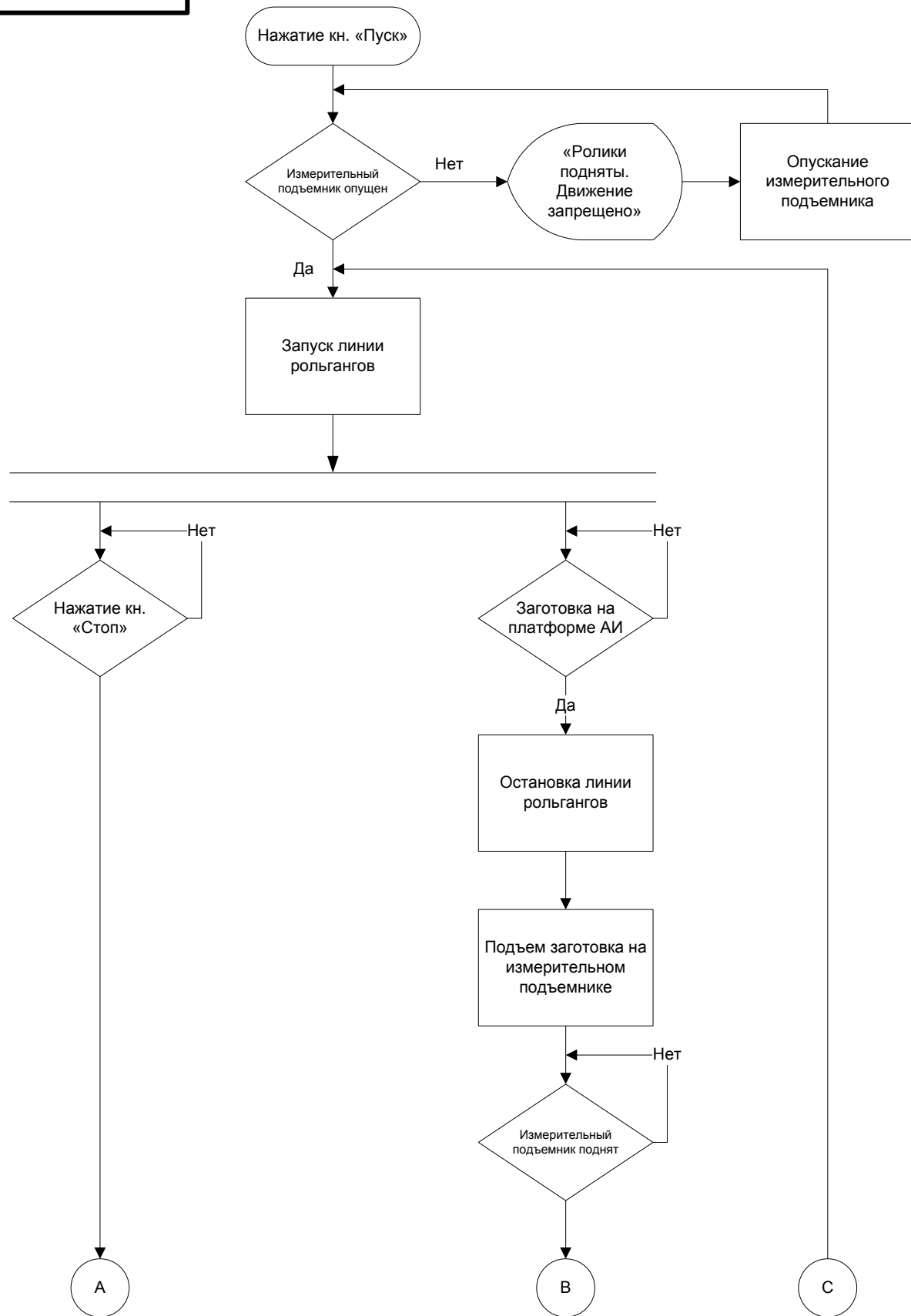
Выходной рольганг 5



					270304.2018.338.01.01 С7			
					Система подачи слитков в печь предварительного нагрева. Схема расположения	Лит.	Масса	Масштаб
						Д		1:1
					Листов 1			
					ЮурГУ Кафедра Автоматики			
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.		Плющай Н.В.						
Пров.		Латыпов Э.У.						
Н.контр.		Барбасова Т.А.						
Утв.		Голощанов С.С.						



					270304.2018.338.02.01 C2		
					Электропривод подъемного механизма автоматического измерителя веса. Схема функциональная		
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Плющай Н.В.			Д		1:1
Пров.		Латыпов Э.У.					
Н.контр.		Барбасова Т.А.			Листов 1		
Утв.		Голощанов С.С.			ЮурГУ Кафедра Автоматики		



					270304.2018.338.04.01 Д23		
					Алгоритм работы автоматического измерителя веса		
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата	Д		1:1
Пров.					Листов 1		
Н.контр.					ЮУрГУ Кафедра Автоматики		
Утв.							