

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт Механико-технологический факультет
Кафедра «Мехатроника и автоматизация»
Направление «Мехатроника и робототехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2018 г.

Модернизация кантующих роликов установки ультразвукового сканирования

ТПЦ-1 ПАО «ЧТПЗ»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ _____ ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Руководитель работы
к.т.н. доцент
С.Н. Басков

Нормоконтролер
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2018 г.

Автор работы
студент группы
Владислав Владимирович Орехов
2018 г.

АННОТАЦИЯ

Орехов В.В. Модернизация кантующих роликов установки ультразвукового сканирования ТПЦ-1 ПАО «ЧТПЗ». – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2018, 74 с. 27 ил., библиогр. список – 10 наим., 1 прил.

В выпускной квалификационной работе «Модернизация кантующих роликов установки ультразвукового сканирования ТПЦ-1 ПАО «ЧТПЗ» с учетом необходимости модернизации производится замена релейно-контакторной системы управления приводом установки угла поворота плит на преобразователь частоты. Для управления приводами разработан человеко-машинный интерфейс на базе Simatic PC station и программируемого логического контроллера S7-300. Произведён анализ применения системы регулирования на базе регулирования положения плит и скорости вращения двигателя с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

На основе анализа технологического процесса сформулированы требования к электроприводу и осуществлен расчет нагрузочной диаграммы и тахограммы работы привода. Затем был проверен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором А90L4 по условию нагрева и перегрузки, выбран преобразователь частоты Unidrive M700.

Система автоматического регулирования положения выполнена двухканальной с регулированием активной и реактивной составляющих тока статора и построена по принципу подчиненного регулирования координат.

Результатом анализа является новая система управления углом поворота плит кантующих роликов, которая позволяет точно устанавливать шаг сканирования трубы.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ.....	8
1.1 Технологический процесс ТПЦ-1 «ПАО» ЧТПЗ	8
1.2 Описание установки для осуществления ультразвукового контроля сплошности металла труб.....	11
1.3 Принцип работы установки УЗК1-2	12
1.4 Описание электропривода кантующих роликов и разворота плит	12
1.5 Обзор литературы и постановка задачи	13
1.5.1 Повышение качества контроля труб путем разработки установки автоматизированного ультразвукового контроля.....	13
1.5.2 «Выбор оптимального шага сканирования по спирали при автоматизированном ультразвуковом контроле труб на ОАО «Тагмет».....	18
1.5.3 Патент RU 2397491.....	18
1.5.4 Цель модернизации объекта.....	19
1.6 Требования к электроприводу разворота кантующих роликов.....	20
1.7 Выбор системы электропривода разворота кантующих роликов	21
1.8 Расчёт и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы работы	24
электропривода разворота кантующих роликов	24
1.8.1 Расчет статического момента сопротивления, предварительный выбор двигателя	24
1.8.2 Расчет момента инерции, окончательная проверка двигателя	29
1.9 Выбор преобразователя частоты для привода разворота кантующих роликов	34
1.10 Выбор датчиков	36
1.10.1 Выбор абсолютного энкодера для установки на плиту.....	36
1.10.2 Выбор инкрементального энкодера для установки на вал двигателя привода разворота кантующих роликов	38
1.10.3 Выбор оптических датчиков для проверки правильности установки	

шага сканирования	40
2 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	42
2.1 Моделирование работы привода разворота кантующих роликов в программе MATLAB.....	42
2.1.1 Структурная схема системы управления	42
2.1.2 Расчёт параметров объекта регулирования	44
2.1.3 Синтез регуляторов проекций тока статора на оси x-y	48
2.1.4 Синтез контура регулирования потокосцепления	50
2.1.5 Синтез контура регулирования скорости.....	51
2.1.6 Синтез контура регулирования положения	53
2.1.7 Анализ динамических процессов.....	56
2.2 Реализация HMI интерфейса для управления установкой.....	56
2.2.1 Выбор оборудования	56
2.2.2 Таблица переменных	57
2.2.3 Программа модели.....	58
2.2.4 Описание компонентов на основном экране HMI	62
2.2.5 Список выводимых предупреждений на экран HMI	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ А Схемы и диаграммы	68

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация - страна с сетью трубопроводов различного назначения огромной протяженности. Важность трубопроводов для экономики государства нельзя недооценивать. Этим и обусловлено огромное внимание, уделяемое разработкам технологий по диагностике и поддержанию трубопроводов в работоспособном состоянии.

В настоящее время в цехах по подготовке к ремонту и эксплуатации труб различного назначения осуществляются визуальный контроль трубы и гидравлические испытания. Однако, как показывает практика, данные методы контроля не позволяют выявлять все виды дефектов, возникающих в теле трубы. В связи с этим, для повышения качества контроля труб нефтяного назначения на ПАО «ЧТПЗ» используется установка ультразвукового контроля, на которой осуществляется проведение неразрушающего контроля труб методом, обеспечивающим выявление наиболее опасных видов дефектов труб.

Выбор данного направления обусловлен тем, что нефтяная промышленность России является базисом для развития современной экономики, а трубопроводы, состоящие из труб нефтяного назначения, – неотъемлемой частью отрасли.

В настоящее время электропривода используемой установки ультразвукового контроля работают в ручном режиме, с помощью оператора. Целью данной работы является проработка вопроса модернизации приводов, в результате которой можно повысить уровень автоматизации процесса сканирования трубы. Модернизация представляет собой выбор и проверку электродвигателя установки угла поворота плит кантующих роликов, установку частотного преобразователя, программируемого логического контроллера, человеко-машинного интерфейса. В совокупности эти решения позволят реализовать, в первую очередь, автоматическую установку шага сканирования трубы, проверку его правильности и корректировку, а также различные дополнительные функции управления установкой.

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1 Технологический процесс ТПЦ-1 «ПАО» ЧТПЗ

ЧТПЗ (Челябинский трубопрокатный завод – промышленная группа металлургического комплекса России, является одной из крупнейших отечественных компаний-производителей трубной продукции с общей долей рынка около 17%. Выручка компании превышает \$2 млрд, на заводах компании ЧТПЗ работает около 25 000 человек. Входит в десятку крупнейших трубных компаний мира. Группа ЧТПЗ объединяет предприятия и компании черной металлургии: Челябинский трубопрокатный завод, Первоуральский новотрубный завод, складской комплекс, осуществляющий реализацию трубной продукции Группы в регионах, компанию по заготовке и переработке металлолома "МЕТА"; предприятия по производству магистрального оборудования "СОТ", "ЭТЕРНО", MSA (Чехия); нефтесервисный бизнес представлен компанией "Римера".

Основной целью Группы ЧТПЗ является комплексное удовлетворение потребностей российских и мировых компаний топливно-энергетического комплекса за счет разработки и поставки интегрированных решений для магистрального и внутрипромышленного трубопроводного транспорта.

Обладая достаточным количеством мощностей по производству сварных и бесшовных труб широкого сортамента, развитой системой складов, ЧТПЗ позиционирует себя как эффективного универсального игрока на трубном рынке России и стран СНГ, специализирующегося на изготовлении трубной продукции для всех основных секторов экономики.

Сегодня основной продукцией компании являются:

- трубы электросварные диаметром 12 – 76 мм,
- трубы сварные большого диаметра 508 – 1422 мм (в том числе с покрытием: наружным и внутренним антикоррозионным, внутренним гладкостным),
- трубы бесшовные горячедеформированные диаметром 32 – 550 мм, в том числе нержавеющие диаметром 89 – 159 мм,

- трубы бесшовные холоднодеформированные диаметром 0,3 – 426 мм, в том числе нержавеющие диаметром 0,3 – 426 мм,
- насосно-компрессорные трубы диаметром 60 – 114 мм, обсадные трубы диаметром 114 – 178 мм и 245 – 426 мм, муфты к ним,
- профильные трубы,
- баллоны для сжатых газов,
- керамические флюсы для сварки и наплавки.

Заготовки для производства бесшовной трубы поставляются на ЧТПЗ со многих металлургических предприятий, в частности с АО «Уральская сталь», АО «Первоуральский новотрубный завод» (ПНТЗ). По прибытии на ЧТПЗ заготовки отправляются на склад непрерывно литой заготовки (НЛЗ). НЛЗ должны удовлетворять требованиям соответствующей нормативной документации (НД).

Литые заготовки и слитки поступают на участок отделки труб, слитков и заготовок спецназначения (УОТСиЗСН), где контролер отдела по работе с потребителями и поставщиками цеха технического контроля (ОРПП ЦТК) производит приемку металла на соответствие требованиям НД и данным сертификата качества поставщика заготовки. Заготовки сортируются по размеру (малая и большая), диаметру. Каждой заготовке присваивается свой уникальный номер, по которому можно определить те или иные параметры для дальнейшей её обработки. Литые заготовки и слитки по оперативному заданию производственно-диспетчерской группы (ПДГ) подвергаются механической обработке: обдирке, сверлению, и подаются на пилу LINSINGER 1900.

В процессе работы пилы её резцы деформируются. Для ремонта предусмотрено специальное помещение, в котором установлено современное оборудование для восстановления резцов.

Пилоотрезной станок совершает несколько операций: подачу, вращение и транспортировку. В соответствии с заданием на обработку заготовки лазеры измеряют необходимую длину для отреза, затем измерительными роликами заготовка подается к самой пиле, где заготовка прижимается зажимами и осуществляется процесс отрезания. Все процессы управляются контроллерами фирмы Siemens, от

которых зависит технологический процесс. На пилотрезном станке установлено три частотных преобразователя: на подачу, вращение и транспортировку.

Далее заготовки распределяют по цехам. Для ТПЦ – 1 заготовки погружают на тележки с помощью металлургических мостовых кранов и отправляют на временный склад.

На временном складе присутствует оператор, который, по заданию, подает заготовки со склада на тележку. Тележка управляется с пульта, присутствует возможность движения как автоматическом режиме, так и в ручном. Управление тележкой осуществляет ПЛК Siemens S7-1500 и преобразователь частоты Unidrive 45, также имеется дублирующая система.

С тележки НЛЗ перегружается на рольганг, который доставляет её ко входу печи. После того, как заготовка подъехала на участок подачи заготовки в печь, другой оператор с помощью специальной установки загружает заготовку в первую или вторую печь.

После нагревания, в заготовках делают небольшие отверстия и отправляют на прошивной стан. В результате обработки на прошивном стане заготовка вытягивается и в ней образуется большое отверстие. Отверстия необходимы для облегчения пробивания в трубе внутренней полости.

После трубы делятся, и в соответствии с техническим заданием их делят на участки:

- «холодильник» – специальный участок, где они остывают;
- калибровочный стан, который предназначен для устранения овальности и получения труб заданного диаметра;
- газороликовая печь, предназначенная для термообработки (подогрева и нормализации) деталей перед калибровкой, с последующим отправлением на калибровочный стан.

Далее, по заданным требованиям трубы отправляются на трубоотрезной стан. Его цель – получение труб необходимой длины.

На этом основной технологический процесс завершается и начинается последующая формировка труб по тем или иным НД:

- нарезается резьба;
- снимаются фаски;
- производится неразрушающий контроль на установке ультразвукового контроля;
- труба проходит правильное отделение, где её обрабатывают в соответствии с заданиями;
- испытания на прочность;
- сортировка.

1.2 Описание установки для осуществления ультразвукового контроля сплошности металла труб

Установка для осуществления неразрушающего контроля труб с помощью ультразвука (УЗК1-2) установлена в трубопрокатном цеху №1 ПАО «ЧТПЗ». УЗК (ультразвуковой контроль) предназначен для выявления дефектов металла, выходящих на внутреннюю и наружную поверхности горячекатаных труб со следующими характеристиками:

1. Диаметр контролируемых труб, мм – 219-550мм;
2. Толщина стенки, мм 7-70;
3. Максимальная масса, кг – 2100.
4. Длина, м – 3,5 – 12;
5. Максимальный шаг сканирования, мм/об – 40 при использовании четырех пар ПЭП;
6. Окружная скорость, мм/с – 0-600;
7. Частота вращения роликов кантующего рольганга, об/мин – 28,6;
8. Тип электронных блоков – БЭ-1;
9. Неконтролируемый конец трубы, мм – не более 100;
10. Частота УЗК – 2,5 МГц;
11. Тип сканирования – перемещение трубы относительно ПЭП.

1.3 Принцип работы установки УЗК1-2

После того, как специалисту по неразрушающему контролю поступила заявка на проверку трубы, со стеллажа доставляется труба на проверку. С помощью рольгангов она перемещается в сторону акустического контролирующего модуля. При достижении трубой положения над кантующими роликами пневмопривод опускает рольганг, и труба помещается на кантующие ролики (кантователи), которые приводятся во вращение электродвигателями. Для того, чтобы труба продольно перемещалась, необходимо повернуть плиты кантователей на определенный угол. Поворот плит осуществляется приводом поворота через общую тягу. Во время движения труба сканируется с помощью ультразвукового дефектоскопа (используется до четырех пар). Для достижения акустического контакта между металлом и датчиком осуществляется подача воды. Сканирование происходит по спирали, с определенным шагом. Шаг сканирования (мм/об) выставляется вручную и неточно. Для этого оператор, используя мел, рисует на трубе спираль и затем измеряет расстояние между двумя соседними витками, что и определяет шаг сканирования. В зависимости от размеров трубы необходимо выставить нужный шаг сканирования и если шаг выставлен неточно, то необходимо повторение операции, что замедляет производство. Сканирование осуществляет акустический датчик, информация с которого выводится на специальный стенд, оборудованный индикаторами и осциллографами. При обнаружении дефекта работа кантователей останавливается и на осциллографе можно увидеть дефект в металле. Оператор помечает дефектное место в трубе и далее труба отправляется на устранение дефекта. Если же дефектов не обнаружено, труба успешно проходит процедуру сканирования и отправляется на следующий стеллаж.

1.4 Описание электропривода кантующих роликов и разворота плит

Вращение 12 кантующих роликов осуществляется при помощи асинхронных электродвигателей суммарной мощностью 75 кВт. Каждый двигатель работает в

паре с редуктором, передаточное число которого 11,22. Управление вращением двигателей осуществляется с помощью преобразователя частоты Unidrive SP5402. Управление установкой осуществляется с кнопочного пульта.

Привод разворота состоит из: электродвигателя, редуктора, передачи винт-гайка и тяги с рычагами. Поворот плит, на которых расположены кантующие ролики осуществляется электродвигателем через редуктор, который перемещает тягу с помощью передачи винт-гайка. Тяга, перемещаясь продольно, поворачивает плиты на определенный угол с помощью рычагов.

На рисунке 1 показан шаг сканирования трубы (P), угол поворота плиты (φ), пьезоэлектрический преобразователь и колеса кантователя.

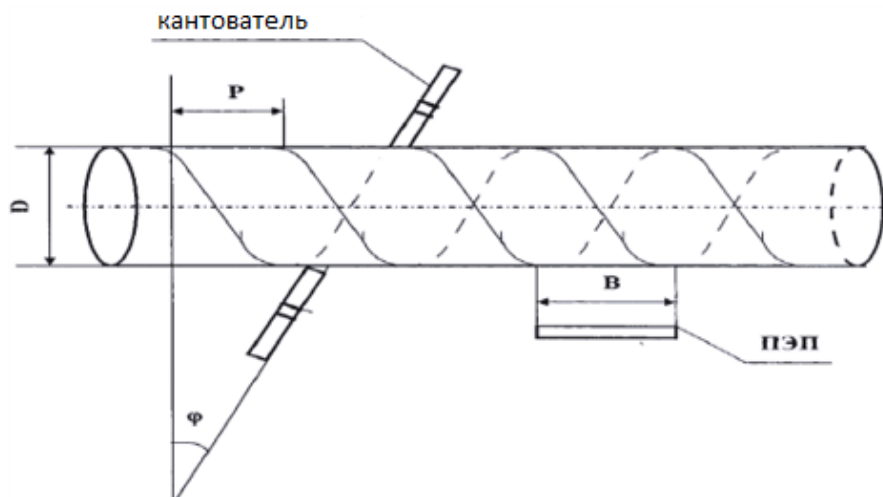


Рисунок 1 – Сканирование поверхности трубы

1.5 Обзор литературы и постановка задачи

1.5.1 Повышение качества контроля труб путем разработки установки автоматизированного ультразвукового контроля

В статье «Повышение качества контроля труб путем разработки установки автоматизированного ультразвукового контроля» (М.Х. Седлер, Е.А. Карабасов) [1] рассматриваются вопросы повышения качества контроля труб нефтяного назначе-

ния. Для этого проводится анализ существующих методов неразрушающего контроля, разрабатывается методика проведения ультразвукового контроля эхо-импульсным методом путем ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля водо-иммерсионным способом. Разрабатывается конструкция акустического блока и механизма позиционирования, обеспечивающего стабильный акустический контакт с трубой. Разрабатывается установка, обеспечивающая проведение автоматизированного сплошного контроля труб с требуемой производительностью.

Неразрушающий контроль (поиск дефектов в материале изделия) труб производится ультразвуковым методом, то есть путем излучения и принятия отраженных ультразвуковых колебаний и последующего анализа их амплитуды, времени прихода, формы и пр. с помощью специального оборудования — ультразвукового дефектоскопа.

Выбор данного метода обусловлен наличием ряда преимуществ:

1) Ультразвуковые волны реагируют непосредственно на причину нарушения прочности. Другие методы неразрушающего контроля реагируют на дефекты косвенно. Сам факт распространения ультразвуковой волны основан на упругих связях в контролируемом объекте. Дефекты нарушают эти связи, понижая прочность изделия, и вызывают отражение УЗ волны, что и регистрируется специальными приборами. Таким образом, ультразвуковым методом можно выявить мельчайшие дефекты (трещины раскрытием 10-5..10-4м).

2) Возможность автоматизации.

3) Возможность контроля изделий из различных материалов.

4) Возможность выявления как внутренних, так и поверхностных дефектов.

5) Безопасность для дефектоскописта.

6) Сравнительно небольшие затраты на проведения контроля.

Ультразвуковые волны отражаются от мельчайших воздушных зазоров. Поэтому чтобы ввести их в объект контроля, необходимо принимать меры для обеспечения стабильного акустического контакта в процессе контроля.

В разработанной установке ультразвуковые колебания вводятся в объект контроля иммерсионным способом. Данный способ подразумевает наличие между

преобразователем и объектом контроля толстого слоя жидкости, толщина которого превышает длину волны во много раз. В данном случае используется одна из разновидностей иммерсионного способа – ввод ультразвуковых колебаний через струю воды – струйный контакт. Иммерсионный способ ввода ультразвука обеспечивает меньшую чувствительность акустической системы. Однако при таком методе обеспечения акустического контакта отсутствует износ датчиков от трения о поверхность трубы, что немаловажно в условиях потокового высокопроизводительного контроля.

Из существующих методов ультразвукового контроля наибольшее применение при контроле труб нашел эхо-импульсный метод. Данный метод позволяет установить наличие несплошностей, дефектов на наружной и внутренней поверхностях и проводить измерение остаточной толщины стенок с целью оценки совокупного износа. Аппаратным обеспечением методики проведения контроля занимаются специализированные фирмы. В ходе анализа рынка ультразвуковых дефектоскопических систем промышленного назначения принято решение использовать сертифицированный многоканальный дефектоскоп «Фазус-2008». Данный дефектоскоп позволит осуществлять контроль одновременно по нескольким каналам. Подобный подход необходим для сокращения общего времени проведения контроля и, как следствие, повышение производительности установки.

Для обеспечения всех необходимых условий проведения ультразвукового контроля труб эхо-импульсным методом разработана установка, включающая в себя ультразвуковые блоки или сборки датчиков, механизмы позиционирования ультразвуковых блоков на поверхности трубы, транспортная система, обеспечивающая необходимые перемещения ультразвуковых блоков и система водообеспечения.

Проведение контроля трубы будет осуществляться несколькими сборками датчиков (пьезоэлектрических преобразователей), перемещаемых вдоль оси вращающейся трубы. Для обеспечения заданной производительности контроля принято решение разделить зону контроля на 12 участков протяженностью 1100 мм (длина новой обсадной трубы составляет от 11 до 13 м) и контролировать каждый участок

своим ультразвуковым блоком. Таким образом, каждую сборку датчиков необходимо перемещать на расстояние от ее исходной позиции до исходной позиции соседней сборки. Затем полученные показания по участкам «сшиваются» в общую дефектограмму.

Общий вид разработанной установки представлен на рисунке 2.

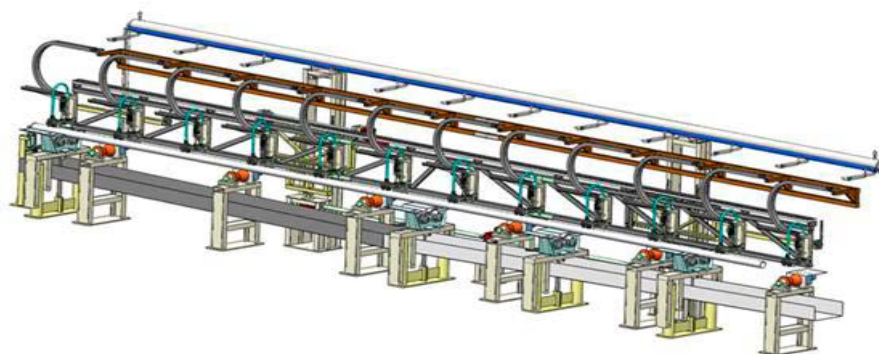


Рисунок 2 – Установка автоматизированного ультразвукового контроля

Ультразвуковой блок является центральной частью системы контроля и предназначен для установки в него пьезоэлектрических преобразователей (датчиков). В блок входят центральный прямой толщиномерный датчик для измерения остаточной толщины стенки трубы и наклонные датчики для поиска дефектов в теле трубы.

Ультразвуковой блок представлен на рисунке 3.

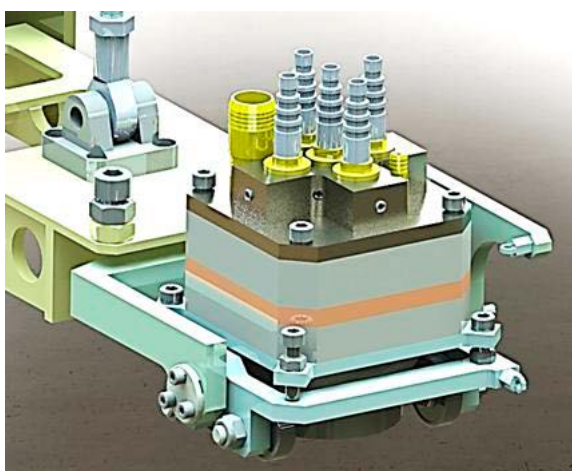


Рисунок 3 – Ультразвуковой блок

Для позиционирования ультразвукового блока на поверхности объекта контроля используется специально разработанный механизм. Для получения четкого акустического сигнала максимальной амплитуды необходимо выставить ультразвуковой блок по нормали к сканируемой поверхности. Для этого механизм позиционирования должен отслеживать возможные неровности поверхности трубы. Происходит это за счет вращения его составных частей относительно осей АА, ББ, ВВ.

Подъем ультразвукового блока над поверхностью трубы (перевод в положение ожидания), а также опускание на трубу, т.е. перевод в положение для контроля, осуществляется за счет пневмоцилиндра, системы рычагов и шарниров.

В ультразвуковой блок через установленный на нем штуцер в процессе контроля непрерывно подается вода. Струя воды, проходя ультразвуковой блок, формирует стабильный ламинарный поток, из которого с помощью специальных средств удаляются пузыри воздуха.

Механизм позиционирования ультразвукового блока представлен на рисунке 4.

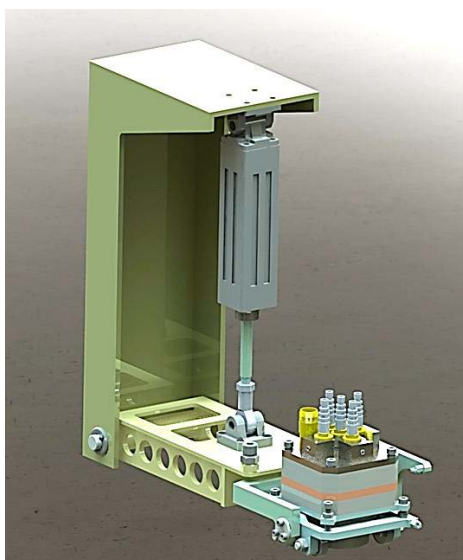


Рисунок 4 – Механизм позиционирования ультразвукового блока

Разработанная автоматизированная установка обеспечивает сплошной контроль труб со скоростью, позволяющей встраивать установку в существующие транспортные линии без снижения общей производительности цеха.

Применяемый метод контроля позволит выявлять наиболее опасные типы дефектов, возникающие в теле трубы.

1.5.2 «Выбор оптимального шага сканирования по спирали при автоматизированном ультразвуковом контроле труб на ОАО «Тагмет»

В статье «Выбор оптимального шага сканирования по спирали при автоматизированном ультразвуковом контроле труб на ОАО «Тагмет» [2] приведен метод аналитического расчета шага сканирования с учетом соотношения ширины зоны перекрытия при сканировании, ширины пьезоэлектрического преобразователя и плотности потока зондирующих импульсов. Оптимизирована величина шага сканирования и установлена максимальная производительности линий контроля. Выявлено, что величина шага сканирования поверхности трубы зависит от диаметра трубы и угла разворота колеса рольганга, где при увеличении диаметра трубы или угла разворота колёс рольганга шаг сканирования увеличивается.

1.5.3 Патент RU 2397491

В патенте RU 2397491 С1 описывается способ ультразвукового контроля цилиндрических изделий, в том числе труб [3], включающий вращательно-поступательное перемещение труб по рольгангам, сканирование труб при помощи измерительного модуля, снабженного акустическими преобразователями, отличающийся тем, что, по меньшей мере, один измерительный модуль с одним или несколькими акустическими преобразователями перемещают параллельно контролируемому объекту, например, трубе со скоростью перемещения объекта контроля, при этом в начале контроля синхронизируют скорость измерительного модуля со скоростью контролируемой трубы, обеспечивая его перемещение со скоростью, равной поступательной скорости трубы в течение одного оборота трубы, контролируя первым акустическим преобразователем 100% переднего конца трубы, после чего останавливают измерительный модуль и далее ведут 100%-й контроль поверхности трубы

по спирали до момента подхода переднего конца трубы ко второму акустическому преобразователю, после чего вновь синхронизируют скорость измерительного модуля со скоростью поступательного движения трубы, контролируя вторым акустическим преобразователем 100% переднего конца трубы, после чего останавливают измерительный модуль и далее контролируют трубу по спирали до момента подхода переднего конца трубы к третьему акустическому преобразователю и так далее, в зависимости от количества установленных на измерительном модуле акустических преобразователей разного функционального назначения, после окончания сканирования переднего конца трубы возвращают измерительный модуль на исходную отметку, а при подходе заднего конца трубы снова синхронизируют скорость измерительного модуля с поступательной скоростью контролируемой трубы и перемещают его в направлении движения трубы со скоростью, равной скорости трубы в течение одного оборота трубы, контролируя 100% заднего конца трубы одним или несколькими акустическими преобразователями, повторяя ту же самую последовательность перемещений и остановок измерительного модуля, выполняемую при контроле переднего конца трубы.

1.5.4 Цель модернизации объекта

Описанные в статьях и патенте методы сканирования трубы являются современными, но не подходят для модернизации УЗК1-2 ввиду высоких экономических затрат на реализацию перемещения пьезоэлектрического преобразователя относительно трубы. Исходя из этого, предлагается следующий комплекс мер по модернизации установки:

1) Установка программируемого логического контроллера для управления преобразователями частоты. Это позволит реализовать различные полезные функции для работы с УЗК.

2) Установка компьютерной станции (Siemens Simatic PC Station) и реализация человеко-машинного интерфейса. С помощью этого компьютера можно будет управлять приводами установки точно и удобно, а также получать информацию о

процессе сканирования и ошибках в работе оборудования.

3) Модернизация привода разворота кантующих роликов: установки нового асинхронного электродвигателя, установка преобразователя частоты.

4) Установка абсолютного энкодера на плиту кантующего ролика. Энкодер позволит получать информацию о текущем установленном угле поворота плиты. Используя эту информацию можно реализовать автоматическую установку шага сканирования трубы.

5) Установка инкрементального энкодера на вал двигателя привода разворота для реализации контура регулирования положения.

6) Установка двух оптических датчиков для проверки правильности установки шага сканирования и его корректировки.

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать вывод, что целью модернизации объекта является уменьшение затрат ресурсов (время, деньги, персонал) на проверку трубы, повышение уровня автоматизации установки и, как следствие, упрощение работы с УЗК.

1.6 Требования к электроприводу разворота кантующих роликов

Учитывая технологический режим работы привода можно сформулировать следующие требования:

- обеспечение высокой надёжности;
- обеспечение требуемого момента на валу двигателя при скорости менее 10% от номинальной;
- электропривод должен обеспечивать оптимальное протекание переходных процессов при разгоне, торможении, реверсировании и регулировании скорости вращения двигателя;
- высокая точность регулирования скорости с ошибкой при работе на минимальной скорости, не превышающей 5 %;
- обеспечение плавного пуска и торможения с целью исключения тяжёлых механических ударов в кинематических узлах электропривода;

- обеспечение заданного ускорения и замедления
- простота эксплуатации, ремонта и обеспечение безопасности работы обслуживающего персонала.

1.7 Выбор системы электропривода разворота кантующих роликов

Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов и необходимость использования высоких технологий обуславливают устойчивую тенденцию внедрения в различные области промышленного производства современных регулируемых электроприводов. В равной степени это относится и к электроприводам регулировочных механизмов. Стремительное развитие преобразовательной техники в последние годы, существенное повышение её надежности, электрических параметров и снижение стоимости, желание увеличить срок безотказной работы установки УЗК и придать ей новые эксплуатационные свойства делают целесообразным рассмотрение вопроса о замене релейно-контакторной системы управления электропривода на преобразователь частоты.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах регулировочного оборудования является эффективным методом повышения технологичности производства [4]. Использование таких приводов позволяет:

- значительно (до 40 %) снизить энергопотребление привода, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на энергоносители;
- осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по желаемому закону от времени, при варьировании временем разгона и торможения от долей секунды до десятков минут;
- повысить комфортные показатели при управлении регулировочными механизмами и долговечность механического оборудования благодаря плавности и оптимальности переходных процессов;
- защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепях питания двигателей;

- снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счёт значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи;

- плавно изменять скорости и ускорения движения механизмов крана применительно к конкретным технологическим задачам.

Что касается принципа управления, то, проанализировав предъявляемые технологические требования, можно сделать вывод о том, что такие высокие требования поможет обеспечить только векторное управление. Благодаря взаимосвязанному формированию мгновенной фазы и амплитуды тока, или напряжения статора по требуемому закону и управлению магнитным потоком ротора достигается такое управление моментом и скоростью, при котором динамические характеристики близки к характеристикам двигателя постоянного тока. Это достигается путем отдельного управления составляющими тока статора, отвечающими за момент и за поле.

Векторное управление бывает трех типов:

- векторное управление скоростью без датчика скорости. Обычно используется для однодвигательных приводов с асинхронными двигателями, при требуемом диапазоне регулирования 5:1, т.е. для многих промышленных применений, таких как прессы и вентиляторы с большой потребляемой мощностью, центрифуг, неответственных транспортных механизмов;

- векторное управление скоростью с датчиком скорости. Применяется для однодвигательных и многодвигательных асинхронных приводов с повышенными требованиями к динамике даже на низких скоростях, плюс высокая точность управления, т.е. для регулировочных механизмов с точным позиционированием. Для этого типа управления необходим импульсный датчик скорости, например, инкрементальный датчик с 1024-мя импульсами на оборот;

- векторное управление моментом с датчиком скорости. В случае если необходимо поддерживать постоянный момент на валу двигателя, например, привода

моталок, система приводов ведущий – ведомый, системы регулирования натяжения.

При выборе между векторным управлением скоростью без датчика скорости или с датчиком скорости необходимо рассмотреть следующие факторы. Датчик скорости необходим, если:

- необходима наивысшая точность регулирования скорости;
- необходимо удовлетворить повышенным требованиям к динамике;
- требуется точное управление моментом при скорости меньше 10 % от номинальной скорости двигателя.

Информация о текущих значениях и пространственном положении векторов переменных АД может быть получена как прямым их измерением с помощью соответствующих датчиков, так и косвенно на основе математической модели АД.

Работа существующей релейно–контакторной системы управления достаточно интенсивная, и переход на управление двигателем от преобразователя частоты позволит сократить потребность в обслуживании и повысить надежность системы управления.

Исходя из технологических требований, предъявляемых к электроприводу разворота кантователей, выбирается система преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, векторным управлением, датчиком скорости и с косвенным регулированием координат, реализованным программно на основе микроконтроллера преобразователя частоты, где информацию о векторах потокосцеплений АД получают косвенным путем на основе математических моделей. При этом базовой является структура управления с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора и модульного принципа построения системы управления. Так как конечной целью регулирования является изменение угла поворота плит кантователей, то в дополнение необходимо реализовать контур управления положением плиты, ориентируясь на показания абсолютного энкодера, установленного на плите.

1.8 Расчёт и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы работы электропривода разворота кантующих роликов

1.8.1 Расчет статического момента сопротивления, предварительный выбор двигателя

Общестатическое значение сопротивления качению подсчитывается с помощью приведенного коэффициента трения по формуле (1):

$$M_T = (1,5-2) f_{\text{прив}} \cdot 10^{-3} P \frac{d}{2}, \quad (1)$$

где M_T – момент трения,

$f_{\text{прив}}$ – приведенный коэффициент трения (для упорных шарикоподшипников равен 0,0013),

P – внешняя нагрузка, н,

d – диаметр отверстия подшипника, мм.

$$M_t = 2 \cdot 0,0013 \cdot 10^{-3} \cdot 16000 \frac{475}{2} = 9,88 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

В установке УЗК1-2 используется 12 кантующих плит с установленными на них редукторами и электродвигателями, следовательно, суммарный момент равен $M_{\text{тсумм}}$:

$$M_{\text{тсумм}} = 12 M_T, \quad (2)$$

Следовательно,

$$M_{\text{тсумм}} = 12 \cdot 1,248 = 118,56 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Сила, которую необходимо приложить к тяге для начала вращения плиты, рассчитывается по формуле (3):

$$F_T = \frac{M_{\text{тсумм}}}{l}, \quad (3)$$

где l – длина рычага, соединяющего плиту с тягой ($l = 1$ м).

Поскольку угол поворота незначителен, то при расчете силы не учитывается косинус угла:

$$F_T = \frac{118,56}{1} = 118,56 \text{ Н.}$$

Далее необходимо вычислить момент сил трения и опорных реакций в резьбе передачи винт-гайка, с помощью которой приводится в движение тяга. Для этого необходимо воспользоваться формулой (4):

$$M_{\text{тр}} = F \frac{d_2}{2} \text{tg}(\psi + \rho'), \quad (4)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент сил трения и опорных реакций в резьбе передачи винт-гайка,

d_2 – средний диаметр наружной резьбы,

ψ – угол подъема резьбы,

ρ' – угол трения резьбы.

Тогда:

$$M_{\text{тр}} = 118,56 \frac{19,5}{2} \text{tg}(0,188 + 8,25) = 171,481 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Передаточное число редуктора 1ЦУ-100 составляет 6,3. Следовательно, необходимый момент на валу двигателя составит

$$M_1 = \frac{171,481}{6,3} = 27,219 \text{ Н.}$$

Определим время цикла работы механизма. Самый нагруженный режим использования будет возможен при развороте плиты из одного крайнего положения в другое, например, для возврата трубы. Время работы привода в этом режиме может быть разным, но необходимо учитывать, что высокие обороты двигателя приведут к повышенному износу привода. Исходя из этого, можно задать время работы, например, 20 секунд. Для этого необходимо, чтобы скорость вращения вала редуктора была 3 об/с (при шаге резьбы передачи 5 мм и указанной скорости тяга переместится на 300 мм за 20 секунд, линейная скорость перемещения тяги при этом составит 15 мм/с). Время паузы может быть наименьшим при сканировании трубы длиной 3,5 метра, диаметром 219 мм и необходимом шаге сканирования 40 мм. В этом случае примерное время сканирования составит 100 секунд.

Таким образом $t_p = 20 \text{ с}$, $t_n = 100 \text{ с}$, $t_{\text{ц}} = 120 \text{ с}$, следовательно, режим работы будет кратковременный. Статическая нагрузочная диаграмма и тахограмма работы механизма представлена на рисунке 5.

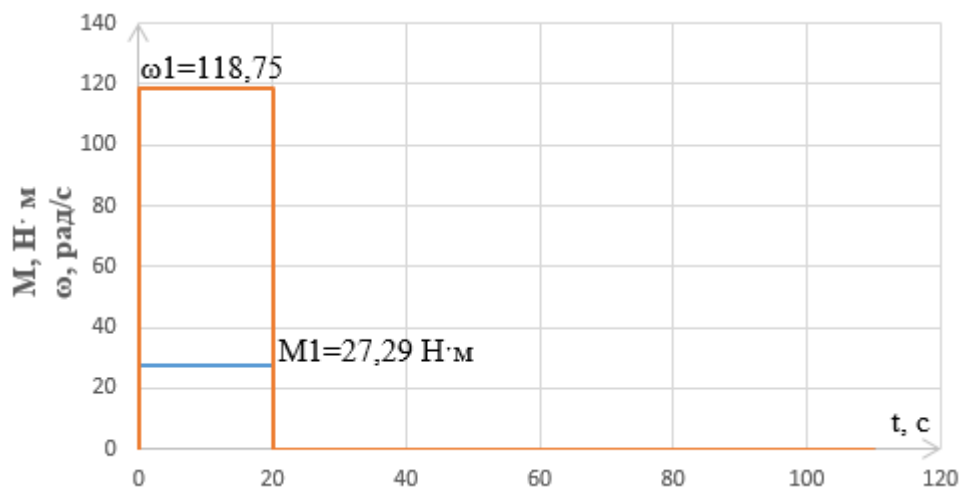


Рисунок 5 – Статическая нагрузочная диаграмма работы механизма

Предварительный выбор двигателя можно осуществить по методу эквивалентного момента. По нагрузочной диаграмме механизма определяется статический

эквивалентный электромагнитный момент двигателя за весь цикл по формуле (5):

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_p}{\sum t_{\text{ц}}}}. \quad (5)$$

Следовательно,

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{27,219^2 \cdot 20}{120}} = 11,112 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для определения ориентировочной мощности приводного электродвигателя помимо момента на валу необходимо знать угловую скорость. Зная полное передаточное число механизма, а также требуемую линейную скорость перемещения тяги, можно определить требуемое число оборотов электродвигателя по формуле (6):

$$n_{\text{ном}} = \frac{v_{\text{т}} i_{\text{ред}} \cdot 60}{P_{\text{h}}} \quad (6)$$

где $v_{\text{т}}$ – требуемая линейная скорость перемещения тяги, мм/с,

$i_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора,

P_{h} – шаг резьбы передачи.

Следовательно,

$$n_{\text{ном}} = \frac{15 \cdot 6,3 \cdot 60}{5} = 1134 \text{ об/мин} \left(118,75 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right).$$

Так как при предварительном выборе двигателя невозможно учесть динамические нагрузки электропривода, то принимается допущение о том, что номинальный

момент двигателя по формуле (7):

$$M_H \geq k_1 M_{\text{экв}}, \quad (7)$$

где k_1 - коэффициент, учитывающий динамические нагрузки в переходных режимах, принимается равным 1,5 ($k_1 = 1,1 - 1,5$).

Следовательно,

$$M_H = 1,5 \cdot 11,112 = 16,668 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Ориентировочная мощность двигателя по формуле (8):

$$P_{\text{расч}} = M_H \omega_{\text{ном}}. \quad (8)$$

$$P_{\text{расч}} = 16,668 \cdot 118,75 = 1979 \text{ Вт}.$$

Предварительно выбираем электродвигатель А90L4 со следующими характеристиками [5]:

Таблица 1 - Технические характеристики выбранного двигателя

Техническая характеристика	Значение
1	2
Мощность при ПВ=100%, P_H , Вт	2200
Мощность при ПВ=25%, P_H , Вт	4400
Линейное напряжение статора, $U_{\text{ном}}$, В	380
Ток статора $I_{\text{ном}}$ при ПВ=100%, А	5,2
Ток статора $I_{\text{ном}}$ при ПВ=25%, А	10,464
Частота вращения, $n_{\text{ном}}$, об/мин	1390

Продолжение таблицы 1.

1	2
Момент при ПВ=100%, M_H , Н·м	15,115
Момент при ПВ=25%, M_H , Н·м	30,228
КПД двигателя, $\eta_{дв}$, %	78
Коэффициент мощности, $\cos\varphi_{ном}$	0,82
Кратность максимального момента, $M_{max}/M_{ном} = \lambda$	2,6
Кратность пускового тока, $I_p/I_n = K_I$	5
Момент инерции ротора двигателя, $J_{дв}$, кг·м ²	0,0056

1.8.2 Расчет момента инерции, окончательная проверка двигателя

Построение полной нагрузочной диаграммы электропривода ведётся на основе рассчитанной ранее упрощённой нагрузочной диаграммы механизма. На диаграмму наносятся участки, соответствующие типовым пусковым и тормозным режимам.

Любое движение механизма происходит в условиях разгона, установившейся скорости перемещения и торможения до полного останова. Уравнение движения механизма с постоянным моментом инерции имеет вид:

$$M = M_{ст} + J_{\Sigma} \varepsilon_{макс}, \quad (9)$$

где M – полный момент двигателя при ускорении и при торможении, Н·м;

$M_{ст}$ – момент статической нагрузки, Н·м;

J_{Σ} – суммарный приведённый момент инерции механизма, кг·м²;

$\varepsilon_{доп}$ – темп ускорения или замедления в процессе разгона или торможения, рад/с².

Для расчёта и построения полной нагрузочной диаграммы сначала необходимо определить приведённые моменты инерции для режимов разгона торможения.

Фактическая скорость перемещения тяги ($v_{\text{тяги}}$) при вращении двигателя со скоростью 118,75 рад/с составляет 0,015 м/с.

Суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя рассчитывается по нижеприведенной формуле:

$$J_{\Sigma} = J_{\Sigma\text{вращ}} + J_{\Sigma\text{пост}} = J_{\text{дв}} \delta + \frac{m_{\text{тяги}} v_{\text{тяги}}^2}{\omega_{\text{ном}}^2} + \frac{J_{\text{плит}\Sigma}}{i^2} \quad (10)$$

где $J_{\text{дв}}$ – момент инерции вала электродвигателя, Н·м;

$\delta = 2$ – коэффициент, учитывающий момент инерции вращающихся частей механизма;

$m_{\text{тяги}} = 256,91$ – масса тяги, кг;

$J_{\text{плит}\Sigma} = 40,66$ суммарный момент инерции 12 плит при скорости вращения 1,5 град/с, кг·м².

$$J_{\Sigma} = 0,0056 \cdot 2 + \frac{256,91 \cdot 0,015^2}{118,75^2} + \frac{40,66}{6,3^2} = 1,036 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Максимально допустимый темп ускорения или замедления в процессе разгона или торможения:

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \frac{2,6M_{\text{H}} - M_1}{J_{\text{сум}}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{макс}} = \frac{2,6 \cdot 30,228 - 27,219}{1,036} = 49,6 \text{ рад/с}^2.$$

Время разгона принимается равным времени торможения. Время разгона и торможения при вращении плиты:

$$t_{\downarrow r} = t_{\uparrow p} = \frac{v_{\text{факт}}}{a_{\text{доп}}} \quad (12)$$

$$t_{\downarrow r} = t_{\uparrow p} = \frac{0,015}{0,00511} = 2,935 \text{ с.}$$

Динамический момент электропривода $M_{\text{дин}}$ при разгонах и торможениях определяется, исходя из уравнения основного уравнения движения электропривода (9), принимая линейный закон изменения скорости:

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = J_{\Sigma} \varepsilon_{\text{макс}} \quad (13)$$

Динамический момент электропривода при разгоне будет равен моменту при торможении:

$$M_{\text{дин_пуск}} = M_{\text{дин_торм}} = J_{\Sigma} \varepsilon_{\text{макс}} \quad (14)$$

$$M_{\text{дин_пуск}} = M_{\text{дин_торм}} = 1,036 \cdot 49,6 = 51,371 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

На каждом интервале нагрузочной диаграммы полный момент рассчитывается исходя из основного уравнения движения электропривода (9):

Область тахограммы при разгоне:

$$M_1 = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин_пуск}} \quad (15)$$

$$M_1 = 27,219 + 51,371 = 78,59 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Область тахограммы при торможении:

$$M_3 = M_{ст} - M_{дин_пуск} \quad (16)$$

$$M_3 = 27,219 - 51,371 = -24,152 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_2 = M_{ст} = 27,219.$$

Путь, проходимый при разгоне и при торможении:

$$S_{пт} = \frac{V_k - V_n}{2} \cdot t_1, \quad (17)$$

где $S_{пт}$ - путь, проходимый при разгоне и при торможении, м;

V_n - начальная скорость, м/с;

V_k - конечная скорость, м/с;

t_1 - время разгона и торможения, с.

$$S_{пт} = \frac{0,015 - 0}{2} \cdot 2,935 = 0,022012 \text{ м}.$$

Путь, проходимый при работе с установившейся скоростью:

$$S_{уст} = 0,3 - 2S_{пт} \quad (18)$$

$$S_{уст} = 0,3 - 2 \cdot 0,022012 = 0,256 \text{ м}.$$

Время работы на участке с установившейся скоростью:

$$t_{уст} = \frac{S_{уст}}{v_{факт}} \quad (19)$$

$$t_{уст} = \frac{0,256}{0,015} = 17,065 \text{ сек.}$$

Итоговое время работы механизма за один цикл будет рассчитываться как сумма времени работы в установившемся режиме и времени разгона и торможения:

$$t_{общ} = t_{уст} + 2t_{рт}. \quad (20)$$

$$t_{общ} = 17,065 + 2 \cdot 2,935 = 22,935 \text{ с.}$$

Полная нагрузочная диаграмма и тахограмма представлена на рисунке 6.

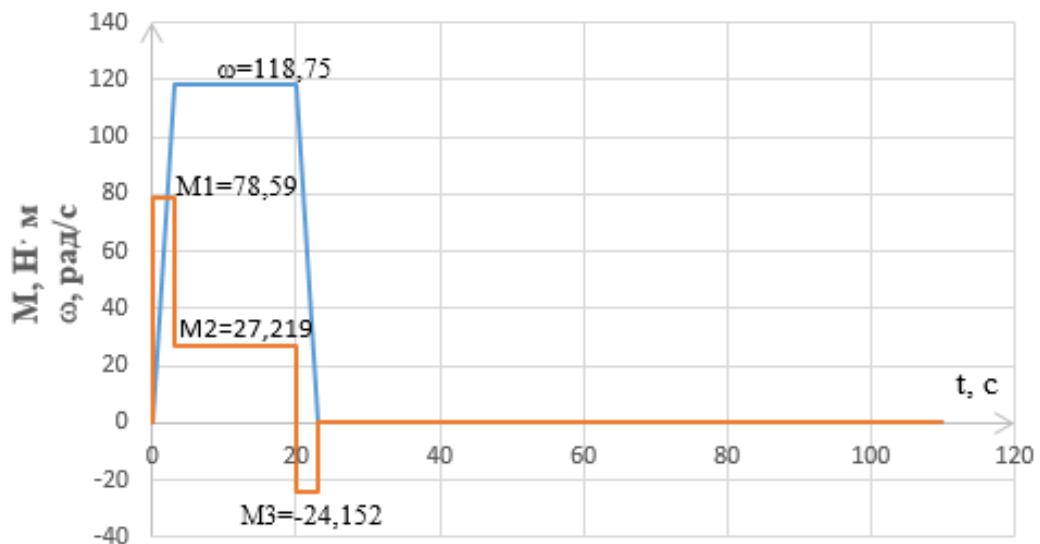


Рисунок 6 – Полная нагрузочная диаграмма и тахограмма работы механизма

С помощью полной нагрузочной диаграммы можно рассчитать эквивалентный момент и выбрать необходимую мощность двигателя. Полный эквивалентный момент двигателя рассчитывается с учётом возникающих динамических моментов в процессе работы электропривода.

Эквивалентный момент:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{пр}} + M_2^2 t_{\text{уст}} + M_3^2 t_{\text{пр}}}{\sum t_{\text{ц}}}} \quad (21)$$

$$M_{\text{экв}} = \frac{(78,59)^2 \cdot 2,935 + 27,219^2 \cdot 17,065 + (-24,152)^2 \cdot 2,935}{110} = 17,756 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Условие проверки двигателя по нагреву $1,5 \cdot M_{\text{экв}} < M_{\text{ном}}$.

$$M_{\text{экв}} = 1,5 \cdot 17,756 = 26,634 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Условие проверки по перегрузке:

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \lambda < \lambda_{\text{дв}} \quad (22)$$

$$\frac{78,59}{30,228} = 2,59 < 2,6$$

Двигатель A90L4 прошёл проверку по перегрузочной способности и по нагреву.

1.9 Выбор преобразователя частоты для привода разворота кантующих роликов

Основываясь на номинальных данных асинхронного двигателя A90L4, представленных в таблице 1 был выбран соответствующий преобразователь частоты Unidrive M701-034 000100 A.

M700 обеспечивает максимальную производительность, синхронизацию по одной или нескольким осям с обменом данными по сети. Встроенный Ethernet-модуль реального времени (IEEE 1588 V2), управление перемещениями и высокоскоростные входы-выходы для захвата положения позволяют легко создавать все более сложное и универсальное оборудование.

Основные технические характеристики преобразователя [6] приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические характеристики преобразователя Unidrive M701-034 000100 A

Напряжение питания, В	Нормальный режим		Тяжелый режим		Степень защиты
	Мощность, кВт	Ток, А	Мощность, кВт	Ток, А	
380/480, ±10%	5,5	12,3	4	10	IP20

Преимущества Unidrive M700:

- аппаратная реализация протокола Ethernet IEEE 1588 V2 для максимальной точности синхронизации;
- возможность установки до трех дополнительных SI-модулей для обеспечения обратной связи, расширения входов-выходов и обмена данными по промышленной сети fieldbus;
- встроенный двухпортовый коммутатор Ethernet для простого подключения;
- управление как асинхронными, синхронными двигателями, так и серводвигателями в разомкнутом или замкнутом контуре;
- гибкая обратная связь с надежными резольверами или энкодерами высокого разрешения;
- возможность одновременного подключения до трех каналов энкодеров в стандартной комплектации. В качестве примера, электропривод можно подключить к энкодеру обратной связи, опорному энкодеру и создать имитируемый выходной сигнал энкодера без использования дополнительных опциональных модулей;
- поддержка стандартных энкодеров, инкрементальных и SinCos, включая энкодеры с абсолютными коммутационными сигналами;

- поддержка энкодеров с частотой сигналов до 4 МГц и поддержка кабелей длиной до 100 м.

Особенности силовой части электропривода Unidrive M701-034 00062 A:

- три фазы 380 В при $f = 50$ Гц;
- возможность управления распределением питания (встроенный электронный выключатель);
- возможность работы по шине постоянного тока;
- дополнительное питание системы управления (24 В) при выключенной силовой части (настройка, аварийное выключение, не прерывая работы шин данных и программы управления);
- настройка электропривода без наличия силового питания;
- бесперебойная работа системы управления с датчиками обратной связи и модулями ввода/вывода;
- съемные клеммные блоки.

1.10 Выбор датчиков

1.10.1 Выбор абсолютного энкодера для установки на плиту

В машино- и станкостроении для осуществления правильного позиционирования систем контроля за передвижением постоянно требуются самые последние и точные позиционные данные. Благодаря своей способности в любой момент осуществлять присвоение точных и однозначных позиционных значений какой-либо угловой позиции или позиции перемещения датчики угла поворота стали одним из самых важных соединительных звеньев между механической частью машины и ее блоком управления.

Первый абсолютный датчик, принцип работы которого основывался на оптоэлектронном считывании закодированных растров, был разработан немецкой компанией FRABA в 1973 году [7]. В то время как инкрементальные датчики

определяют положение только относительно какого-то определенного положения, в абсолютных датчиках информация о угловом положении закодирована механически, например, на оптическом диске в виде раstra, содержащего уникальный код для каждой позиции вала. Таким образом абсолютный энкодер выдает информацию о положении вала, т.е. о текущей координате, сразу после включения и формирует сигнал как во время вращения, так и в режиме покоя. Абсолютный энкодер не теряет своего значения при потере питания и, если в обесточенном состоянии вал энкодера был провернут на определенный угол, то при появлении напряжения энкодер сразу выдаст новое, фактическое угловое положение вала и фактический номер оборота. Благодаря этому свойству не требуется после каждого включения системы производить движение механических частей машины на стартовую или как принято называть референтную позицию, что является неоспоримым преимуществом абсолютных энкодеров перед инкрементальными (импульсными). Преимуществом абсолютного энкодера является также и то, что он не подвержен помехам. В случаях, когда сигнал с диска не может быть полноценно прочитан энкодером, например, если вал вращается слишком быстро, точный угол поворота будет зарегистрирован, когда скорость вращения уменьшится. Но даже при быстром вращении вала возможна регистрация положения, хоть и с меньшей точностью. Для этого во внимание просто принимается только информация, поступающая от более старших разрядов, т.е. искаженная (за счет большой скорости вращения) информация, поступающая от младших разрядов, просто игнорируется. Абсолютный энкодер устойчив к вибрациям и другого рода помехам, т.к. ошибка в результате подсчета «ложных» импульсов, возникших в результате, например, вибрации, исключена.

На основании требуемой точности установки угла поворота плиты в $0,2^\circ$ и интерфейса PROFIBUS DP выбирается 19 битный абсолютный энкодер PHE 901 фирмы Leine Linde с характеристиками, приведенными в таблице 3. Датчик устанавливается на плите взамен старого ВК 128-7, вращение вала плиты передается на вал энкодера через редуктор с передаточным числом 1/32.

Таблица 3 – Технические характеристики энкодера Leine Linde PHE 901

Техническая характеристика	Значение
Диаметр вала, мм	12
Разрешение, бит/об	19
Тип подключения	3xM12
Выходной интерфейс	PROFIBUS DP
Рабочая температура, °C	-40 ... +70
Класс защиты	IP67/IP66
Потребление тока при 24В постоянного тока, мА	80
Абсолютная точность, arcsec	± 100
Масса, кг	1,7

На рисунке 7 показан внешний вид абсолютного энкодера Leine Linde PHE 901.



Рисунок 7 – Внешний вид энкодера Leine Linde PHE 901

1.10.2 Выбор инкрементального энкодера для установки на вал двигателя привода разворота кантующих роликов

Импульсный (пошаговый) энкодер относится к типу энкодеров, которые предназначены для указания направления движения и/или углового перемещения внешнего механизма [8]. Пошаговый энкодер формирует импульсы, количество которых соответствует повороту вала на определенный угол. Этот тип энкодеров, в отличие

от абсолютных, не формирует код положения вала, когда вал находится в покое. Пошаговый энкодер связан со счетным устройством, это необходимо для подсчета импульсов и преобразования их в меру перемещения вала.

Данный энкодер состоит из следующих компонентов: источника света, диска с метками, фототранзисторной сборки и схемы обработки сигнала. Диск пошагового энкодера подразделен на точно позиционированные отметки. Количество отметок определяет количество импульсов за один оборот. К примеру, если диск поделен на 1000 меток, тогда за 250 импульсов вал должен повернуться на 90 градусов.



Рисунок 8 – Диск с метками оптического инкрементального энкодера

Технические характеристики выбранного инкрементального энкодера представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики энкодера SICK DBS50E-S5AK01000

Техническая характеристика	Значение
Количество импульсов на оборот	1000
Электрический интерфейс	4,5 В ... 5,5 В, TTL/RS422
Тип подключения	Универсальный кабель 1,5 м, 8 жил
Рабочий ток, мА	≤ 50 (без нагрузки)
Ток нагрузки, мА	≤ 30
Механическое исполнение	Сплошной вал, торцевой фланец
Диаметр вала, мм	8·15,5
Вес, г	180 (с соединительным кабелем)
Максимальная частота вращений, об/мин	8000

На рисунке 9 изображен внешний вид инкрементального энкодера SICK DBS50E-S5AK01000.



Рисунок 9 – Внешний инкрементального энкодера SICK DBS50E-S5AK01000

1.10.3 Выбор оптических датчиков для проверки правильности установки шага сканирования

Рефлекторные датчики - электронные устройства, которые обнаруживают контролируемый объект перекрывающий оптическое излучение. Датчики имеют полупроводниковый или релейный коммутационный элемент. Датчик состоит из излучателя и приёмника инфракрасного излучения, установленных в одном корпусе. Луч излучателя отражается от рефлектора (световозвращателя) и попадает в приёмник. Датчик срабатывает при пересечении луча контролируемым предметом. Датчики поставляются комплектно с отражателями (рефлекторами). В конструкции датчиков предусмотрена защита от внешней засветки, защита от переполюсовки напряжения питания. Работа датчика показана на рисунке ниже.

Определения:

S_d - зона чувствительности. Зона, в пределах которой может быть установлено расстояние срабатывания;

S_{min} - минимальное расстояние срабатывания. Нижний предел зоны чувствительности (мёртвая зона);

Дальность действия определяется типом датчика при использовании стандартного рефлектора диаметром 60мм.

Данные датчики устанавливаются в количестве двух штук на определенном

участке на расстоянии 40 мм друг от друга (максимальный шаг сканирования). Труба будет перемещаться через этот участок, обеспечивая возможность работы датчиков. В момент перекрытия луча первого излучателя осуществляется начало отсчета времени перемещения трубы до второго датчика. В момент перекрытия трубой второго луча, отсчет прекращается. Далее осуществляется сравнение расчётного времени перемещения трубы с фактическим. Время перемещения может быть разным, в зависимости от установленных параметров сканирования в программе управления. Осуществление такой операции позволяет контролировать правильность установки шага сканирования, а также корректировать угол поворота на необходимую величину.



Рисунок 10 – Принцип работы рефлекторного оптического датчика

Технические характеристики выбранного рефлекторного оптического датчика представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики оптического датчика ВИКО-Р-59-ПЗ

Зона чувствительности (S_d), м	5
Напряжение питания постоянного тока, В	24
Тип выхода	Релейный
Время отклика, мс	20
Спектр излучения	красный
Степень защиты	IP54

2 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Моделирование работы привода разворота кантующих роликов в программе MATLAB

2.1.1 Структурная схема системы управления

Система управления электродвигателем привода разворота выполнена во вращающейся системе координат и построена по принципу подчиненного регулирования параметров.

Статор и ротор АД представляют собой инерционные звенья с постоянными времени T_S и T_R , которые и определяют характер динамических процессов в электроприводе [9]. Для компенсации влияния постоянных времени в переходных режимах используется регулятор потокосцепления, тока и скорости в замкнутой системе регулирования.

Канал управления потокосцеплением ротора является двухконтурным и включает внешний контур регулирования потокосцепления ротора, цепь обратной связи по потокосцеплению, которому подчинён внутренний контур регулирования потокообразующей составляющей тока статора по оси x .

Контур регулирования потокосцепления ротора с регулятором потока РПт является внешним по отношению к контуру тока по оси x . Выходной сигнал регулятора потока представляет собой сигнал задания составляющей тока статора по вещественной оси I_{sxz} . На входе регулятора сравниваются сигнал задания $U_{зп}$ и сигнал обратной связи по потокосцеплению ротора $U_{оп}$, определённый по модели двигателя.

Канал управления положением является трехконтурным и содержит следующие контуры: контур составляющей тока статора по оси u , контур скорости и контур положения. Контур составляющей тока статора по оси u включает ПЧ, цепь отрицательной обратной связи по току и регулятор тока. Контур регулирования скоро-

сти включает в себя замкнутый контур составляющей тока по оси u , цепь отрицательной обратной связи по скорости и регулятор скорости. Контур регулирования скорости с регулятором РС, замкнутым по сигналу с выхода датчика скорости ДС, является внешним по отношению к контуру регулирования тока I_{sy} . Контур регулирования положения включает в себя ранее описанные контуры скорости и тока, цепь отрицательной обратной связи по положению и нелинейный регулятор положения.

Регуляторы тока (ПИ-типа) получаются идентичными, и они настраиваются из условия обеспечения приемлемого быстродействия. Регуляторы скорости и положения настраиваются на симметричный (П-регулятор) оптимум, регулятор потокосцепления синтезируются ПИ-типа. Для реализации частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением принципиально возможно использование любого из типов преобразователей частоты. Универсальным является электропривод на основе ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН).

В рассматриваемой схеме исключение влияния перекрестных связей, имеющих в математической модели двигателя, обеспечивается путем использования быстродействующих контуров регулирования токов. Это позволяет рассматривать подсистему регулирования потокосцепления ротора как не связанную с подсистемой регулирования моментобразующей составляющей тока статора и делает возможным независимое регулирование потокосцепления ротора подобно тому, как происходит регулирование потока возбуждения в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением. В частности, существует возможность предварительного намагничивания двигателя, т. е. возможность установить поток до того, как на контур скорости будет подан сигнал задания скорости и когда скорость двигателя равна нулю.

Учитывая всё вышесказанное, можно предложить структурную схему системы векторного регулирования, представленную в приложении А.

Для расчёта параметров регуляторов сначала необходимо рассчитать параметры объекта регулирования, т.е. двигателя А90L4.

2.1.2 Расчёт параметров объекта регулирования

В связи с тем, что в каталогах фирмы производителя не указываются все параметры обмотки двигателя, необходимые для расчета регуляторов, то все необходимые для этого данные рассчитываются по эмпирическим формулам. Расчет производится для выбранного асинхронного двигателя А90L4.

Номинальное скольжение:

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_c - n_{\text{НОМ}}}{n_c}, \quad (23)$$

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{1500 - 1390}{1500} = 0,073$$

Величина критического скольжения:

$$s_{\text{кр}} = (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) s_{\text{НОМ}}, \quad (24)$$

$$s_{\text{кр}} = (2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}) \cdot 0,073 = 0,367$$

Конструктивный коэффициент s_1 .

Первоначально задается значение коэффициента s_1 в диапазоне 1,006-1,05 для предварительного расчета параметров схемы замещения. После расчета индуктивностей, входящих в уравнение сравниваются полученные значения с первоначально выбранными и при необходимости расчет повторяется для другого значения s_1 . Принимается $s_1 = 1,012$.

Приведенное активное сопротивление ротора:

$$R_{R'} = \frac{1}{3} \frac{(P_H + \Delta P_{\text{мех}})}{I_{\text{НОМ}}^2 \frac{1-s_H}{s_H}}, \quad (25)$$

где $\Delta P_{\text{мех}} = 0,01P_H$ - механические потери.

$$R_{R'} = \frac{1}{3} \frac{(4400 + 44)}{10,464^2 \frac{1-0,073}{0,073}} = 1,071 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статора:

$$R_s = \frac{\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} \cos\varphi (1-\eta)}{I_{\text{НОМ}}} - c_1^2 R_{R'} - \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{3I_{\text{НОМ}}^2}. \quad (26)$$

$$R_s = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}} 0,82(1-0,78)}{10,464} - 1,012^2 \cdot 1,071 - \frac{44}{3 \cdot 10,464^2} = 2,552 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора:

$$L_{1S} \approx L_{1R} = \frac{\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}}}{4\pi f (1+c_1^2) k_I I_{\text{НОМ}}}. \quad (27)$$

$$L_{1S} \approx L_{1R} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{4 \cdot \pi \cdot 50 (1+1,012^2) 5 \cdot 10,464} = 0,0033 \text{ Гн}$$

Индуктивность обмотки статора и приведенная индуктивность обмотки ротора:

$$L_S \approx L_{R'} = \frac{1}{2\pi f} \frac{\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}}}{I_{\text{НОМ}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \frac{2}{3} \frac{2\pi f \cdot \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} \cdot S_{\text{НОМ}}}{p_{\text{II}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} S_{\text{кр}}}}. \quad (28)$$

$$L_S \approx L_{R'} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{10,464 \sqrt{1 - 0,82^2} - \frac{2}{3} \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 2,6 \cdot 30,228 \cdot 0,073}{4 \frac{380}{\sqrt{3}} 0,367}} = 0,31206 \text{ Гн.}$$

Индуктивность контура намагничивания:

$$L_m = L_S - L_{\text{IS}}. \quad (29)$$

$$L_m = 0,31206 - 0,0033 = 0,30877 \text{ Гн.}$$

Проверка правильности выбора коэффициента приведения:

$$c_1 = 1 + \frac{L_{\text{IS}}}{L_m}. \quad (30)$$

$$c_1 = 1 + \frac{0,0033}{0,31206} = 1,011.$$

Постоянная времени статорной цепи:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}. \quad (31)$$

$$T_s = \frac{0,31206}{2,552} = 0,122$$

Коэффициент электромагнитной связи ротора:

$$k_R = \frac{L_m}{L_R}. \quad (32)$$

$$k_R = \frac{0,62773}{0,63437} = 0,989.$$

Номинальное значение потокосцепления АД Ψ_H :

$$\Psi_H = \frac{2M_{\text{НОМ}}}{3p_{\Pi} k_R I_{\text{НОМ}} \cos\varphi}. \quad (33)$$

$$\Psi_H = \frac{2 \cdot 30,228}{3 \cdot 4 \cdot 0,989 \cdot 10,464 \cdot 0,82} = 0,593 \text{ В} \cdot \text{с}$$

Электромагнитная постоянная времени роторной цепи:

$$T_R = \frac{L_R}{R_R}. \quad (34)$$

$$T_R = \frac{0,31206}{1,071} = 0,291 \text{ с.}$$

Так как значения коэффициента c_1 приблизительно равно заданному значению принятого коэффициента $c_1 = 1,012$, то рассчитанные параметры схемы замещения АД наиболее приближены к реальным значениям. На основе предложенной ранее структуры подчинённого регулирования и рассчитанных параметров объекта регулирования выполняется расчёт параметров регуляторов и строится модель системы управления ЭП с АД при векторном управлении.

2.1.3 Синтез регуляторов проекций тока статора на оси x-y

Синтез регулятора тока производится при следующих допущениях:

- ориентация по вектору потокосцепления ротора Ψ_R выполнена идеально;
- потокосцепление ротора поддерживается постоянным (привод работает только в первой зоне);
- влияние перекрестных связей либо устранено, либо отсутствует изначально;
- динамика преобразователя частоты (ПЧ) по каналу q приближенно описывается апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{K_{\text{пч}}}{T_{\mu}s + 1}, \quad (35)$$

где $K_{\text{пч}}$ - коэффициент усиления преобразователя частоты;

$T_{\mu} = 0,002$ с - некомпенсируемая малая постоянная времени преобразователя частоты.

Коэффициент усиления преобразователя частоты находится как:

$$K_{\text{пч}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{упр}}} = \frac{380/\sqrt{3}}{10} = 21,939.$$

Передаточная функция преобразователя частоты:

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{21,939}{0,002s + 1}.$$

Контур тока настраивается на оптимальный переходный процесс.

Быстродействие настроенного на оптимум контура будет определяться малой некомпенсируемой постоянной времени преобразователя частоты T_{μ} .

Передаточная функция разомкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{\text{КТ}}^{\text{раз}} = W_{\text{РТ}} \frac{K_{\text{ПЧ}}}{(T_{\mu} s + 1)} \frac{1/R_s}{T_s s + 1}. \quad (36)$$

Коэффициент обратной связи по току статора:

$$K_{\text{от}} = \frac{U_{\text{от}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{НОМ}}}. \quad (37)$$

$$K_{\text{от}} = \frac{10}{\sqrt{2} \cdot 10,464} = 0,676$$

Передаточная функция регулятора тока имеет вид:

$$W_{\text{РТ}} = \frac{T_s p + 1}{T_{\text{ИТ}}}. \quad (38)$$

Постоянная времени интегрирования контура регулирования тока рассчитывается как:

$$T_{\text{ИТ}} = \frac{2T_{\mu} K_{\text{ПЧ}} K_{\text{от}}}{R_s}. \quad (39)$$

$$T_{\text{ИТ}} = \frac{2 \cdot 0,002 \cdot 21,939 \cdot 0,676}{2,552} = 0,023.$$

Таким образом получился ПИ регулятор тока по оси x.

Структура и параметры регулятора тока по оси x полностью соответствуют структуре и параметрам регулятора тока по оси y.

Структурная схема контура тока по оси x представлена на рисунке 11.

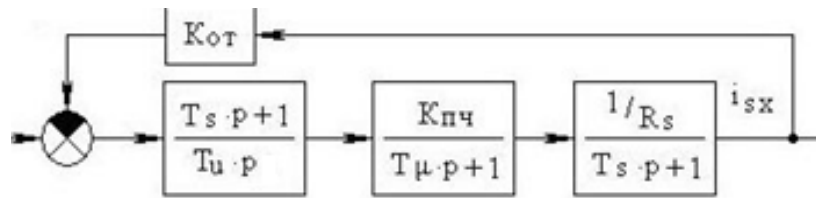


Рисунок 11 – Структурная схема контура тока по оси x

2.1.4 Синтез контура регулирования потокосцепления

В простейшем случае, когда привод работает только в первой зоне регулирования скорости ($\omega_R < \omega_{ном}$) при соблюдении закона $\Psi_R = const$, формирователь сигнала задания по реактивной составляющей тока вырождается в задатчик сигнала постоянного уровня, как правило, соответствующего номинальному уровню потокосцепления ротора.

Фактически, это означает поддержание постоянного уровня потокосцепления ротора в процессе работы асинхронного двигателя.

Структурная схема контура потокосцепления представлена на рисунке 12.

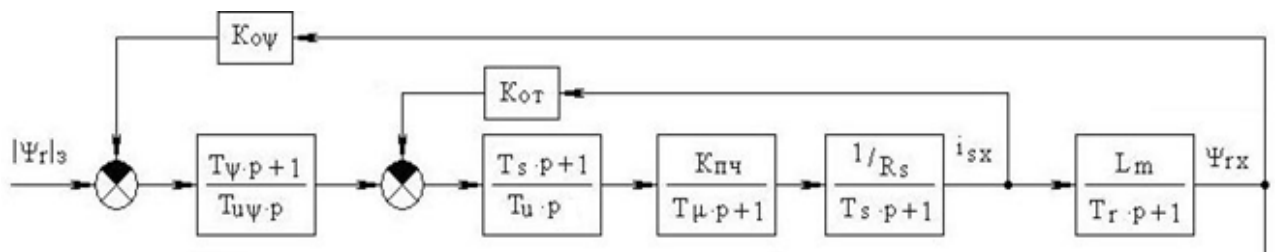


Рисунок 12 - Структурная схема контура регулирования потокосцепления

Настройка контура потокосцепления производится на стандартный переходный процесс. Быстродействие контура так же будет определяться малой некомпенсированной постоянной времени T_μ .

Передаточная функция контура регулирования потокосцепления:

$$W_{кт}^{раз} = W_{пт} \cdot \frac{1/K_{от}}{2T_\mu s + 1} \cdot \frac{k_R R_R T_R}{T_R s + 1} \cdot K_{о\psi} \quad (40)$$

Коэффициент цепи обратной связи контура регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя:

$$K_{o\psi} = \frac{U_{o\psi}}{\psi_H}. \quad (41)$$

$$K_{o\psi} = \frac{10}{0,593} = 16,852.$$

Электромагнитная постоянная времени роторной цепи и постоянная времени интегрирования контура регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя определяется по формулам (42) и (43) соответственно:

$$T_{\psi} = \frac{L_R}{R_R}, \quad (42)$$

$$T_{и\psi} = \frac{4K_{o\psi} T_{\mu} k_R R_R T_R}{K_{от}}. \quad (43)$$

$$T_{\psi} = \frac{0,312}{1,071} = 0,291$$

$$T_{и\psi} = \frac{4 \cdot 16,852 \cdot 0,002 \cdot 0,989 \cdot 1,071 \cdot 0,291}{0,676} = 0,062$$

Таким образом, был получен ПИ - регулятор потокосцепления.

2.1.5 Синтез контура регулирования скорости

Формирование задания по моментобразующей составляющей тока статора осуществляется в замкнутом контуре регулирования скорости электропривода.

Структурная схема контура скорости представлена на рисунке 13.

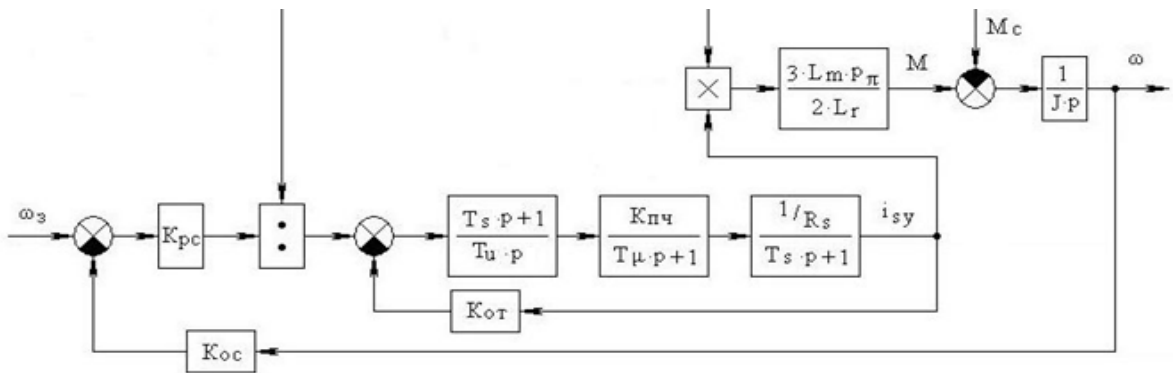


Рисунок 13 - Структурная схема контура регулирования скорости

При составлении передаточной функции регулятора скорости необходимо учитывать то, что регулятор скорости должен обеспечивать компенсацию влияния узла произведения при формировании электромагнитного момента асинхронного двигателя. Для этой цели по аналогии с системами двухзонного регулирования скорости двигателя постоянного тока на выходе РС должен быть включен блок деления. В этом случае передаточная функция регулятора и коэффициент обратной связи по скорости будут рассчитываться по формулам (44) и (45):

$$W_{pc} = \frac{1}{4T_{\mu}} \frac{2L_r J_{\Sigma} K_{от} \Psi}{3p_n L_m K_{ос}}, \quad (44)$$

$$K_{ос} = \frac{U_{ос}}{\omega_{max}}, \quad (45)$$

где J_{Σ} - суммарный момент инерции электропривода, кг·м²;

$K_{ос}$ - коэффициент обратной связи по скорости, В·с.

$$K_{ос} = \frac{10}{145,56} = 0,069$$

$$W_{pc} = \frac{1}{4 \cdot 0,002} \cdot \frac{2 \cdot 0,312 \cdot 1,034 \cdot 0,676 \cdot 0,593}{3 \cdot 4 \cdot 0,309 \cdot 0,069} = 127,29$$

Таким образом, был получен П регулятор скорости.

2.1.6 Синтез контура регулирования положения

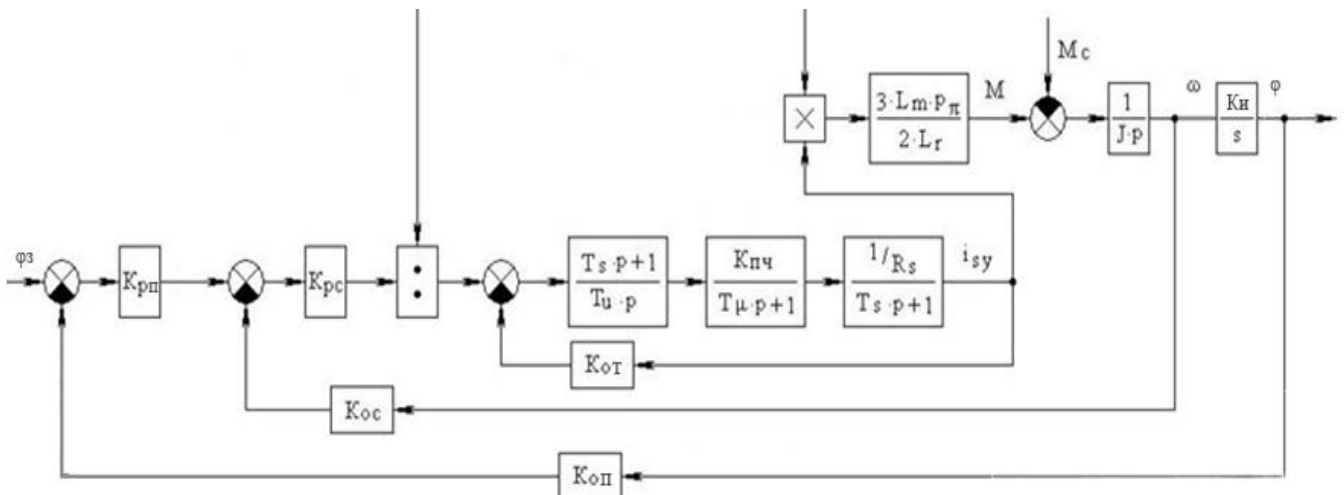


Рисунок 14 – Структурная схема контура регулирования положения.

Формирование задания по скорости электродвигателя осуществляется в замкнутом контуре регулирования положения электропривода. В качестве объекта регулирования положения примем систему регулирования скорости. Дополнив её интегрированием скорости ω для получения перемещения φ , введя обратную связь по положению с коэффициентом усиления $k_{о.п.}$ и включив на вход регулятора положения, получим трёхконтурную систему регулирования положения, структурная схема которой приведена на рисунке 14.

Передаточный коэффициент регулятора положения в случае больших перемещений рассчитывается по формуле (46):

$$K_{р.п.б.} = \frac{2 \cdot K_{ос} \cdot \epsilon_{макс}}{K_{о.п.} \cdot \omega_H \cdot K_{и}} \quad (46)$$

где $K_{o.п}$ – коэффициент обратной связи по положению,

$K_{и}$ – коэффициент интегрирования.

Коэффициент обратной связи по положению рассчитывается по формуле (47):

$$K_{o.п.} = \frac{U_{оп}}{\varphi_{макс}}. \quad (47)$$

$$K_{o.п.} = \frac{10}{15} = 0,666$$

Коэффициент интегрирования:

$$K_{и} = \frac{\Delta\varphi}{i_{ред} \cdot 6,28}. \quad (48)$$

где $\Delta\varphi$ – количество градусов, на которое поворачивается плита за 1 оборот вала редуктора.

$$K_{и} = \frac{0,5}{6,3 \cdot 6,28} = 0,013$$

Выбор коэффициента усиления регулятора положения по условию (46) позволяет получить удовлетворительное качество регулирования при задании перемещений, которым соответствует начальная скорость при торможении, равная $\omega_{ном}$. Однако при отработке перемещений, при которых начальная скорость при торможении оказывается меньше $\omega_{ном}$, процессы торможения сопровождаются дотягиванием, причем их длительность остается такой же, как и при отработке больших перемещений. В связи с этим для подобных электроприводов используют регулятор положения с параболической характеристикой.

Коэффициент регулятора положения в случае средних перемещений является

нелинейным и рассчитывается по формуле (49):

$$K_{p.п.с.} = K_{oc} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\max} \cdot \Delta\varphi}{K_{o.п.} K_{и}}} \quad (49)$$

Граница больших перемещений определяется по формуле (50):

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{K_{o.п.} \omega_H^2 K_{и}}{2\varepsilon_{\max}} \quad (50)$$

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{0,666 \cdot 145,56 \cdot 0,013}{2 \cdot 49,6} = 1,849$$

В ходе проведения моделирования было выявлено, что граница малых перемещений близка к нулю (0,014) и использование регулятора положения в случае малых перемещений добавляет дополнительное перерегулирование при торможении. В связи с этим, граница малых перемещений была принята за 0.

Частотный преобразователь Unidrive M700 имеет встроенный контроллер положения, настройка которого осуществляется через меню преобразователя или с помощью компьютера в программе CTSofT. Настройка контроллера положения осуществляется в меню 13. В нём можно выделить основные параметры, которые необходимо сконфигурировать для работы контроллера, а именно: источник задания в режиме контроллера, источник обратной связи в режиме контроллера обратная связь по скорости. Источником задания является ПЛК, с которого поступает значение необходимого количества градусов, на которое должны повернуться плиты. Источником обратной связи по положению является абсолютный энкодер, а источником обратной связи по скорости является инкрементальный энкодер. В результате настройки контроллера положения на его выходе будет формироваться задание на скорость электродвигателя привода разворота. Частичный вид настройки меню 13 отображен в приложении А.

2.1.7 Анализ динамических процессов

На основании математической модели, представленной в приложении А, было проведено моделирование переходных процессов электропривода с помощью программы Matlab Simulink в следующих режимах:

- Установка угла поворота плиты на $1,66^\circ$ (такой угол необходим при сканировании трубы диаметром 219 мм и шагом сканирования 20 мм);
- Установка угла поворота плиты в крайнее положение 15° .

Смоделированные переходные процессы, графики которых представлены в приложении А, показывают, что спроектированная система управления соответствует предъявляемым требованиям к электроприводу, время регулирования имеет допустимую величину.

Переходные процессы скорости и момента протекают оптимально, нелинейный регулятор положения работает правильно как в случае установки угла поворота в крайнее положение, так и в случае установки в рабочее положение, при котором угол поворота относительно мал. Это означает, что электропривод в этих контурах настроен правильно и отвечает основным требованиям к нему со стороны динамики.

2.2 Реализация HMI интерфейса для управления установкой

2.2.1 Выбор оборудования

Для реализации управления УЗК с помощью человеко-машинного интерфейса были выбраны следующие устройства:

1) CPU 314C-2 DP фирмы Siemens. CPU имеет интерфейсы связи MPI и Profibus. Имеются встроенные модули входов\выходов DI 24/DO 16, AI 5/AO 2, а также установлен дополнительный модуль DI 16x24V DC.

2) PC станция Simatic PC station с WinCC RT Professional с платой CP 5612.

Состав ПЛК и схема сетевых соединений представлены на рисунках 15 и 16 соответственно. Контроллер соединяется с преобразователями частоты (не показаны на схеме сетевых соединений) через Profibus и цифровые выходы.

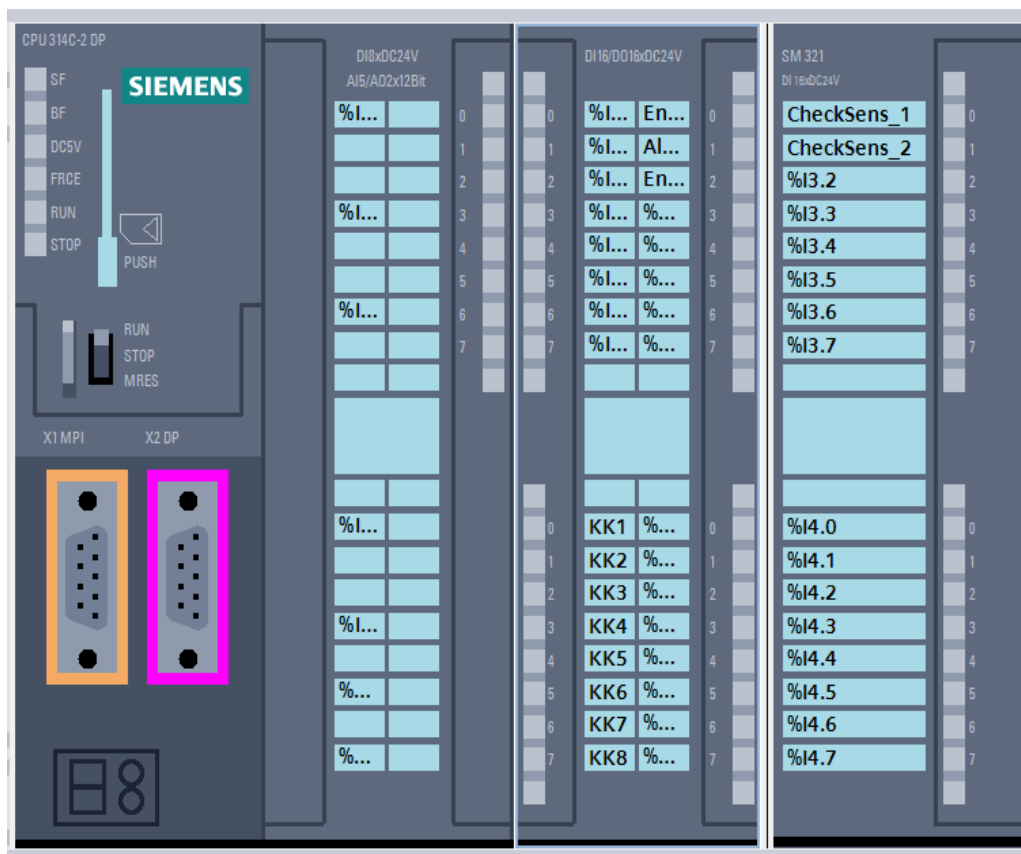


Рисунок 15 – Состав ПЛК

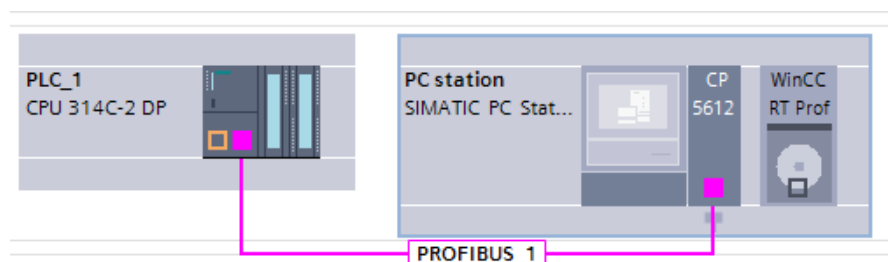


Рисунок 16 – Схема сетевых соединений

2.2.2 Таблица переменных

На рисунке 17 частично описаны переменные, которые используются для реализации работы программы управления.

Default tag table							
	Name ▲	Data type	Address	Retain	Visibl...	Acces...	Comment
1	Allow_to_work	Bool	%Q1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Разрешение работы на частотный преобразователь
2	Angle_equal	Bool	%M1.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1 если углы ~равны
3	Angle_sens_err	Bool	%I2.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ошибка энкодера привода УУП
4	Angle_sub	Real	%MD20		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Разница углов
5	Angle_tn_sens	Real	%MD12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Значение тангенса угла с датчика
6	CheckSens_1	Bool	%I3.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Лазерный датчик 1
7	CheckSens_2	Bool	%I3.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Лазерный датчик 2
8	Convert_to_BCD16	Word	%MW60		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Вспомогательная переменная
9	Convert_to_DInt	DInt	%MD66		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Вспомогательная переменная
10	Convert_x100	Real	%MD62		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Вспомогательная переменная
11	Diameter	Real	%MD4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Диаметр трубы
12	Diff	Int	%MW70		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Разница между расч. и реал. временем
13	Emergency_stop	Bool	%M3.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Аварийный останов
14	Engine_angle	Bool	%Q1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Двигатель привода установки угла поворота плиты
15	Engine_angle_work	Bool	%M3.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Запуск двигателя УУП
16	Engines_working	Bool	%Q1.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Сигнал работы двигателей кантователей
17	KK1	Bool	%I1.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
18	KK10	Bool	%I2.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
19	KK11	Bool	%I2.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
20	KK12	Bool	%I2.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
21	KK13	Bool	%I2.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле двигателя привода установки угла поворота плиты
22	KK2	Bool	%I1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
23	KK3	Bool	%I1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
24	KK4	Bool	%I1.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
25	KK5	Bool	%I1.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
26	KK6	Bool	%I1.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
27	KK7	Bool	%I1.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
28	KK8	Bool	%I1.7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
29	KK9	Bool	%I2.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Тепловое реле
30	Manualset	Bool	%M48.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ручная установка времени перемещения
31	Metal_err	Bool	%I2.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Обнаружен дефект
32	P	Real	%MD8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Шаг сканирования
33	PiDiameter	Real	%MD16		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	диаметр *pi
34	Pipe_position	Int	%MW44		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Позиция трубы
35	RPM	Int	%MW46		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	скорость двигателей кантователей
36	Start_rot_engine	Bool	%M3.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Запуск двигателей кантователей
37	Tag_4	Bool	%M48.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
38	Tag_5	Timer	%T1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
39	Time	Real	%MD50		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Расчетное время перемещения между датчиками
40	Time_counter	Word	%MW56		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Вспомогательная переменная для расчета time_signals

Рисунок 17 – Таблица переменных

2.2.3 Программа модели

Программа модели написана на языке LAD. Этот язык предназначен для программирования промышленных контроллеров. Синтаксис языка удобен для замены логических схем, выполненных на релейной технике. Ориентирован на инженеров по автоматизации, работающих на промышленных предприятиях. Обеспечивает наглядный интерфейс логики работы контроллера, облегчающий не только задачи собственно программирования и ввода в эксплуатацию, но и быстрый поиск неполадок в подключаемом к контроллеру оборудовании.

Программа на языке релейной логики имеет наглядный и интуитивно понятный

инженерам-электрикам графический интерфейс, представляющий логические операции, как электрическую цепь с замкнутыми и разомкнутыми контактами. Протекание или отсутствие тока в этой цепи соответствует результату логической операции (истина — если ток течёт; ложь — если ток не течёт).

Основными элементами языка являются контакты, которые можно образно уподобить паре контактов реле или кнопки. Пара контактов отождествляется с логической переменной, а состояние этой пары — со значением переменной.

Различаются нормально замкнутые и нормально разомкнутые контактные элементы, которые можно сопоставить с нормально замкнутыми и нормально разомкнутыми кнопками в электрических цепях.

На рисунках ниже представлена программа, с помощью которой реализуется логика управления устройствами.

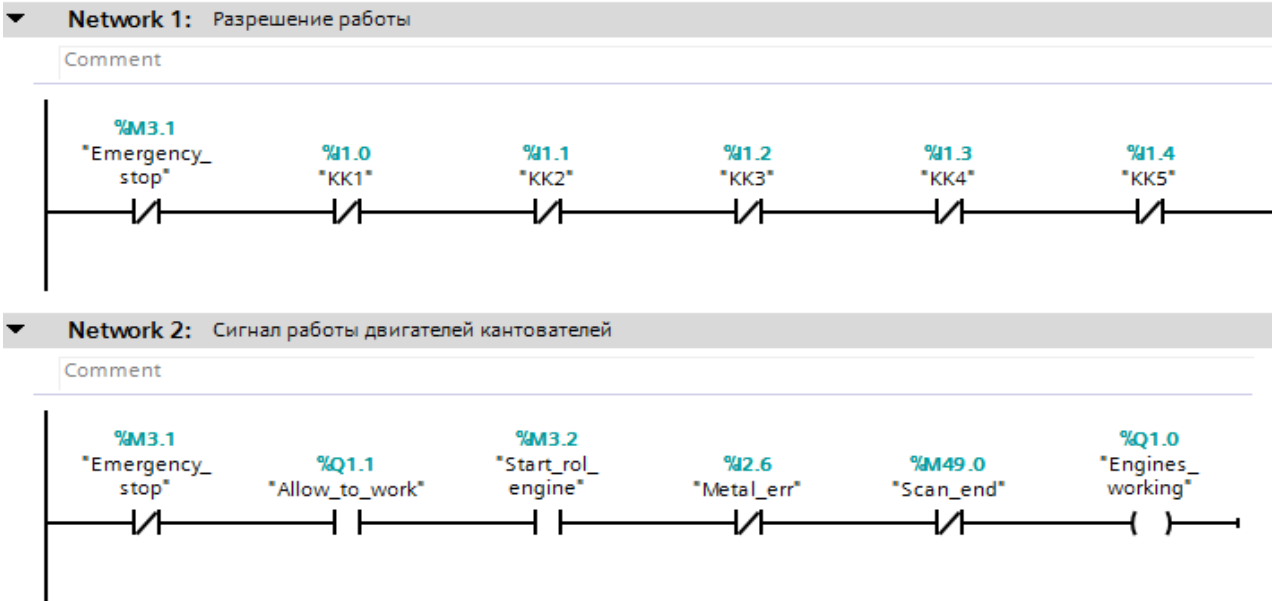


Рисунок 18 – Разрешение работы, сигнал работы двигателей кантователей



Рисунок 19 – Продолжение Network 1

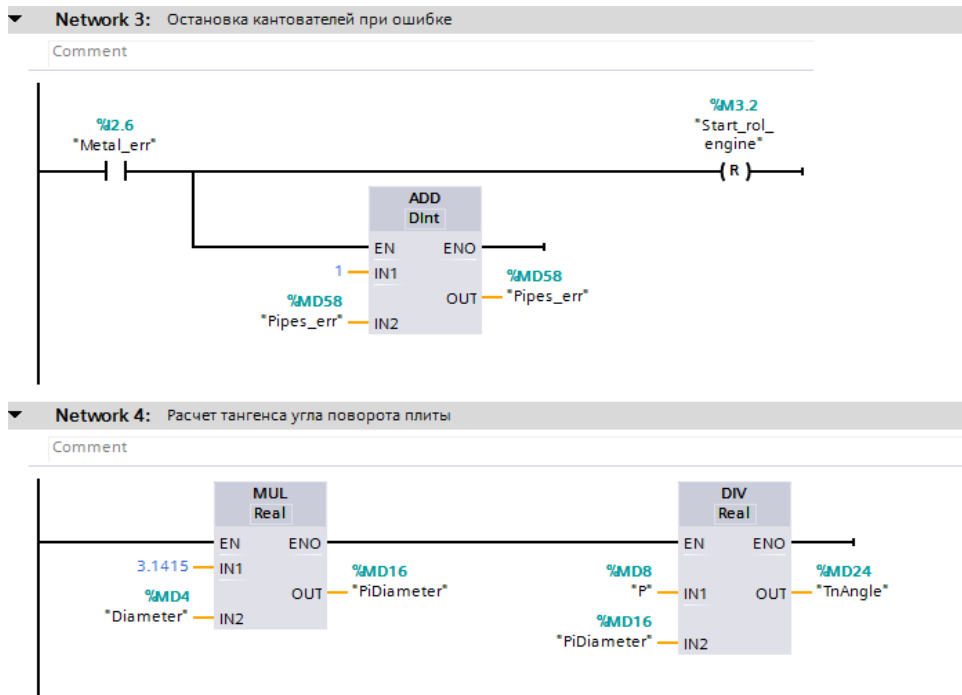


Рисунок 20 – Останов кантователей при ошибке, расчет тангенса угла поворота ПЛИТЫ

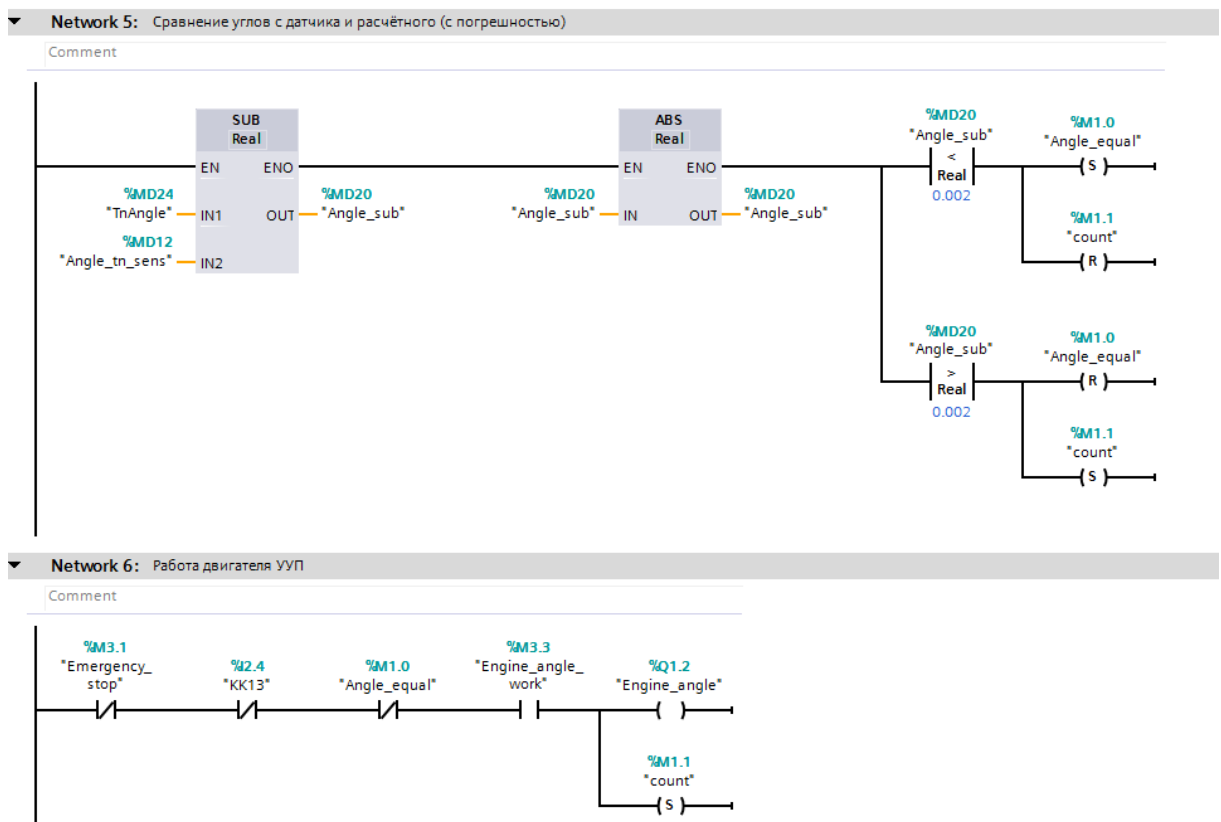


Рисунок 21 – Сравнение расчётного угла с информацией с энкодера

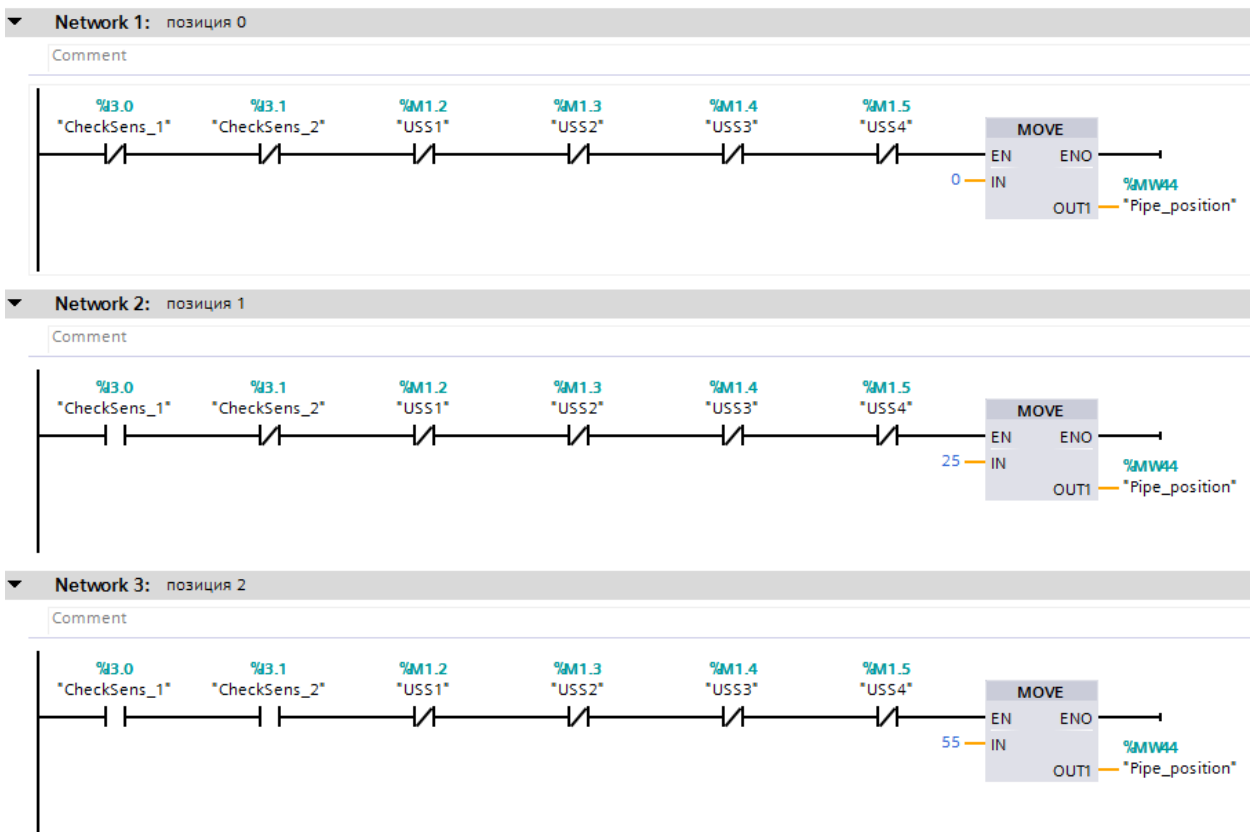


Рисунок 22 – Реализация анимации перемещения трубы

Анимация перемещения для остальных позиций реализована аналогичным образом, с помощью записи положения трубы в тег MW54 в зависимости от сигналов с датчиков.

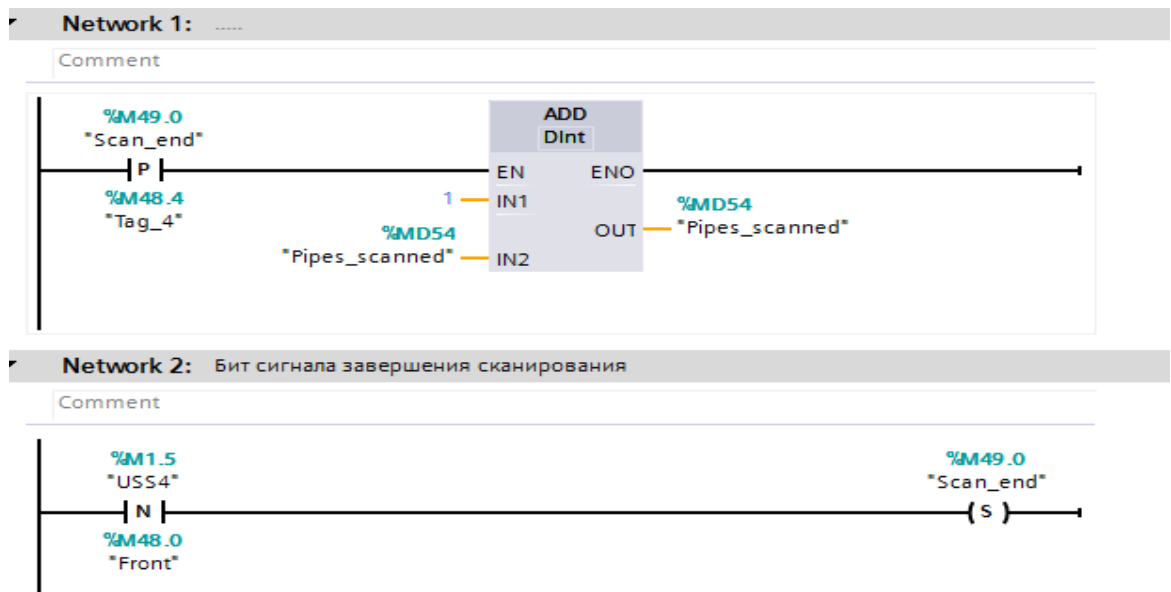


Рисунок 23 – Окончание сканирования

Функции расчета времени перемещения трубы между лазерными датчиками и корректировки угла поворота плиты на основе информации с датчиков были выполнены в виде скрипта с помощью языка программирования Visual Basic. Коды представлены на рисунках ниже.

```

3 Sub Angle_check()
4 Dim n1,D1,D2,n2,L1,T1,T2
5 Dim T2_str
6 n1=SmartTags("RPM(1)"/11.22
7 D1= 400.0
8 D2=SmartTags("Diameter(1)")
9 n2=n1*D1/D2
10 n2=n2/60
11 L1=SmartTags("P")
12 T1=1/n2
13 T2=40*T1/L1
14 SmartTags("Time")=T2
15 End Sub

```

Рисунок 24 – Скрипт, рассчитывающий время перемещения трубы между лазерными датчиками

```

4 Sub Angle_correction()
5 Dim n1,D1,D2,n2,L1,T1,T2,Angle_tn,Angle_tn_diff
6 n1=SmartTags("RPM(1)"/11.22
7 D1= 400.0
8 D2=SmartTags("Diameter(1)")
9 n2=n1*D1/D2
10 n2=n2/60
11 T1=1/n2
12 T2=SmartTags("Time_signals")/100
13 L1=(40/T2)*T1
14 Angle_tn=L1/(3.1415*D2)
15 If Angle_tn < SmartTags("TnAngle") Then
16     SmartTags("Angle_tn_sens")=SmartTags("Angle_tn_sens")+ (SmartTags("TnAngle")-Angle_tn)
17 ElseIf Angle_tn > SmartTags("TnAngle") Then
18     SmartTags("Angle_tn_sens")=SmartTags("Angle_tn_sens")- (Angle_tn-SmartTags("TnAngle"))
19 End If
20 End Sub

```

Рисунок 25 – Скрипт, реализующий корректировку угла поворота плиты

2.2.4 Описание компонентов на основном экране НМІ

На рисунке 26 показаны все компоненты экрана НМІ. На экране присутствуют следующие группы компонентов: блок задания, блок индикации состояния, область с динамическим отображением положения трубы на кантующих роликах,

кнопки управления приводом кантующих роликов, поля ввода/вывода технической информации, окно предупреждений и ошибок (alarm control).

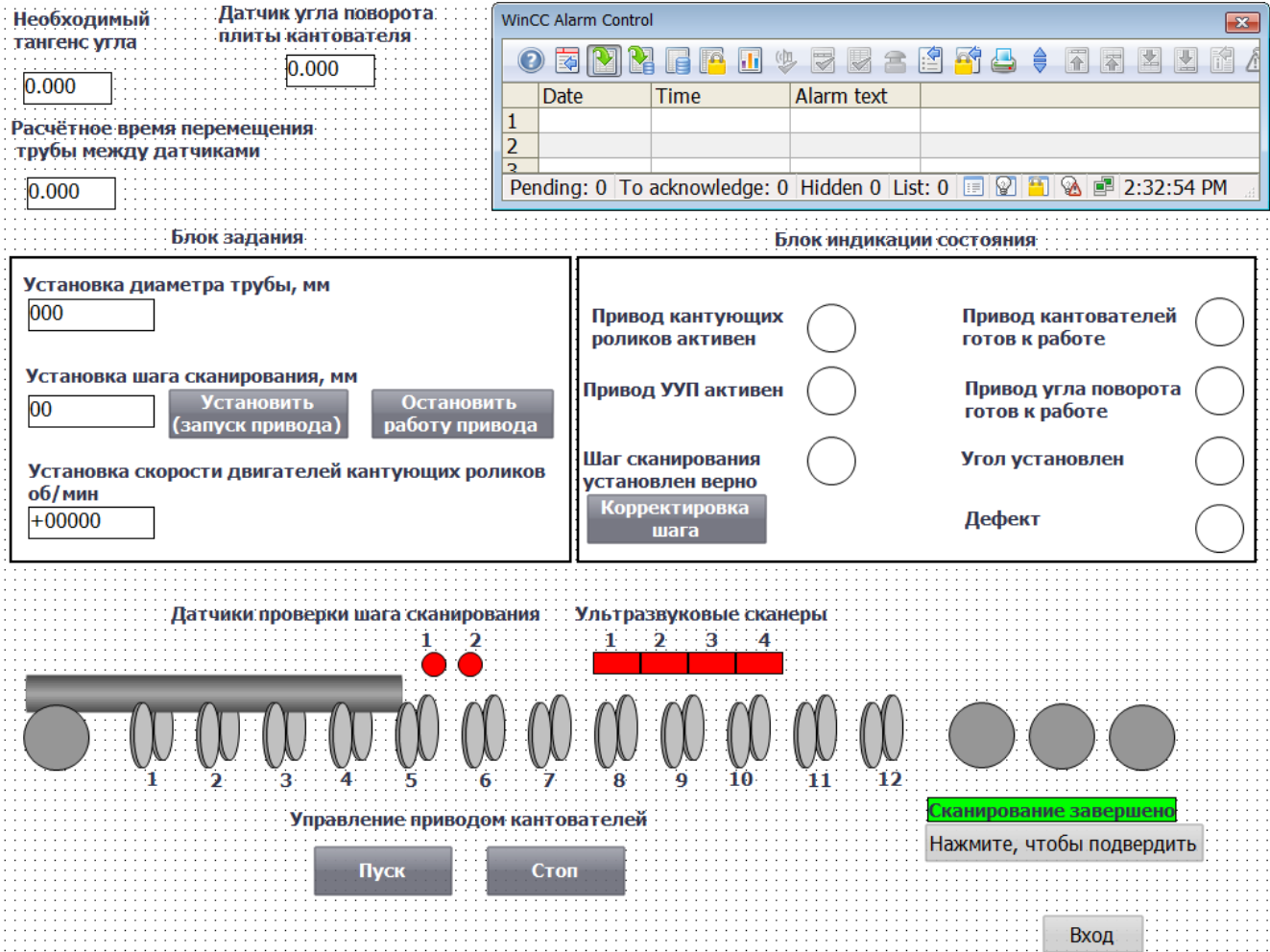


Рисунок 26 – Основной экран НМІ

Блок задания позволяет задавать: диаметр трубы, шаг сканирования, скорость электродвигателей привода кантующих роликов. Блок индикации состояния отображает информацию о приводах, установке угла поворота, наличии дефекта в трубе путем изменения цвета индикатора с белого на зеленый (красный для индикатора наличия дефекта). Кнопка «корректировка шага» запускает скрипт, который корректирует неправильно установленный шаг сканирования, используя информацию с лазерных датчиков.

Ниже блоков отображается текущее положение трубы на кантующих роликах

относительно датчиков. Изменение цвета лазерных датчиков проверки шага сканирования с красного на зеленый означает, чтобы труба прошла через лазерный луч, а при изменении цвета ультразвуковых сканеров, что акустический контакт между трубой и датчиком установлен. Транспортные роляганги, на которых труба перемещается к кантовальным роликам и транспортируется после прохождения по ним, показаны серыми окружностями.

Поля вывода в верхнем углу экрана отображают техническую информацию, которая используется в процессе работы. Поле ввода «датчик угла поворота плиты кантователя» симулирует сигнал энкодера, установленного на поворотной плите кантователя. Справа от полей ввода\вывода находится окно, в котором выводятся предупреждения и ошибки в работе оборудования.

В правом нижнем углу экрана присутствует кнопка «вход», при нажатии на которую можно войти под учетной записью оператора или наблюдателя.

2.2.5 Список выводимых предупреждений на экран НМІ

На рисунке 28 отображен список возможных предупреждений, которые могут появиться на экране в ходе работы. В графе «alarm text» можно увидеть описание предупреждения, а в «trigger tag» тег, вызывающий его срабатывание.

ID	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Trigge..	Acknowledg...	Ackn...	Single ackno...	Alarm annun...
1	Привод установки шага сканирования не готов к работе	Errors	KK13	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Не работает датчик угла поворота	Errors	Angle_sens_err	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Сработало тепловое реле двигателя № 1 кантователя	Errors	KK1	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Сработало тепловое реле двигателя № 2 кантователя	Errors	KK2	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Сработало тепловое реле двигателя № 3 кантователя	Errors	KK3	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Сработало тепловое реле двигателя № 4 кантователя	Errors	KK4	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Сработало тепловое реле двигателя № 5 кантователя	Errors	KK5	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Сработало тепловое реле двигателя № 6 кантователя	Errors	KK6	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Сработало тепловое реле двигателя № 7 кантователя	Errors	KK7	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Сработало тепловое реле двигателя № 8 кантователя	Errors	KK8	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Сработало тепловое реле двигателя № 9 кантователя	Errors	KK9	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Сработало тепловое реле двигателя № 10 кантователя	Errors	KK10	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Сработало тепловое реле двигателя № 11 кантователя	Errors	KK11	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Сработало тепловое реле двигателя № 12 кантователя	Errors	KK12	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Неисправность ультразвукового датчика №1	Errors	USS1_OK	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Неисправность ультразвукового датчика №2	Errors	USS2_OK	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	Неисправность ультразвукового датчика №3	Errors	USS3_OK	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	Неисправность ультразвукового датчика №4	Errors	USS4_OK	0	<No tag>	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рисунок 27 – Описание предупреждений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была рассмотрена модернизация установки ультразвукового контроля, а именно – повышение уровня автоматизации процесса сканирования.

При проведении анализа технологических режимов сформулированы основные требования, предъявляемые к электроприводу механизма разворота плит, на которых располагаются кантующие ролики.

Для модернизации электропривода разворота был выбран и просчитан по условию перегрева и перегрузки асинхронный электродвигатель А90L4.

С учетом номинальных данных двигателя и требований технологического процесса был выбран преобразователь Control Techniques Unidrive M700. Рассмотрены преимущества, функции и особенности преобразователя частоты.

С помощью стандартных методик расчёта моделей электропривода была рассчитана структурная схема системы регулирования положения на основе электропривода переменного тока по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель и реализована математическая модель. В результате моделирования был сделан вывод о том, что рассчитанная система полностью выполняет все требования, предъявляемые к электроприводу.

В среде разработки программного обеспечения TIA Portal был разработан человеко-машинный интерфейс (HMI) для управления приводами установки, а также получения некоторой технологической информации о ходе сканирования трубы и состоянии оборудования. В ходе разработки были выбраны необходимые датчики и энкодеры для функционирования HMI и приводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Седлер М.Х. Повышение качества контроля труб путем разработки установки автоматизированного ультразвукового контроля / М.Х. Седлер, Е.А. Карабасов // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 988–994.

2 Иванов А.Н. Выбор оптимального шага сканирования по спирали при автоматизированном ультразвуковом контроле труб на ОАО «Тагмет» / А.Н. Иванов, В.И. Тимошенко // Известия ЮФУ. Технические науки – 2015 – № 5. – С. 56 – 66.

3 Пат. 2397491 Российская Федерация, МПК G01N 29/26. Способ ультразвукового контроля цилиндрических изделий, в том числе труб, и устройство для его осуществления/ Криков А.В, Бритвин В.А. – № 2009115607/28; заявл. 27.04.2009; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23. – 18 с.

4 Лукин А.Н. Моделирование электроприводов переменного тока: учебное пособие / А.Н. Лукин, А. В. Белый. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – 67с.

5 Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. – URL: http://www.bivolt.ru/katalog/A90L4_2,2kVt_1500ob/min.html (дата обращения: 18.01.2018).

6 Преобразователь частоты Unidrive M700. - URL: <http://www.privodsys.ru/katalog/unidrive-m/preobrazovatel-chastoty-emerson-unidrive-m700/> (дата обращения: 18.01.2018).

7 Принцип работы абсолютного энкодера. – URL: <http://megasensor.com/products/princip-raboty-absolyutnogo-enkodera/> (дата обращения 18.01.2018).

8 Принцип работы инкрементального энкодера. – URL: <http://megasensor.com/products/princip-raboty-inkrementalnogo-enkodera/> (дата обращения 18.01.2018).

9 Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.

10 Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов / В.И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Схемы и диаграммы

Продолжение приложения А Схемы и диаграммы

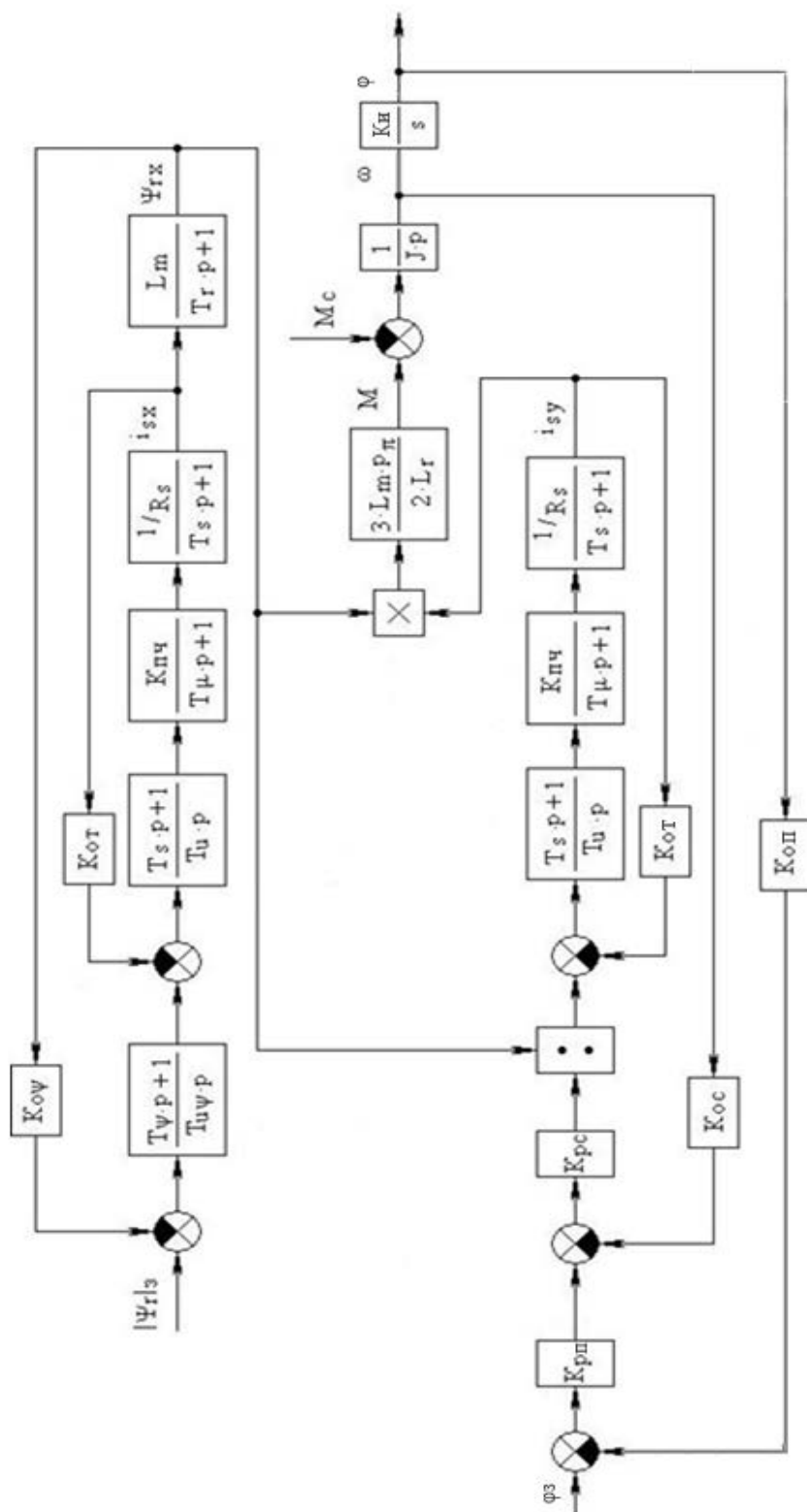


Рисунок А.1 – Структурная схема системы регулирования угла поворота

Продолжение приложения А Схемы и диаграммы

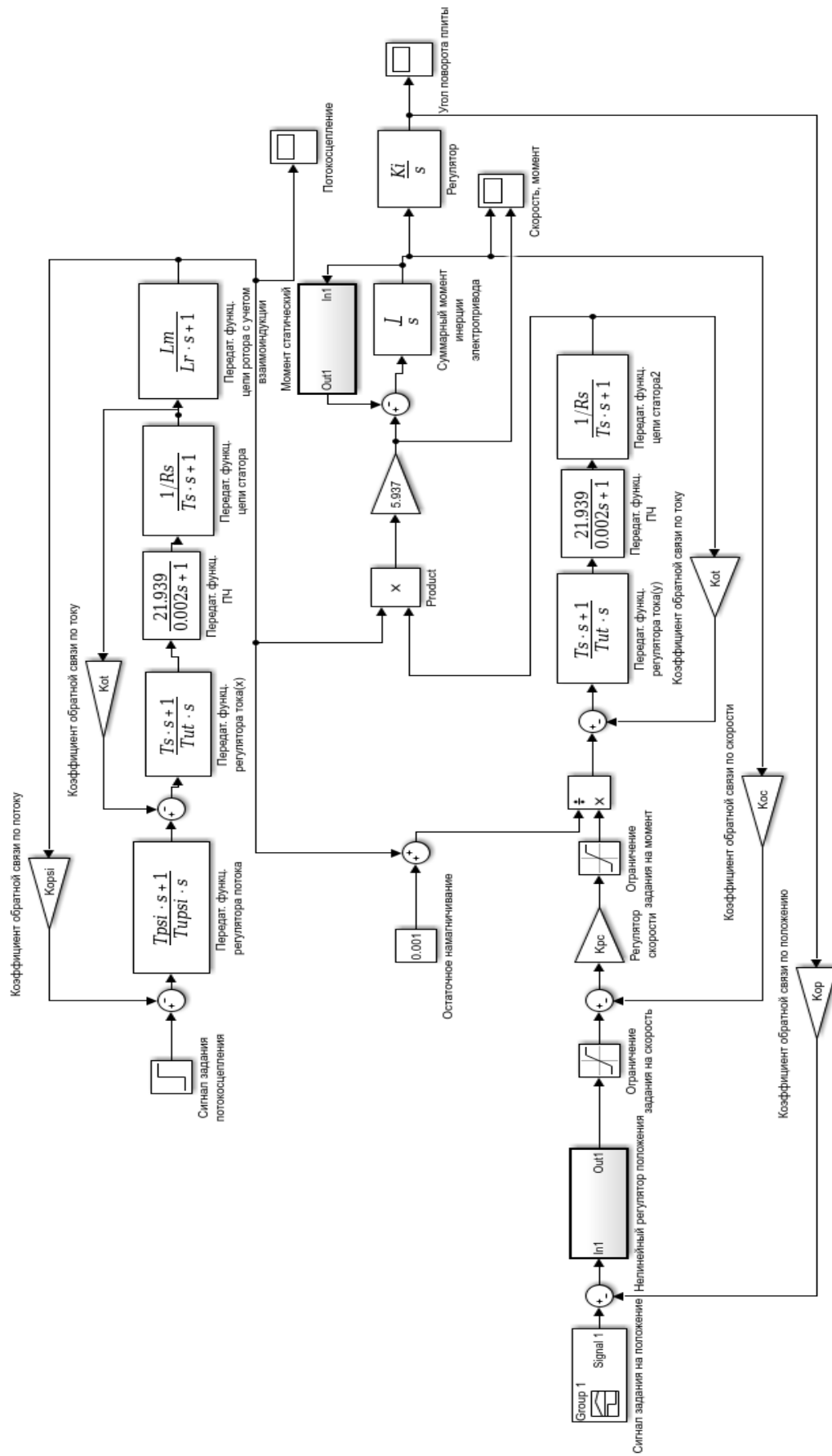


Рисунок А.2 – Математическая модель системы регулирования угла поворота плит

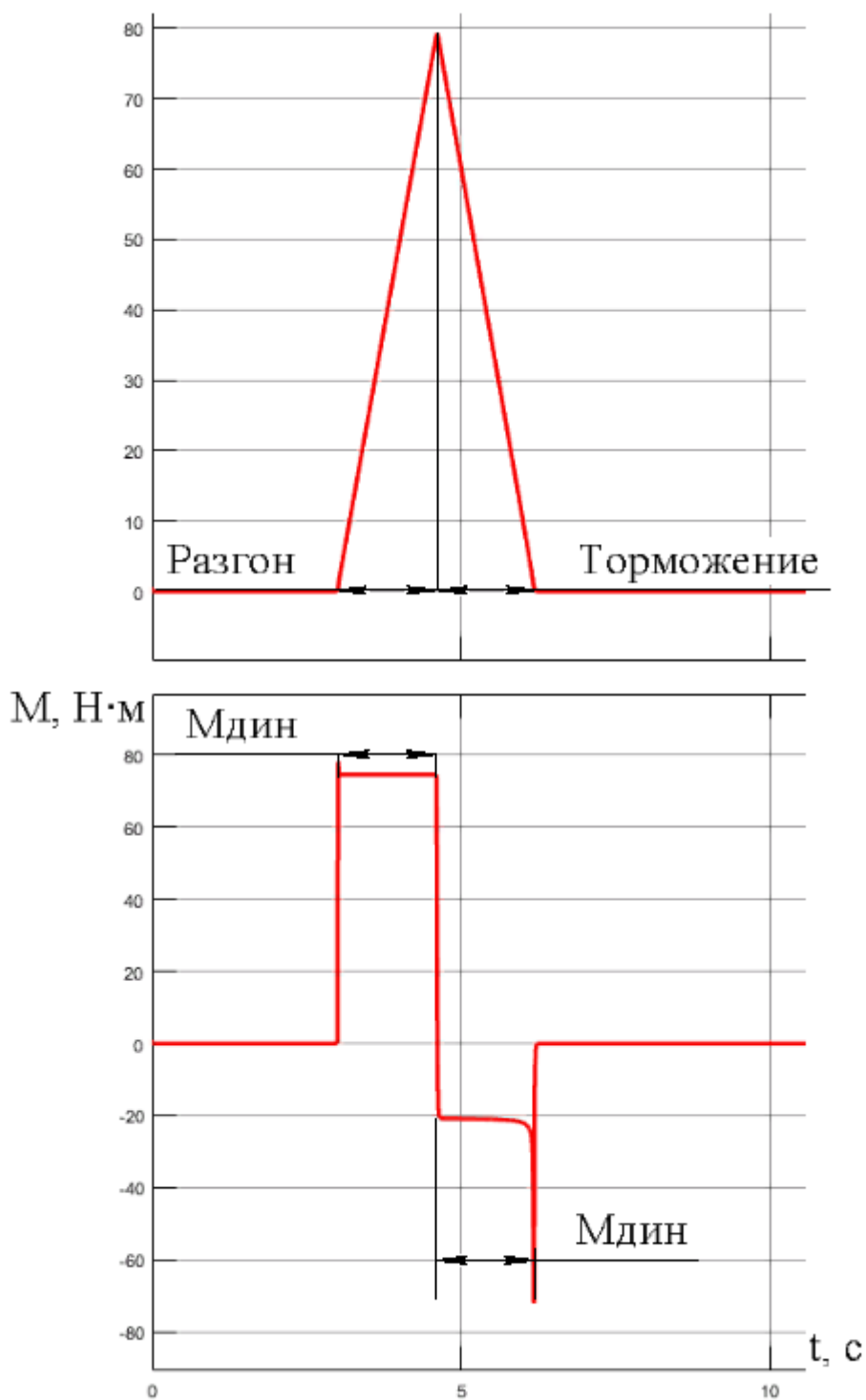


Рисунок А.3 – График изменения скорости и момента на валу двигателя при установке угла поворота 1.66° .

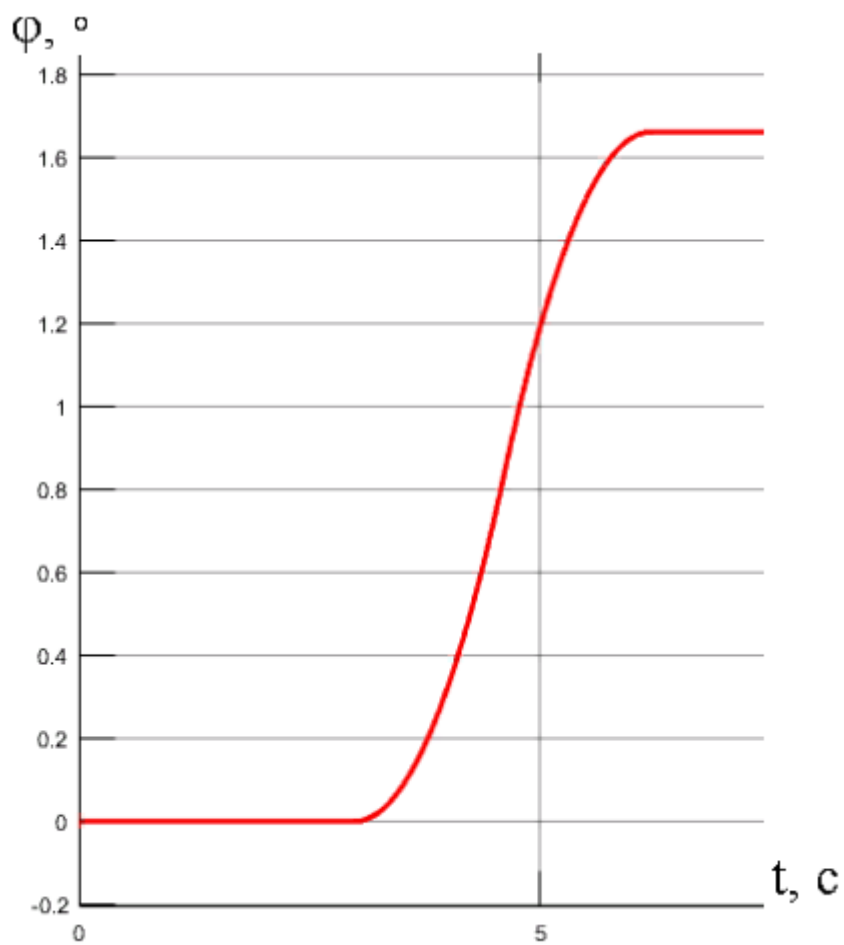


Рисунок А.4 – График изменения угла поворота плиты от 0 до 1.66° .

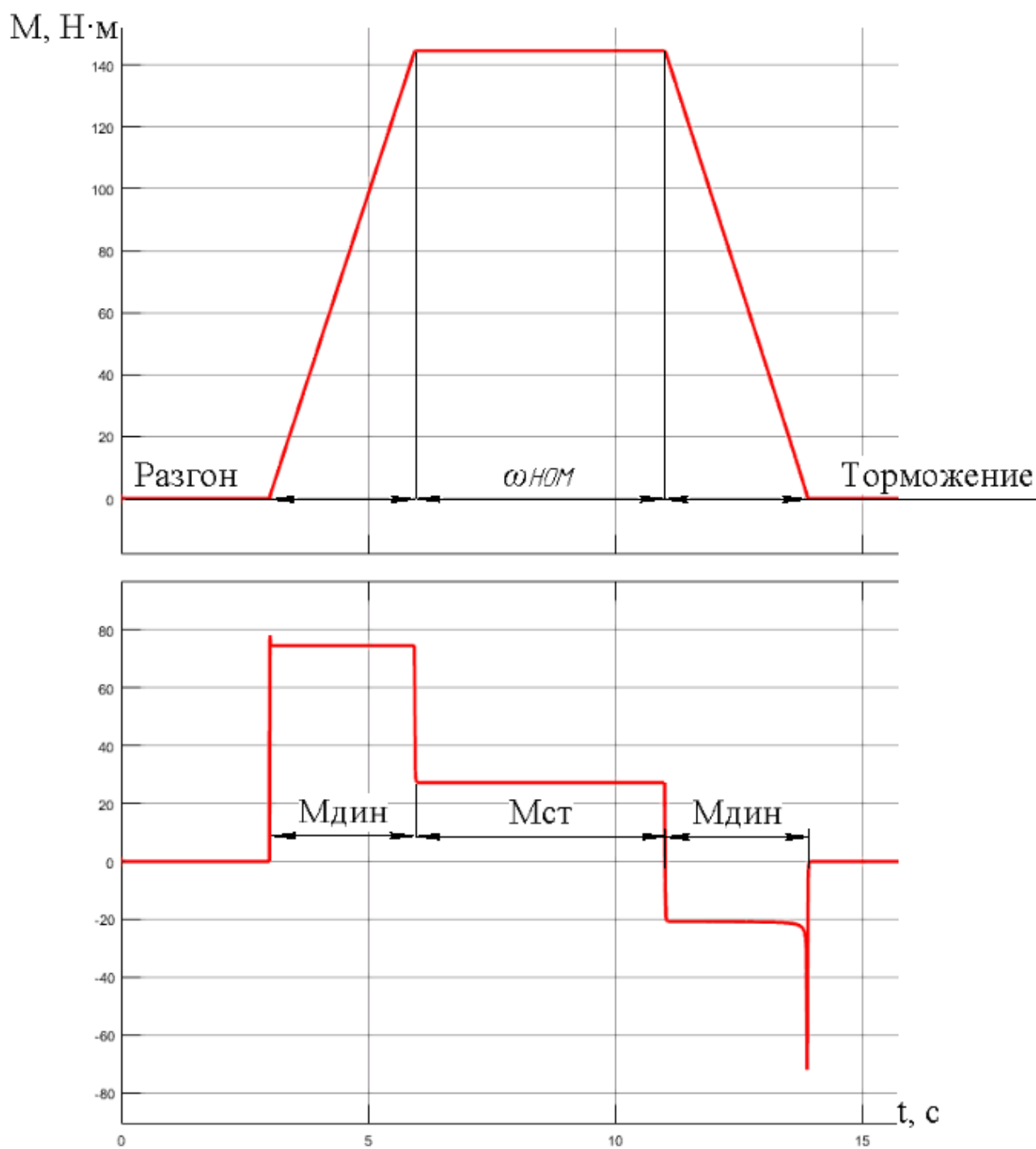


Рисунок А.5 – График изменения скорости и момента на валу двигателя при установке угла поворота 15°.

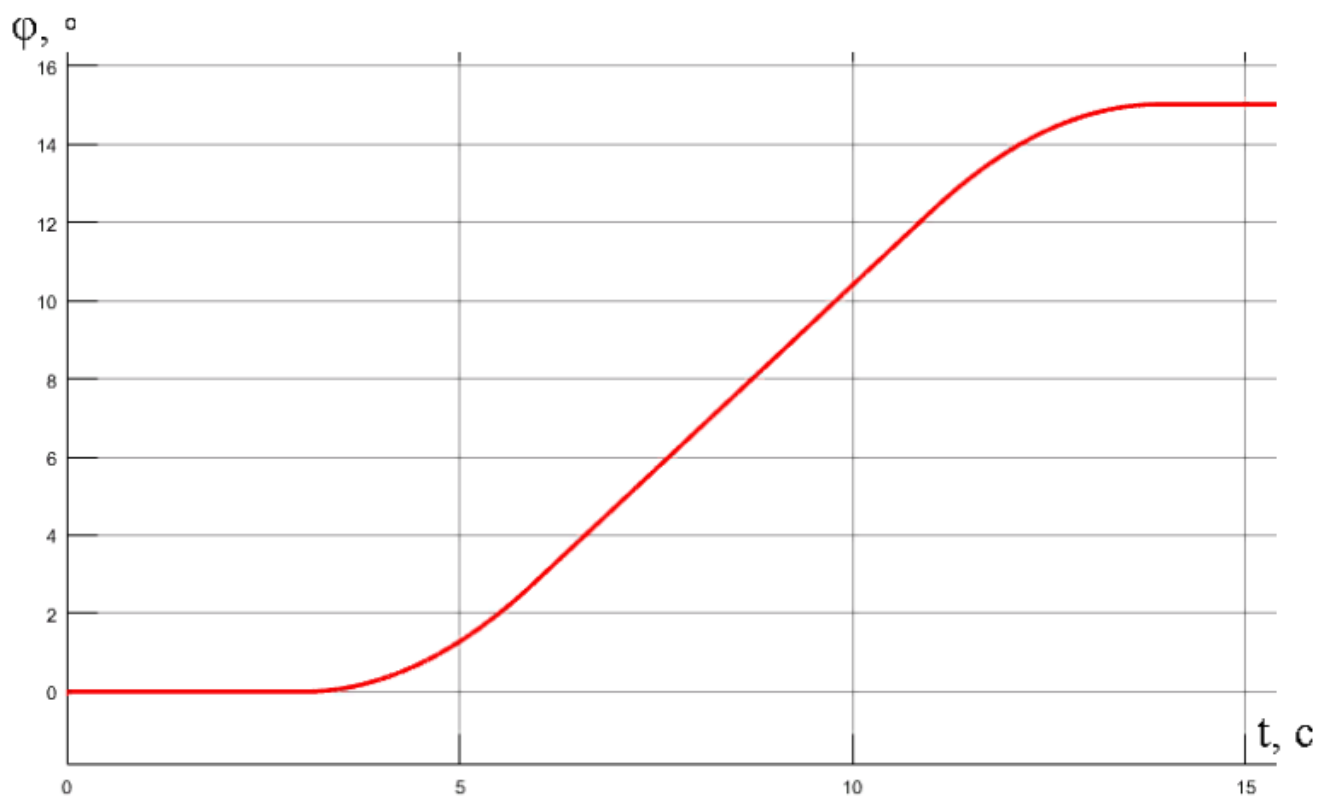


Рисунок А.6 – График изменения угла поворота плиты от 0 до 15°.

Продолжение приложения А Схемы и диаграммы

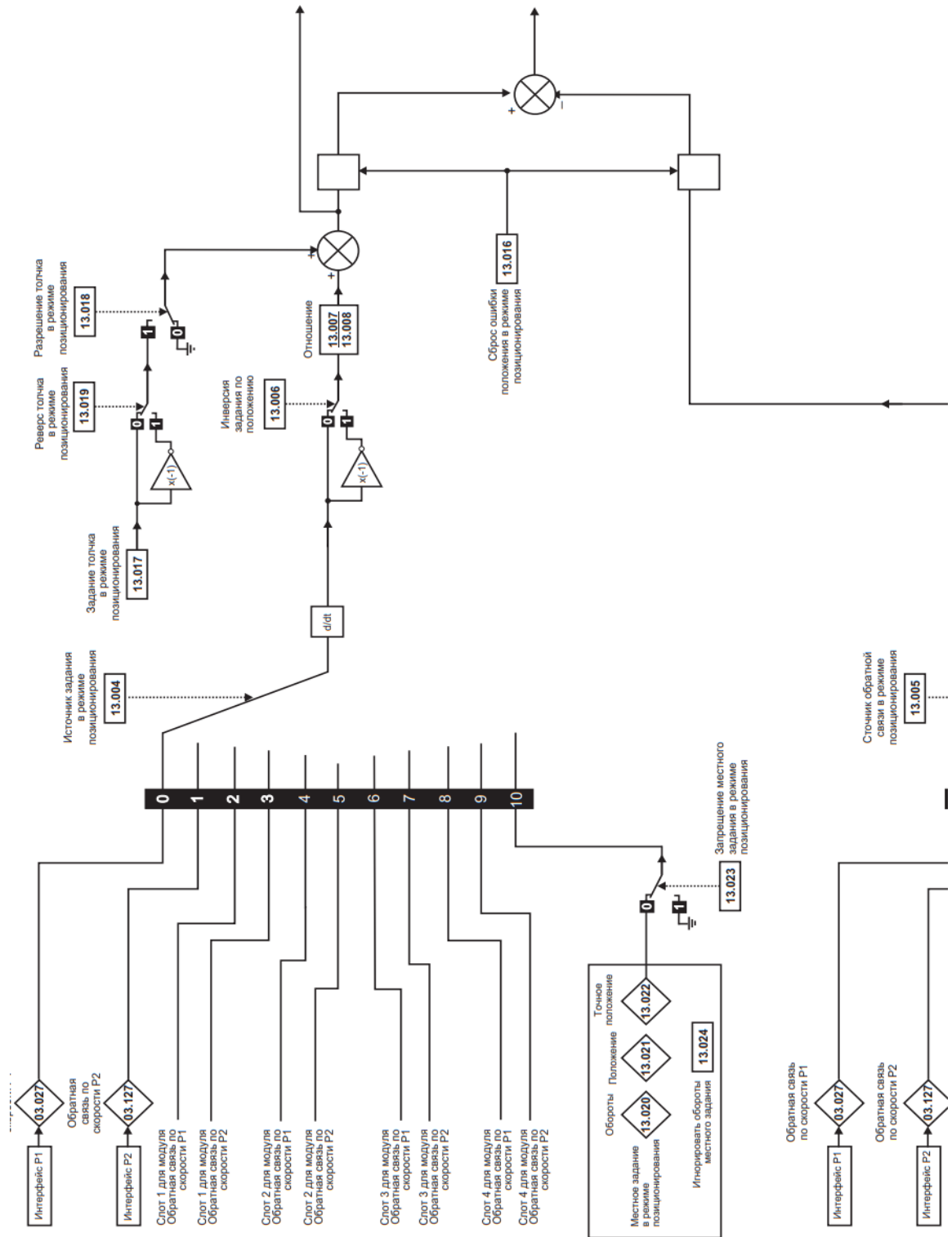


Рисунок А.7 – Меню 13 ПЧ Unidrive M700, в котором производится настройка контроллера положения