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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

_____2019 г.

РЕКОНСТРУКЦИЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ МАШИНЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА ФАСОВКИ МЯГКОЙ УПАКОВКИ ООО «РЕСУРС»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ – 15.03.06.2019.114.ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер
Преподаватель
О. А. Гасиярова.
_____2019 г.

Руководитель работы
Доцентр, к.т.н.
В. Р. Гасияров..
_____2019 г.

Ст. преподаватель
С. С. Воронин
_____2019 г.

Автор работы
студент группы П-456
Илья Алексеевич Выскарев
_____2019г.

Челябинск, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 8

1.1 Характеристика участка фасовки в мягкую упаковку цеха фасовки ООО «РЕСУРС» 8

1.1.1 Технологический процесс участка фасовки в мягкую упаковку 8

1.1.2 Описание технологического процесса работы механизма 10

1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма 12

1.3 Требования к приводам и системе автоматизации 15

1.4 Выбор системы привода 17

1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы 18

1.5.1 Выбор дополнительного оборудования 27

1.6 Выбор основного силового оборудования 29

1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств 32

2 РАЗРАБОТКА САУ 34

2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации 34

2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат 36

2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата 41

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат 43

2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода 44

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ 54

3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции 54

3.2 Расчет производственной программы цеха 55

3.3 Расчет сметы капитальных затрат 60

3.4 Расчет РСЭО 62

3.5 Расчет затрат на материалы и оплату труда со страховыми отчислениями 64

3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности..... 65

3.7 Расчет срока окупаемости проекта..... 67

3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчетов 67

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 69

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 70

АННОТАЦИЯ

Выскарев И.А. Реконструкция мехатронной системы перемещения готовой продукции машины контроля состояния участка фасовки мягкой упаковки ООО «Ресурс» — Челябинск: ЮУрГУ, П-456, 71 с., 14 илл., 17 табл., библиогр. список – 25 наим.

Целью выполнения данной выпускной квалификационной работы (ВКР) являлась реконструкция системы перемещения готовой продукции по двум исполнительным механизмам агрегата – машины контроля состояния – приводным роликовым конвейерам, перемещение одного из которых в пространстве осуществляется пневмоприводом.

В ходе выполнения ВКР была собрана характеристика предприятия и подразделения, реконструкция оборудования которого заявлена в теме, подробно рассмотрен технологический процесс фасовки готовой продукции в мягкую упаковку, выбрана система приводов и сопутствующего оборудования и проведена его проверка на возможность соответствия технологическим и техническим требованиям, выдвигаемым сообразно технологическому процессу.

Разработана система автоматического управления (САУ), финальным этапом которой является структурная схема с последующим моделированием в программной среде Matlab Simulink типовых режимов работы двух сконструированных электроприводов для проведения диагностики поведения оборудования, подвергаемого той или иной нагрузке, в реальных условиях.

Проведены технико-экономические расчеты для оценки эффективности внедрения капиталовложений на реконструкцию рассматриваемого агрегата в виде срока окупаемости разрабатываемого проекта.

ВВЕДЕНИЕ

Мехатронной системой принято называть комплекс электромеханических, гидравлических и пневматических элементов, обменивающихся между собой информацией о протекании технологического процесса, объединенных под эгидой общей системы автоматического управления.

При использовании мехатронных систем в производстве, для обеспечения выполнения всех требуемых показателей качества необходимо проводить подробный анализ технологического процесса с сопутствующим подбором необходимого основного (исполнительного), силового (энергетического) и дополнительного (контрольно-измерительного и управляющего) оборудования, из синергии которых и складывается рабочий процесс всей системы.

Процесс фасовки готовой продукции (предварительно обработанной крупы для пищевого потребления) включает в себя три основных этапа:

1) Фасовка продукции в индивидуальную упаковку (брикеты);

2) Формирование групповой упаковки (стяжки);

3) Контроль состояния (отбраковка) произведенной продукции.

Машина контроля состояния – реконструируемый узел фасовочной линии в мягкую упаковку – финальная контрольная точка в рамках технологического процесса фасовки. Два исполнительных механизма – приводных роликовых конвейера, расположенных ортогонально друг к другу, осуществляют транспортировку стяжек групповой упаковки в зависимости от сигналов с датчиков контроля состояния стяжек. Режимы работы электроприводов в ходе выполнения выпускной работы получают возможность регулировки в автоматическом режиме в зависимости от задания на производство продукции определенного формата.

Для обеспечения возможности регулировки режимов работы оборудования необходимо разработать систему автоматического управления технологическим процессом (САУ), в задачи которой входит контроль регулирования технологических координат реконструируемого оборудования, в данном случае –

угловых скоростей вращения подающего и отводящего роликовых транспортеров, быстродействие которых существенно сказывается на ходе выполнения технологического процесса фасовки.

Заключительным этапом реконструкции служит проведение технико-экономических расчетов, дающих детальное обоснование целесообразности вмешательства в технологический процесс для улучшения показателей качества.

Для достижения необходимого эффекта от реконструкции, цели работы были сформулированы следующим образом:

- Провести анализ технологического процесса и совершить выбор основного оборудования для реконструируемого агрегата;
- Разработать систему автоматического управления технологическим процессом;
- Провести технико-экономические расчеты с выведением срока окупаемости проекта по реконструкции.

Для достижения сформулированных целей, были поставлены следующие основные задачи:

- Описание технологического процесса работы механизма;
- Формирование требований к системе приводов и автоматизации;
- Выбор системы приводов с подбором сопутствующего оборудования;
- Разработка архитектуры системы автоматизации с последующим выбором программируемого логического контроллера, осуществляющего управление системой автоматического регулирования сообразно с показателями контрольно-измерительных прибора (датчиков);
- Разработка и моделирование структурной схемы автоматизации, детальная проработка типовых режимов работы выбранных приводов;
- Расчет производственной программы, долю в которую вкладывает механизм, составление сметы капитальных затрат на реконструкцию, произведение оценки эффективности капиталовложений на основании остальных технико-экономических расчетов.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика участка фасовки в мягкую упаковку цеха фасовки ООО «РЕСУРС»

Участок фасовки в мягкую упаковку представляет собой конвейерную зону, осуществляющую формирование, транспортировку и выгрузку продукции, поступающей из нескольких машин. Фасовочный цех ООО «Ресурс» имеет оборудование, предназначенное для работы с различными форматами продукции, отвечающими всем современным стандартам качества и предрасполагающими к себе различные группы потребителей [1]. Несмотря на то, что основное оборудование цеха необходимо преимущественно для работы с твердой упаковкой продукции, текущие временные реалии показывают, что разносторонне направленное производство с куда большей уверенностью может обладать высокой конкурентоспособностью на рынке.

Участок состоит из следующих зон: оборудование фасовки продукции в индивидуальную упаковку, первичного формирования групповой упаковки, термотоннели, зоны отбраковки, погрузки готовой продукции.

1.1.1 Технологический процесс участка фасовки в мягкую упаковку

Участок фасовки готовой продукции в мягкую упаковку начинается с устройств фасовки продукции в индивидуальную упаковку. Подработанная крупа, поступающая по автоматическим транспортным линиям к аппаратам, предварительно запасается в «бункерах», оборудованных датчиками контроля наличия продукта, откуда подается порционно в индивидуальную упаковку, создающуюся на базе устройства фасовки – вертикально-упаковочной машины Бестром «Б-220/Б-202» [2]. При помощи подающего устройства, упаковка из вида «рулон» принимает вид «брикет», двигаясь по направляющим посредством

ременной передачи и спаиваясь в нужных местах под воздействием нагревательного элемента, после чего пневматическим резаком делится на равные по величине части.

На этом же устройстве происходит нанесение индивидуальной маркировки при помощи термотрансферного принтера Markem-Image «SmartDate X40» [3]. Промаркированные и сформированные брикеты с готовой продукцией отправляются на формирователь групповой упаковки посредством барабанного транспортера.

Подаваемые под действием силы тяжести брикеты индивидуальной упаковки движутся по транспортеру барабанного типа – брикетеру Бестром «Б-60» [2], перемещающего брикеты путем вращения вокруг вертикальной оси, откуда попадают на участок предварительного формирования групповой упаковки. На нем брикеты движутся по наклонному пластинчатому конвейеру, затем изменяют свое направление движения под воздействием пневмоцилиндра, отправляющего брикеты в зону перед термотоннелем – на рукавно-оберточную машину Бестром «Б-3600» [2], где в зависимости от задания на партию продукции брикеты формируются в один «блок», оборачиваемый плотной термоусадочной упаковочной пленкой – от шести до двенадцати брикетов на один блок.

Движущиеся по рольгангу блоки продукции, предварительно обернутые термоусадочной пленкой, попадают в термотоннель Ulma «TR 65*100 (H-400)» [4], окончательно формирующий групповую упаковку для блока готовой продукции.

На выходе из термотоннеля сформированные блоки готовой продукции, движущиеся по разветвленной системе роликовых приводов, подвергаются контролю целостности групповой упаковки – каждый блок проходит проверку несколькими датчиками. При поступлении из машины товара с цельной упаковкой роликовый привод включается в прямом направлении, в противном случае, в обратном направлении. Бракованные групповые упаковки отправляются на переформирование, цельные – проходят маркировку аппликатором Markem-

Image 2200 [3] и отправляются в зону паллетирования по горизонтальному пластинчатому конвейеру [5].

Сформированные групповые упаковки с готовой продукцией, прошедшие отбраковку и маркировку, попадают в зону паллетирования, где объединяются на одной цельной паллете для дальнейшей транспортировки продукции на склады готовой продукции или непосредственно потребителю.

1.1.2 Описание технологического процесса работы механизма

Комплект оборудования для оценки целостности групповых упаковок готовой продукции в мягкой упаковке (зона отбраковки) предназначен для проведения оценки целостности каждого блока, дабы исключить вероятность попадания к потребителю (в первую очередь – оптовым заказчикам) упаковок с нарушенной целостностью (упаковок, полностью не укомплектованных требуемым производственной программой количеством брикетов индивидуальной упаковки). Контроль целостности осуществляется за счет датчиков контроля длины, ширины и наличия угловых пачек.

Пуск соответствующей зоны отбраковки в автоматическом режиме осуществляется нажатием на кнопку «пуск/стоп» на главном экране панели управления. При поступлении из машин товара с цельной упаковкой роликовый привод включается в прямом направлении, в противном случае, в обратном направлении. При отсутствии нового товара в течение одной минуты роликовый и конвейерный двигатели отключаются и переходят в режим ожидания. При длительной работе датчика контроля ширины фиксируется затор в зоне отбраковки и загорается красная лампа маяка соответствующего пульта управления. Одновременно останавливается работа роликового и конвейерного двигателей, пневмоцилиндр спускающего механизма переход в положение «спущено». Для восстановления работы зоны отбраковки необходимо нажать на зеленую кнопку «Старт» на соответствующей панели управления.

Переход на ручной режим осуществляется переключением двухпозиционного ключа на соответствующем пульте. При переходе на ручной режим загорается желтый цвет маяка соответствующего пульта. При однократном нажатии на кнопку «Старт» включаются ременный, роликовый, конвейерный двигатели, причем роликовый двигатель включается в прямом направлении. При повторном нажатии на кнопку «Старт» роликовый привод включается в обратном направлении. При третьем нажатии на кнопку «Старт» все двигатели и пневмоцилиндры отключаются. Управление пневмоцилиндрами спускающего механизма и стрелки в ручном режиме осуществляется оператором с помощью соответствующих ключей на пульте управления.

По команде «пуск/стоп» зон 2 и 3 на главной панели управления пускаются ПЧ6, ПЧ7, ПЧ10 и ПЧ11, причем ПЧ10 первую минуту работает на низкой скорости и далее переключается на рабочую. После переключения ПЧ10 на рабочую скорость включаются ПЧ8 и ПЧ9 на низкую скорость и по истечению двух минут переключаются на рабочую скорость. В нормальном режиме ПЧ12, ПЧ13 и ПЧ14 находятся в отключенном состоянии.

Каждому виду товара соответствует свой уникальный штрих-код. Одновременно можно задать до 6 разных штрих-кодов. После выбора нужного штрих-кода информация загружается в контроллер, так же указывается номер выхода, куда должны отправляться товары с данным штрих-кодом. Одному товару соответствует только один выход. Во избежание ошибок номер выхода неиспользуемых штрих кодов задаются равными «0».

Для сброса системы в зоне выгрузки, в случае нарушения выгрузки (возможно при случайных воздействиях на датчики или сканер) предусмотрен специальный ключ «Сброс». При активации сброса все товары, находившиеся около и после сканера, отправляются на конец линии. Последующие товары должны направляться на указанные выходы.

При изменении положения датчиков или сканера в зоне выгрузки выполняется инициализация на трех скоростных режимах.

1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

Внешний вид рассматриваемого агрегата представлен на рисунке 1.

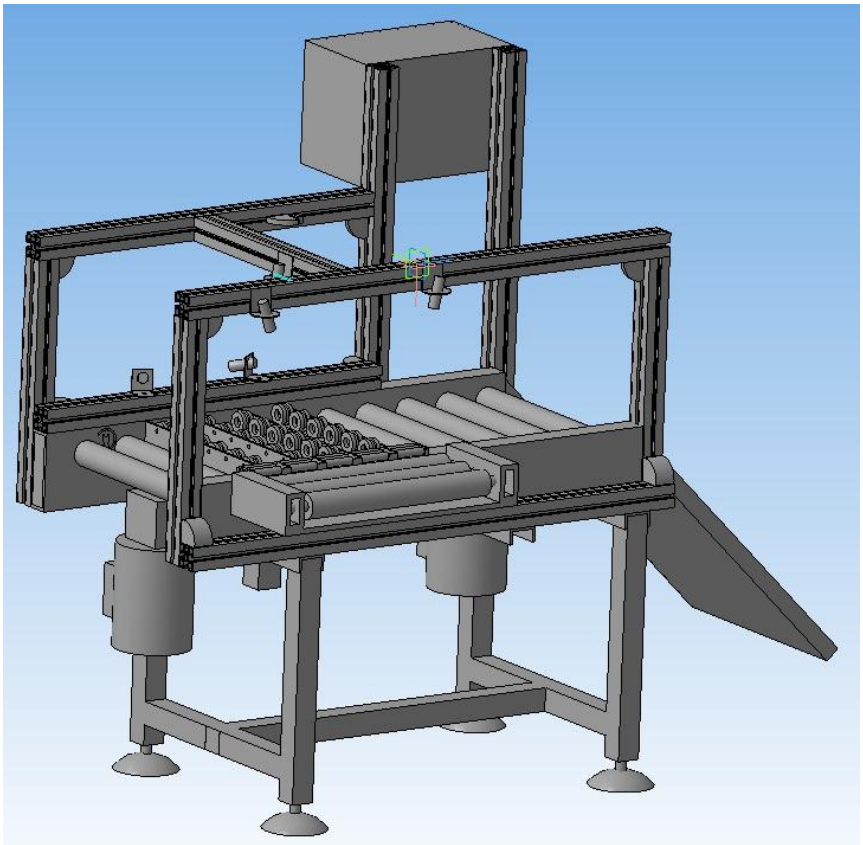


Рисунок 1 – Машина контроля состояния участка фасовки МУ

Общий алгоритм работы механизма можно представить в следующем виде:

1) Готовая продукция в виде спаянного блока из нескольких брикетов продукта выезжает из термотоннеля по ряду роликов №1.

2) Продукция оказывается перед следующим участком пути конвейера и проходит проверку целостности несколькими датчиками положения, после чего возможно несколько вариантов движения:

2.1) В случае, когда нарушена целостность (один из брикетов занимает некорректное положение) или компоновка (один из брикетов отсутствует), роликовый привод включается в обратном направлении, после чего весь блок попадает в зону брака.

2.2) В случае, когда целостность и компоновка блока соответствуют заданным требованиям, роликовый привод включается в прямом направлении и происходит перемещение блока в сторону общей конвейерной линии зоны погрузки.

Обеспечение выполнения данного алгоритма работы осуществляет следующий перечень оборудования:

1) Два приводных роликовых конвейера;

2) Два трехфазных асинхронных электродвигателя, осуществляющих привод роликов;

3) Пять фотоэлектрических датчиков, осуществляющих контроль состояния групповой упаковки готовой продукции;

4) Пневмоцилиндр, осуществляющий подъем ряда приводных роликов №1, «принимающих» продукцию из термотоннеля;

5) Пневмораспределитель, переключаемый дискретно из одного крайнего положения в другое для выдвижения и втягивания штока пневмоцилиндра[6].

Основные технические характеристики рассматриваемого механизма представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики

Наименование	Характеристики
Двигатель приводных роликов/ двигатель подъемных ремней	P, кВт = 0,25 n, об/мин = 1370 U Y/Δ, В = 230/400 I, А = 1,39/0,60
Редуктор червячный	i = 15 J, кг*м^2 = 0,004
Фотодатчик контроля боковых брикетов стяжки	l работы, мм = 2…500 l срабатывания, мм = 15…500 U питания, В = 10 Потребление I, мА = 30

Продолжение таблицы 1

Фотодатчик контроля развалившейся стяжки	l работы, мм = 50…700 l срабатывания, мм = 50…600 U питания, В = 10 Потребление I, мА = 30
Фотодатчик центральный наличия стяжки	l работы, мм = 2…400 l срабатывания, мм = 2…400 U питания, В = 10 Потребление I, мА = 25
Пневмоцилиндр	l хода поршня, мм = 50 Рабочее давление, бар = 1…10
Пневмораспределитель	Тип – 5/2 Максимальный Q, л/мин = 195 Рабочее давление, бар = 2,5…7

Упрощенная кинематическая (идентичная для двух рядов роликов) и пневматическая (общая для узла) схемы представлены на рисунках 2 и 3.

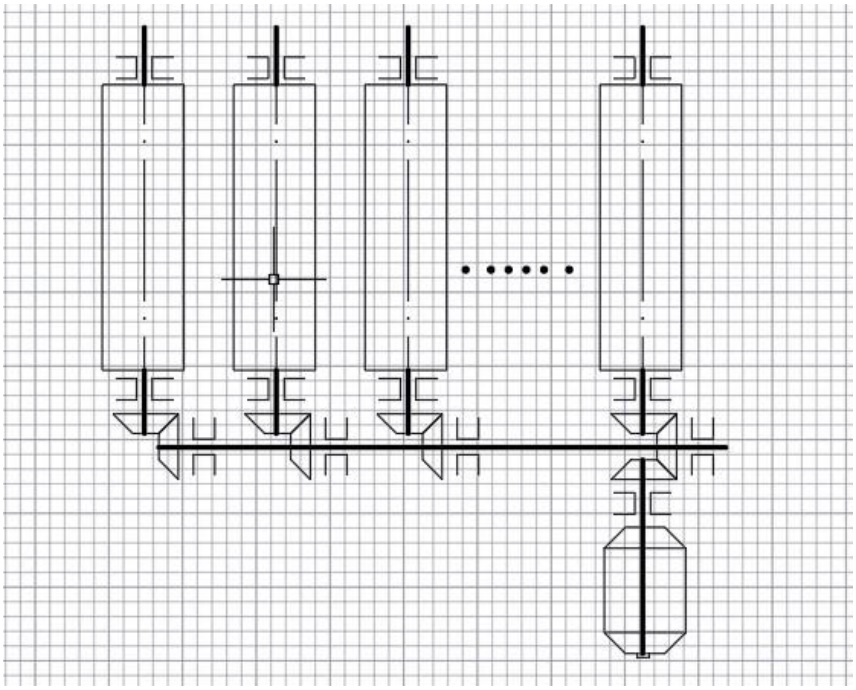


Рисунок 2 – Упрощенная кинематическая схема

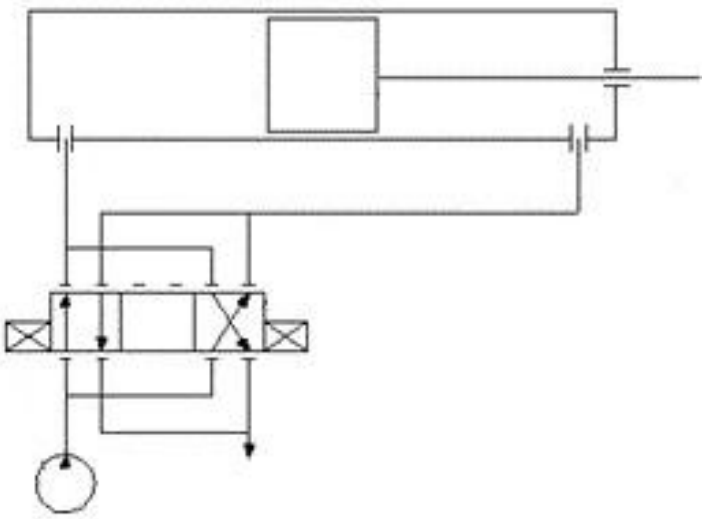


Рисунок 3 – Упрощенная пневматическая схема

Каждый роликовый конвейер приводится в движение узлом «асинхронный электродвигатель – червячный редуктор», перемещение транспортера подачи в вертикальной плоскости обеспечивается пневмоцилиндром.

1.3 Требования к приводам и системе автоматизации

В зависимости от производственных частностей технологического процесса, к электроприводу любой установки предъявляются различные технические требования.

Отталкиваясь от технологического процесса фасовки и непосредственной задачи модернизации рассматриваемого агрегата, а так же эксплуатационных условий, к электроприводу машины контроля состояния формулируются требования, направленные на ограничение или поддержание на заданном уровне угловой скорости вращения – или технологической координаты - приводных роликов обоих исполнительных механизмов, а так же на возможность обеспечения высокой скорости работы всей системы в целом вне зависимости от прикладываемой нагрузки (задания на выпуск продукции определенного формата, каждый из которых подразумевает разную массу и габариты продукта,

упакованного в групповые блоки). Исходя из этого, технические требования сформулированы следующим образом:

1. Диапазон регулирования угловых скоростей не менее [1:10];
2. Разгон до установившегося значения скорости за время, не превышающее 20% времени выполнения цикла;
3. Статическая ошибка регулирования угловой скорости не более 5%;
4. Возможность пуска электродвигателя в «прямом» и «обратном» режиме для обеспечения возможности двустороннего движения стяжки с продуктом;
5. Возможность обеспечить необходимую линейную скорость транспортировки продукта не менее 0,2/0,3 м/с;
6. Степень защиты электродвигателей не ниже IP54, чтобы обеспечить работоспособность в условиях запыленности и средней влажности.

Задачами системы управления мехатронной системой перемещения готовой продукции машины контроля состояния являются возможность собирать и обрабатывать информацию о состоянии контрольной продукции (при помощи датчиков), управлять работой агрегата на основании полученной информации при помощи микропроцессорного устройства (контроллера), синхронизировать работу приводов обоих рольгангов посредством точного контроля изменения скорости их вращения (при помощи преобразователей частоты). Помимо этого, система управления должна иметь возможность обеспечить непосредственное быстрое взаимодействие оператора технологического оборудования со всей транспортной системой участка погрузки (фасовки продукции в мягкую упаковку), находящегося в цеху со специфическими производственными условиями, такими как низкая логистическая способность ввиду внушительного количества оборудования (человеко-машинный интерфейс, HMI-панель). На основании задач системы автоматизации, сформулированы следующие требования:

1. Возможность обслуживать широкий диапазон каналов ввода-вывода (подключения большого количества датчиков);

2. Высокое быстродействие, время выполнения логической операции не более 0,1 мкс;
3. Поддержка функций регулирования технологической координаты;
4. Поддержка интерфейса типа Profibus/Profinet;
5. Встроенный интерфейс Ethernet.

1.4 Выбор системы привода

Выбор системы привода – одна из основных задач, включаемых в перечень мероприятий по реконструкции уже имеющегося механизма. Для ее решения необходимо учесть следующие параметры [6]:

1. Основное предназначение машины – «контроль» и транспортировка продукции;
2. Продолжительные нагрузки на привод без длительных пауз, что может приводить к быстрому износу составляющих привода и, как следствие, потребует замены компонентов (модульность конструкции/приемлемые ценовые показатели);
3. Обеспечение стабильных показателей угловых скоростей вращения приводных роликов;

Наиболее оптимальным вариантом, подходящим под вышеописанные параметры, является использование асинхронного электродвигателя в совокупности с редуктором, понижающим угловую скорость вращения рабочего органа агрегата до заданной (в связи с высокой скоростью вращения вала электродвигателей, что используется в довольно специфических отраслях промышленности). Асинхронные электродвигатели способны обеспечить бесперебойную работу установки в заданном режиме в течение продолжительного периода времени, просты и дешевы в обслуживании – даже в случае полного выхода из строя легко подвергаются замене, а так же обладают возможностью корреляции собственной скорости при помощи частотных преобразователей.

1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы

Основные параметры приводного роликового конвейера и ряда приводных роликов приведены в таблицах 2 и 3. В расчетах индекс «1» соответствует отводящему роликовому конвейеру (рольгангу), индекс «2» – «забирающему» роликовому конвейеру (ряду роликов).

Таблица 2 – Параметры рольганга

$D_{рол1}$, м	$d_{подшип1}$, м	$l_{рол1}$, м	$N_{рол}$, шт	$t_{раб1}$, сек	$t_{цикл}$, сек	$v_{лин1}$, м/с
0,05	0,03	0,4	12	3	5	0,3

Таблица 3 – Параметры приводных роликов

$D_{рол2}$, м	$d_{подшип2}$, м	$l_{ряда\ рол2}$, м	$N_{рядов\ рол}$, шт	$t_{раб2}$, сек	$t_{цикл}$, сек	$v_{лин2}$, м/с
0,05	0,03	0,4	6 (4 в 1)	2	5	0,2

Сила трения качения для одного ролика/ряда роликов:

$$F_1 = m_l \cdot g \cdot \frac{2 \cdot f}{D_{рол}}, \qquad (1)$$

где m_l – масса груза, приходящаяся на 1 ролик/ряд роликов, кг;

g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения;

f = 0,04 – коэффициент трения качения, м.

$$F_{l_1} = \frac{4,8}{3ролика} \cdot 9,81 \cdot \frac{2 \cdot 0,04}{0,05} = 25,11Н.$$

$$F_{l_2} = \frac{4,8}{3ряда_роликов} \cdot 9,81 \cdot \frac{2 \cdot 0,04}{0,05} = 25,11Н.$$

Сила трения в подшипниках роликов:

$$F_2 = g \cdot \mu_L \cdot \left(\frac{d_{подшип}}{D_{рол}} \right) \cdot \left(m_r + m_l \right), \qquad (2)$$

где μ_L = 0,005 – коэффициент трения в подшипниках;

m_r – масса одного ролика/ряда роликов, кг.

$$m_{r_1} = \rho_1 \cdot V_1 = \rho_1 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2_{рол_1} \cdot l_1 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2_{подшип_1} \cdot l_1 \right) =$$
$$= 7900 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0{,}4 \cdot \left(0{,}05^2 - 0{,}03^2 \right) \right) = 3{,}97 кг. \qquad (3)$$

$$m_{r_2} = \rho_2 \cdot V_2 \cdot 4 = \rho_2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2_{рол_2} \cdot l_2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2_{подшип2} \cdot l_2 \right) \cdot 4 =$$
$$= 1080 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 0{,}4 \cdot \left(0{,}05^2 - 0{,}03^2 \right) \right) \cdot 4 = 2{,}17 кг.$$

$$F_{2_1} = 9{,}81 \cdot 0{,}005 \cdot \left(\frac{0{,}03}{0{,}05} \right) \cdot \left(1{,}6 + 3{,}97 \right) = 0{,}16 Н.$$

$$F_{2_2} = 9{,}81 \cdot 0{,}005 \cdot \left(\frac{0{,}03}{0{,}05} \right) \cdot \left(1{,}6 + 2{,}17 \right) = 0{,}11 Н.$$

Момент сил сопротивления, приходящийся на весь рольганг/все ряды приводных роликов:

$$M_c = \frac{\left(F_1 \cdot \frac{D_{рол}}{2} + F_2 \cdot \frac{d_{подшип}}{2} \right) \cdot N}{\iota \cdot \eta}. \qquad (4)$$

$$M_{c_1} = \frac{\left(25{,}11 \cdot \frac{0{,}05}{2} + 0{,}16 \cdot \frac{0{,}03}{2} \right) \cdot 12}{15 \cdot 0{,}66} = 0{,}77 Н \cdot м.$$

$$M_{c_2}=\frac{\left(25{,}11_1\cdot\frac{0{,}05}{2}+0{,}11\cdot\frac{0{,}03}{2}\right)\cdot 6}{15\cdot 0{,}66}=0{,}38\text{Н}\cdot\text{м}.$$

Момент эквивалентный:

$$M_э=\sqrt{\frac{M_c^2\cdot t_р}{t_ц}}. \qquad (5)$$

$$M_{э_1}=\sqrt{\frac{M_{c_1}^2\cdot t_{р_1}}{t_ц}}=\sqrt{\frac{0{,}77^2\cdot 3}{6{,}2}}=0{,}53\text{Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_{э_2}=\sqrt{\frac{M_{c_2}^2\cdot t_{р_2}}{t_ц}}=\sqrt{\frac{0{,}38^2\cdot 2}{6{,}2}}=0{,}21\text{Н}\cdot\text{м}.$$

Момент номинальный выбираемого электродвигателя должен характеризовать возможность двигателя функционировать в режиме перегрузок, поэтому:

$$M_н=K_з\cdot M_э, \qquad (6)$$

где $K_з$ = 1,5 – коэффициент перегрузок.

$$M_{н_1}=1{,}5\cdot 0{,}53=0{,}795\text{Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_{н_2}=1{,}5\cdot 0{,}21=0{,}315\text{Н}\cdot\text{м}.$$

Угловая скорость для роликов считается как:

$$\omega_{рол}=\frac{2\cdot v}{D_{рол}}. \qquad (7)$$

$$\omega_{рол_1}=\frac{2\cdot v_1}{D_{рол_1}}=\frac{2\cdot 0,3}{0,05}=12 рад/сек.$$

$$\omega_{рол_2}=\frac{2\cdot v_2}{D_{рол_2}}=\frac{2\cdot 0,2}{0,05}=8 рад/сек.$$

Тогда необходимая номинальная угловая скорость для будущего электродвигателя:

$$\omega_н=\omega_{рол}\cdot i. \tag{8}$$

$$\omega_{н_1}=\omega_{рол_1}\cdot i=12\cdot 15=180 рад/сек.$$

$$\omega_{н_2}=\omega_{рол_2}\cdot i=8\cdot 15=120 рад/сек.$$

А частота вращения вала электродвигателя:

$$n=\frac{30\cdot\omega_н}{\pi}. \tag{9}$$

$$n_1=\frac{30\cdot\omega_{н_1}}{\pi}=\frac{30\cdot 180}{3,14}=1719 об/мин.$$

$$n_2=\frac{30\cdot\omega_{н_2}}{\pi}=\frac{30\cdot 120}{3,14}=1146 об/мин.$$

Номинальная частота вращения вала выбираемого электродвигателя должна быть больше или равна расчетной частоте:

$$n_{ном}\geq n. \tag{10}$$

$$n_{ном_1}\geq 1719 об/мин.$$

$$n_{ном_2}\geq 1146 об/мин.$$

А номинальная мощность должна соответствовать следующему соотношению:

$$P_{ном} \geq M_н \cdot \omega_н \tag{11}$$

$$P_{ном_1} \geq 0{,}795 \cdot 180 = 143 Вт$$

$$P_{ном_2} \geq 0{,}315 \cdot 120 = 38 Вт$$

Учитывая данные соотношения для частоты вращения и мощности, были выбраны асинхронные электродвигатели АИР56В2, АИР63А4 [8] и червячный редуктор NRV 030 (по одному для каждого двигателя) [9]. Из-за специфики конструкций и возникающих нагрузок на оба рольганга, выбранные двигатели для первого и второго ряда приводных роликов отличаются по своим параметрам. Параметры выбранного оборудования сведены в таблицы 4 и 5.

Таблица 4 – Параметры электродвигателей

Модель	АИР56В2	АИР63А4
Мощность $P_{ном}$, кВт	0,25	0,25
$n_{ном}$, об/мин	2730	1340
$I_{ном}$, А	0,73	0,79
η	0,66	0,65
cos φ	0,78	0,74
$I_{пуск}/I_{ном}$	5	5
$M_{пуск}/M_н$	2,2	2,1
$M_{макс}/M_н$	2,2	2,1
J, кг*м^2	0,00047	0,0012

Таблица 5 – Основные параметры редуктора

Модель	NRV 030
Тип	Червячный
Передаточное число i	15
J, кг*м^2	0,004

Для того, чтобы оценить соответствие выбранных электродвигателей заданным параметрам и их работоспособность в известных эксплуатационных условиях, проводится проверка двигателей на перегрев и перегрузочную способность, а так же строится их нагрузочные диаграммы.

Реальный момент номинальный выбранных электродвигателей рассчитывается как:

$$M_н = \frac{N \cdot P_{ном} \cdot 30}{n_{ном} \cdot \pi}. \tag{12}$$

$$M_{н_1} = \frac{N_1 \cdot P_{ном_1} \cdot 30}{n_{ном_1} \cdot \pi} = \frac{12 \cdot 250 \cdot 30}{2730 \cdot 3{,}14} = 10{,}49 Н \cdot м.$$

$$M_{н_2} = \frac{N_2 \cdot P_{ном_2} \cdot 30}{n_{ном_2} \cdot \pi} = \frac{6 \cdot 250 \cdot 30}{1340 \cdot 3{,}14} = 10{,}68 Н \cdot м.$$

Суммарный момент инерции всей системы:

$$J_{\Sigma_1} = J_{двиг} + J_{ред} + \frac{J_{рол} \cdot N}{i^2}. \tag{13}$$

$$J_{рол} = 0{,}5 \cdot m_r \left(\left(\frac{D_{рол}}{2} \right)^2 + \left(\frac{d_{подшип}}{2} \right)^2 \right). \tag{14}$$

$$J_{рол_1}=0,5\cdot m_{r_1}\left(\left(\frac{D_{рол_1}}{2}\right)^2+\left(\frac{d_{подшип_1}}{2}\right)^2\right)=0,5\cdot 3,9\cdot\left(\left(\frac{0,05}{2}\right)^2+\left(\frac{0,03}{2}\right)^2\right)=1,7\cdot 10^{-3}кг\cdot м^2.$$

$$J_{рол_2}=0,5\cdot m_{r_2}\left(\left(\frac{D_{рол_2}}{2}\right)^2+\left(\frac{d_{подшип_2}}{2}\right)^2\right)=0,5\cdot 2,17\cdot\left(\left(\frac{0,05}{2}\right)^2+\left(\frac{0,03}{2}\right)^2\right)=0,9\cdot 10^{-3}кг\cdot м^2.$$

$$J_{\Sigma_{1_1}}=0,00047+0,004+\frac{0,00168\cdot 12}{15^2}=4,55\cdot 10^{-3}кг\cdot м^2.$$

$$J_{\Sigma_{1_2}}=0,0012+0,004+\frac{0,0009225\cdot 6}{15^2}=5,225\cdot 10^{-3}кг\cdot м^2.$$

$$J_{\Sigma_2}=J_{\Sigma_1}+J_{мс}=J_{\Sigma_1}+m_l\cdot\left(\frac{v}{\omega_н}\right)^2. \qquad (15)$$

$$J_{\Sigma_{2_1}}=J_{\Sigma_{1_1}}+J_{мс_1}=J_{\Sigma_{1_1}}+m_{l_1}\cdot\left(\frac{v_1}{\omega_{н_1}}\right)^2=0,00455+1,6\cdot\left(\frac{0,3}{180}\right)^2=4,554\cdot 10^{-3}кг\cdot м^2.$$

$$J_{\Sigma_{2_2}}=J_{\Sigma_{1_2}}+J_{мс_2}=J_{\Sigma_{1_2}}+m_{l_2}\cdot\left(\frac{v_2}{\omega_{н_2}}\right)^2=0,0052+1,6\cdot\left(\frac{0,2}{120}\right)^2=5,229\cdot 10^{-3}кг\times м^2.$$

Уравнение движения привода одномассовой системы:

$$M=M_c\pm\xi=M_c\pm J_\Sigma\cdot\frac{d\omega}{dt}. \qquad (16)$$

Расчет моментов для всех этапов технологического процесса и построение нагрузочных диаграмм будет произведено параллельно из-за специфики работы двух приводов (сходные тахограммы и принцип работы):

1. Участок разгона рольганга с продуктом/приводных роликов без продукта (разгон с нагрузкой/без нагрузки):

$$M_{1_1}=M_{c_1}+M_{д_{1_1}}=0,77+0,004554\cdot\frac{180}{0,65}=2,031Н\cdot м.$$

$$M_{1_2}=M_{c_2}+M_{д_{1_2}}=0,362+0,005225\cdot\frac{120}{0,44}=1,805Н\cdot м.$$

2. Участок вращения рольганга с продуктом/приводных роликов без продукта (вращение с постоянной скоростью под нагрузкой/без нагрузкой):

$$M_{2_1}=M_{c_1}+M_{д_{2_1}}=0{,}77+(0{,}004554-0{,}00455)\cdot\frac{180}{0{,}65}=0{,}771\text{Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_{2_2}=M_{c_2}=0{,}38\text{Н}\cdot\text{м}.$$

3. Участок торможения рольганга без продукта/вращения приводных роликов с продуктом (торможение без нагрузки/вращение под нагрузкой):

$$M_{3_1}=M_{c_1}-M_{д_{3_1}}=0{,}77-0{,}00455\cdot\frac{180}{0{,}65}=-0{,}49\text{Н}\cdot\text{м}.$$

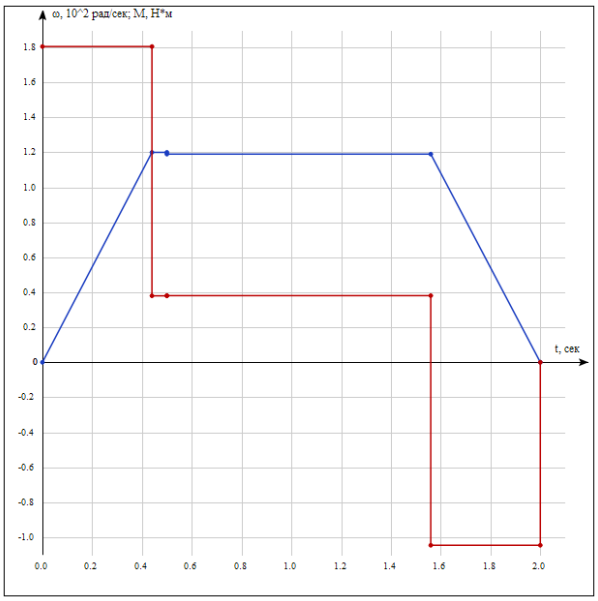
$$M_{3_2}=M_{c_2}-M_{д_{3_2}}=0{,}38+(0{,}005229-0{,}005225)\cdot\frac{120}{0{,}44}=0{,}381\text{Н}\cdot\text{м}.$$

4. Участок торможения приводных роликов без продукта (торможение без нагрузки):

$$M_{4_2}=M_{c_2}-M_{д_{4_2}}=0{,}38-0{,}005229\cdot\frac{120}{0{,}44}=-1{,}046\text{Н}\cdot\text{м}.$$

Построенные нагрузочные диаграммы и тахограммы (соответствующие графическому отображению уравнения движения привода одномассовой системы) работы электроприводов подающего («забирающей» группы роликов) и отводящего (рольганга) конвейеров представлены на рисунке 1.4. На основании построенных нагрузочных диаграмм и тахограмм работы электроприводов в дальнейшем будет составлена полная циклограмма работы, отображающая

рабочий процесс каждого из электроприводов в течение всего времени выполнения производственного цикла (помимо исполнительных механизмов в виде рольгангов, в системе присутствует так же пневмопривод, линейная скорость которого на графиках не отображается).



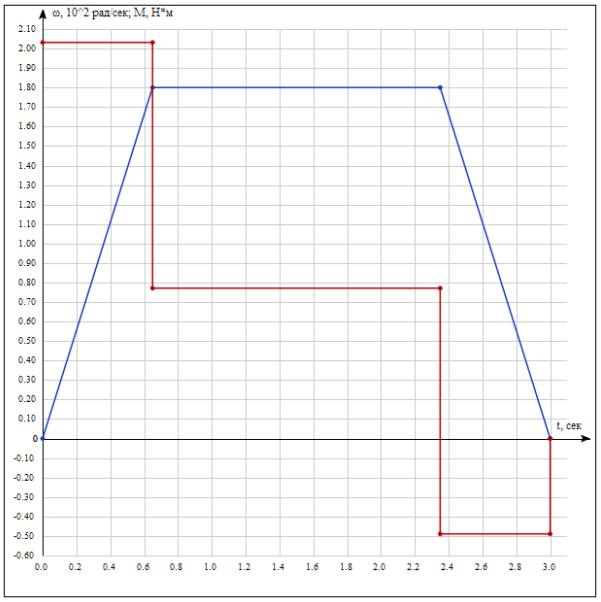


Рисунок 4 - Нагрузочные диаграммы и тахограммы

На основании рассчитанных и паспортных величин моментов проводится проверка на перегрев и перегрузку выбранных электродвигателей.

Способность двигателя выдерживать перегрев проверяется по соотношению:

$$M_{экв}=\sqrt{\frac{M_1^2\cdot t_{p_1}+M_2^2\cdot t_{p_2}+M_3^2\cdot t_{p_3}}{t_ц}}\le M_н. \qquad (17)$$

$$M_{экв_1}=\sqrt{\frac{2{,}031^2\cdot 0{,}65+0{,}771^2\cdot 1{,}7+0{,}489^2\cdot 0{,}65}{6}}=0{,}8\le M_{н_1}=10{,}49.$$

$$M_{экв_2}=\sqrt{\frac{1{,}805^2\cdot 0{,}44+0{,}38^2\cdot 0{,}06+0{,}381^2\cdot 1{,}06+1{,}046^2\cdot 0{,}44}{6}}=0{,}58\le M_{н_2}=10{,}68.$$

Рассчитанные эквивалентные моменты принимают меньшее значение, нежели номинальные, следовательно, выбранные электродвигатели прошли проверку на перегрев.

Проверка двигателя на устойчивость по перегрузочной способности осуществляется по следующему неравенству:

$$M_{max.рассчетный} \leq M_{max.справочный}. \quad (18)$$

Максимальными расчетными моментами, в данном случае, являются моменты, прикладываемые во время разгона транспортеров, составляющие 1,801 Н*м для транспортера подачи и 2,031 Н*м для транспортера отводящего.

Максимальные справочные моменты для электродвигателей определяются из соотношения максимального и номинального моментов (паспортная величина). В данном случае:

$$M_{max.справочный_1} = 2{,}2 \cdot M_{ном_1} = 2{,}2 \cdot 10{,}49 = 23{,}078 Н \cdot м.$$

$$M_{max.справочный_2} = 2{,}1 \cdot M_{ном_2} = 2{,}1 \cdot 10{,}68 = 22{,}428 Н \cdot м.$$

$$M_{max.рассчетный_1} = 2{,}031 \leq M_{max.справочный_1} = 23{,}078.$$

$$M_{max.рассчетный_2} = 1{,}801 \leq M_{max.справочный_2} = 22{,}428.$$

Заложенная в выбранные электродвигатели способность выдерживать перегрузку удовлетворяют необходимые расчетные требования по нагрузке.

1.5.1 Выбор дополнительного оборудования

Машина контроля состояния участка фасовки в мягкую упаковку помимо электро-комплектующих должна быть оборудована пневмо-аппаратурой для

обеспечения выполнения полного цикла технологического процесса отбраковки. Ряд приводных роликов, осуществляющих ортогональное рольгангу перемещение стяжки с продукцией, перемещается в горизонтальной плоскости посредством пневмоцилиндра, управляемого дискретными сигналами на втягивание и выдвижение штока вместе с платформой. Основным условием подбора пневмоцилиндра является его способность противостоять силе тяжести, развиваемой платформой с грузом, а так же силе трения при движении самого штока. Основное уравнение выбора пневмоцилиндра заключается в расчете минимального усилия, развиваемого на штоке:

$$F_{\Sigma}=F_c+F_d=m_{пл}\cdot g+m_{пл}\cdot\frac{dv_{шт}}{dt}, \qquad (19)$$

где F_c – сила тяжести, Н;

F_d – сила трения, Н;

$m_{пл}$ = 24 кг – масса платформы с роликами и грузом;

$v_{шт}$ = 0,05 м/с – минимальная необходимая линейная скорость выдвижения штока пневмоцилиндра, удовлетворяющая технические требования;

t = 0,5 с – минимальное время выдвижения штока до конечного положения.

$$F_{\Sigma}=F_c+F_d=24\cdot 9{,}81+24\cdot\frac{0{,}05}{0{,}5}=237{,}84\text{Н}.$$

Исходя из полученной величины усилия, а так же из величины рабочего давления в системе обеспечения цеха предприятия сжатым воздухом, составляющей 6 бар, была подобрана пневмо-аппаратура компании Festo, характеристики которой представлены в таблице 6 [10].

Таблица 6 – Подобранная пневмо-аппаратура установки

Наименование	Характеристики
Пневмоцилиндр подъемных роликов Festo DSBC-32-50-PPSA-N3	Ход, мм = 50 Рабочее давление, бар = 0,6…12 Присоединение – G1/8
Пневмораспределитель Festo VUVG-LK14-M52-AT-G18-1R8L-S	Максимальный расход, л/мин = 660 Рабочее давление, бар = 2,5…7 Присоединение – G1/8

Подобранное пневмо-оборудование подходит друг к другу как по присоединительной характеристике (особенности конструктивного исполнения), так и по техническим характеристикам.

1.6 Выбор основного силового оборудования

Основной целью реконструкции машины контроля состояния участка фасовки является снижение времени простоев оборудования технологической линии за счет уменьшения времени перехода оборудования на другой формат производимой продукции. Обеспечение возможности регулирования диапазона угловых скоростей исполнительных механизмов способствует решению данной задачи.

Установка преобразователей частоты для изменения и контроля скорости электродвигателей [11], приводящих в движение роликовые конвейера, позволяет осуществлять регулировку скоростей исполнительных органов – роликов – в зависимости от задания на конкретный формат продукции. Снижение времени простоев оборудования положительно скажется на производительности и повысит плановые показатели по выработке (при увеличении годового фонда рабочего времени прямо пропорционально расчет и производственная мощность предприятия), следовательно, повысит прибыль предприятия от реализации большего числа продукции.

Выбор частотного преобразователя обосновывается максимальным токопотреблением, режимом работы всего электропривода (величина и длительность перегрузок) и способностью самого преобразователя к работе в режиме перегрузок. Помимо прочего, выбранный преобразователь частоты должен способствовать обеспечению выполнения предъявляемых к приводу и системе автоматизации технологических требований.

Фактический выбор осуществляется на основании выполнения следующего соотношения [12]:

$$I_{ном}^{пч} \geq \frac{\lambda_{двиг}}{\lambda_{пч}} \cdot I_{ном}^{двиг}, \qquad (20)$$

где $I_{пч.ном}$ = 2,2 А – номинальный ток, потребляемый преобразователем частоты;

$\lambda_{двиг}$ = 5 – паспортная перегрузочная способность двигателей;

$\lambda_{пч}$ = 3,3 – паспортная перегрузочная способность преобразователя частоты при величине перегрузок не более 150% и длительности не более 1 минуты;

$I_{двиг.ном}$ = 0,79 А – номинальный ток, потребляемый двигателем приводных роликов.

$$2{,}2 \geq \frac{5}{3{,}3} \times 0{,}79.$$

$$2{,}2 \geq 1{,}2.$$

Условие выбора частотного преобразователя соблюдается с большим запасом для обоих электродвигателей, что создает перспективы будущих модернизаций. Параметры выбранного преобразователя частоты компании Danfoss [13] представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики преобразователя частоты

Наименование	Danfoss FC-051PK75T4
Мощность, кВт	0,75
Номинальный ток, А	2,2
Управление	Скалярное;
Наличие встроенного регулятора	П-регулятор
Встроенные интерфейсы	RS-485 FC-Protocol; Modbus RTU
Перегрузочная способность	150% в течение 1 минуты
Дополнительные параметры	Встроенный контроллер

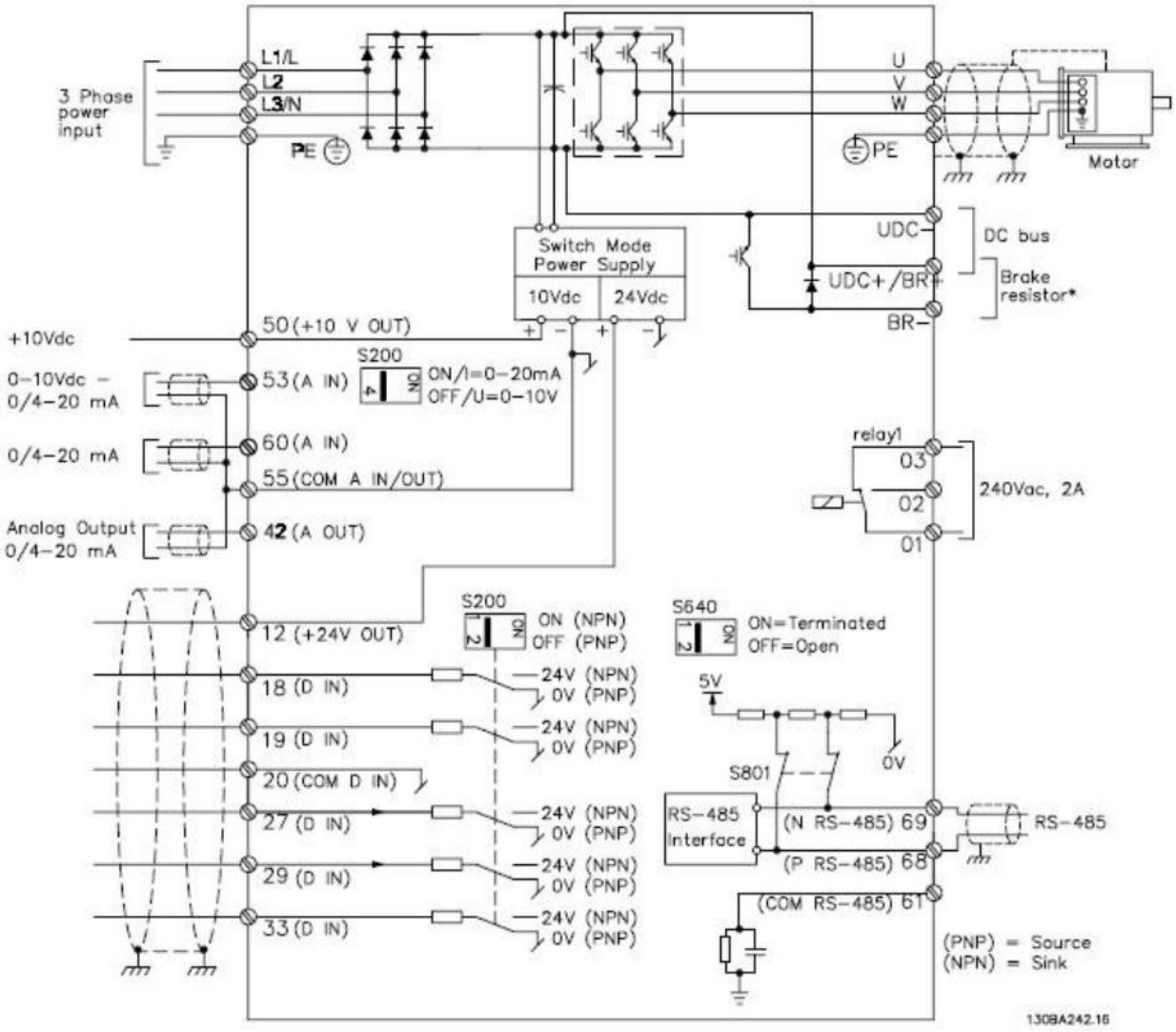


Рисунок 5 – Схема подключения преобразователя частоты

На рисунке 5 представлена силовая схема подключения выбранного преобразователя частоты к электродвигателю и питающей сети.

Подобранное силовое оборудование в виде преобразователя частоты имеет встроенный регулятор, способствующий более точному регулированию такой технологической координаты, как угловая скорость вращения вала асинхронного электродвигателя – следовательно, и скоростей вращения исполнительных механизмов машины контроля состояния (рольгангов).

1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств

Защиты привода – средства, направленные на превентивную блокировку аварийной ситуации, влекущую за собой выход из строя технологического оборудования и нарушение/прекращение технологического процесса производства в случае невыполнения нормальных эксплуатационных условий или сбоев в работе электродвигателя.

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок», каждую электроустановку, в том числе и электродвигатели, необходимо снабжать автоматическими выключателями, прерывающими работу электропривода в случае возникновения больших перегрузок и коротких замыканий [14].

Выбранный автоматический выключатель должен удовлетворять условие:

$$\begin{aligned} &U_{ном}^{QF} = U_{ном}^{двиг}; \\ &I_{ном}^{QF} \geq I_{ном}^{двиг}, \end{aligned} \qquad (21)$$

где $U_{QF.ном}$ – номинальное напряжение автомата, В;

$U_{двиг.ном}$ – номинальное напряжение электродвигателя, В;

$I_{QF.ном}$ – номинальный ток автомата, А;

$I_{двиг.ном}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

Исходя из этих условий, был выбран автомат защиты двигателей PKZM01-1,6 [15] фирмы Eaton, его технические характеристики – в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики автомата защиты двигателей

Наименование	PKZM01-1,6
Номинальный ток, А	1,6
Максимальная мощность двигателя, АС-3, 380В, кВт	0,55
Номинальный непрерывный ток, А	1,6
Настройка расцепителя перегрузки, А	1,6
Настройка расцепителя КЗ, А	22

Помимо автоматов защитного отключения, для защиты электропривода используются термодатчики, располагающиеся внутри электродвигателей, сигнализирующие о превышении допустимого уровня нагрева посредством изменения своего сопротивления в зависимости от температуры; сетевые дроссели, устанавливающиеся на вход преобразователей частоты и ограничивающие привод от сетевых помех; фильтра, компенсирующие реактивную мощность и подавляющие прочие помехи; блоки динамического торможения, использующиеся в случае необходимости обеспечения своевременного прерывания работы электродвигателя; а так же блоки резисторов, подключенные к шинам постоянного тока на частотных преобразователях, обеспечивающие динамическое торможение.

Для выбранного пневматического оборудования специфические требования по защите (к клапанам, коррелирующим величину давления, приходящегося на пневмоцилиндр) в рамках выполнения данной выпускной квалификационной работе не предъявляются, считается, что оборудование обеспечивает выполнение технологического процесса в штатном режиме согласно нагрузкам, не выходящим за величину номинальных допустимых параметров эксплуатации (сообразно расчету выбранного пневмопривода).

2 РАЗРАБОТКА САУ

2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации

Для обеспечения выполнения заданного алгоритма работы оборудования в автоматическом режиме необходима система автоматизации. Спроектированная система должна отвечать технологическим требованиям и выполнять поставленные задачи по отслеживанию информации, поступающей на датчики, управлением электро- и пневмоприводом установки, а так же осуществлять связь и согласованную работу нескольких фасовочных линий и стоящих на них оборудовании. Как правило, помимо вышеперечисленного оборудования, автоматизированная система управления технологическим процессом оборудована средствами сбора, обработки и архивации информации о ходе производственного процесса [16]. Разрабатываемая архитектура автоматизации представляет собой несколько уровней в иерархии системы управления всем крупоцехом.

Верхним из рассматриваемых уровней системы управления является система организации производства (в нашем случае – система управления фасовкой продукции в мягкую упаковку) MES (англ. – Manufacturing Execution System). Он отвечает за сбор и обработку информации о ходе процесса фасовки на нескольких фасовочных линиях, обеспечивает управление качеством и предоставляет информацию для уровня управления предприятием ERP (англ. – Enterprise Resource Planning).

Следующим по нисходящей иерархической лестнице уровнем является верхний уровень АСУ ТП – уровень взаимодействия оператора с оборудованием SCADA (англ. – Supervisory Control and Data Acquisition). На предприятии ООО «Ресурс», реконструкция оборудования которого рассматривается в данной выпускной работе, этот уровень реализован на базе программного обеспечения системы Wonderware [17], позволяющей в реальном времени осуществлять мониторинг работы оборудования, сбор информации о времени

простоев/переходов и регистрацию причины остановок оборудования, принимать задание на фасовку определенного количества продукции. Связь этого уровня с предыдущим осуществляется посредством сети Ethernet.

На ступень ниже находится первый из рассматриваемых уровней разрабатываемой архитектуры – уровень программируемых-логических контроллеров PLC, осуществляющих автоматизированное управление технологическим процессом. В рассматриваемой системе автоматизации контроллер отвечает за синхронизацию работы исполнительных механизмов транспортной системы (электро- и пневмооборудования) согласно заданному алгоритму работы, а так же осуществляет управление их функционированием на основании принимаемой и обрабатываемой информации, поступающей с контрольно-измерительных приборов. С верхним уровнем АСУ ТП взаимодействие обеспечивается сетью Ethernet.

Нижний уровень системы представляет собой исполнительные механизмы и контрольно-измерительные приборы, собирающие информацию о работе исполнительных механизмов и являющиеся первоисточником реализации исполнительных воздействий.

В пунктах 1.1 и 1.2 настоящей работы рассмотрен полный технологический процесс фасовки продукции в мягкую упаковку, согласно которому и выполняется разработка архитектуры системы автоматизации мехатронной системы перемещения готовой продукции машины контроля состояния.

В рамках технологического процесса готовая продукция, упакованная в групповую упаковку, проходит контроль состояния упаковки. Стяжка передвигается по двум ортогонально располагающимся приводным роликовым конвейерам, приводимым в движение электродвигателями, скорость вращения которых (а, следовательно, и скорость вращения роликов) будет осуществляться при помощи частотного управления. Подающий продукцию роликовый транспортер так же перемещается в вертикальной плоскости при помощи пневмоцилиндра, втягивание/выдвижение штока которого осуществляется

посредством подачи дискретного сигнала на переключение положения пневмораспределителя.

Геометрические параметры групповой стяжки (т.н. «состояние»), а так же ее наличие, измеряются при помощи датчиков, закрепленных на опорной конструкции машины.

Разработанная архитектура двух рассматриваемых нижних уровней системы автоматизации представлена на рисунке 6.

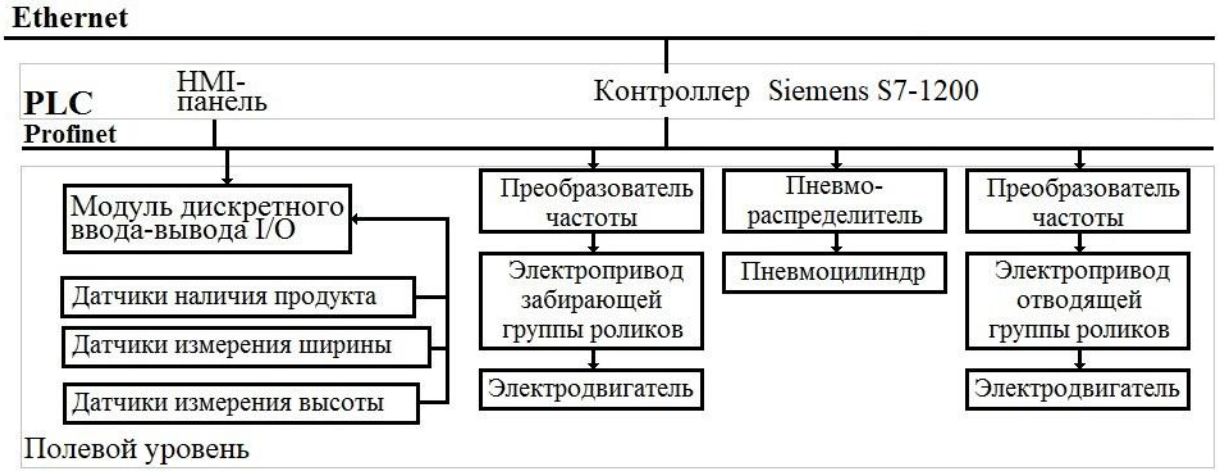


Рисунок 6 – Архитектура нижних уровней системы автоматизации

Так как реконструкция включает в себя только два нижних уровня системы автоматизации, верхний уровень АСУ ТП и два уровня АСУП более подробно будут рассмотрены в ходе выполнения выпускной квалификационной работы магистра.

2.2 Выбор контроллеров и датчиков технологических координат

В пункте 1.3 данной работы сформулированы требования к системе автоматизации производства. Для обеспечения выполнения заданных требований выбран контроллер торговой марки Simatic, объединяющей различные средства промышленной автоматизации, предназначенные для решения задач

автоматизации технологических процессов производств и предприятий, концерна Siemens.

Контроллером, управляющим работой всей транспортной системы фасовочных линий мягкой упаковки и зонами отбраковки в частности, выбран Siemens Simatic S7-1200. PLC Simatic S7-1200 - представитель нового семейства микроконтроллеров Siemens для решения разных задач автоматизации малого уровня. Он обладает несколько меньшим функционалом, нежели представители последних моделей семейства Simatic S7, однако, обладает гибкими возможностями настройки и сохраняет лояльную в сравнении с более новыми моделями цену. Помимо этого, он так же имеет модульную конструкцию, что позволяет интегрировать различные контрольно-измерительные приборы (датчики) в систему автоматизации и обеспечивать управление различными исполнительными механизмами, способность работать в реальном масштабе времени и используется для построения сложных узлов комплексной системы автоматического управления [18].

Диапазон рабочих температур от 0 до + 50° С позволяет обеспечить работоспособность контроллера в заданных условиях, высокое быстродействие (0,1 мкс) – гарантия качественного решения поставленных задач автоматизации. Человеко-машинный интерфейс (HMI) позволяет существенно упростить обслуживание контроллера в режиме выполнения рабочей производственной программы. Операции по считыванию и обработке информации с датчиков происходит под управлением внутренней операционной системы контроллера, благодаря чему функция регулирования технологических координат управляемых контроллером машин происходит в автоматическом режиме с заданной точностью. Поддерживаемые интерфейсы типа Profibus/Profinet/Ethernet позволяют осуществлять связь всех уровней системы автоматизации производства (АСУ ТП, АСУП).

Описание, краткие характеристики и назначение каждого модуля контроллера представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Используемые модули контроллера SIMATIC S7-1200

Наименование	Назначение	Характеристики
Коммуникационный модуль CM 1241	Поддержание скоростного высокопроизводительного обмена данными через PtP соединение	- RS 422/485; - 9-полюсный разъем; - Свободно программируемый порт
ЦПУ CPU 1214C	Программирование широкого спектра операций, функции счета, обработка прерываний, тестирование и диагностика, управление позиционированием, библиотечные функции	- DC/DC/RLY; - Встроенные входы/выходы: 1) 14 DI =24 В; 2) 10 DO реле 2А; 3) 2 AI = (0 – 10)В - Блок питания 20.4-28.8В;
Модуль дискретного ввода-вывода SM 1223	Адаптация контроллера к требованиям решаемой задачи путем увеличения количества входов/выходов, с которыми работает ЦП	- 16 DI / 16 DO; - 16 DI = 24В; - Входы Sink/Source - 16 DO; - Релейные выходы 2А
Коммуникационный модуль CSM 1277	Построение сетевых структур, расширение коммуникационных возможностей контроллера	- Неуправляемый коммутатор; - 4X 10/100 Мбит порта RJ45; - 24В DC
Панель оператора Simatic HMI KTP 1200 Basic	Решение широкого круга задач оперативного управления и мониторинга на локальном уровне, организация обмена данными с другими приборами	- Кнопки и сенсорное управление; - TFT-дисплей; - Интерфейс Profinet; - ПО с открытым кодом

Для питания внутренних цепей системы выберем блок питания компании MeanWell SDR-120-24 [19], чьи характеристики позволяют обеспечить электроэнергией все модули логического контроллера и поддерживать их работоспособность в заданных условиях. Параметры выбранного источника приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические характеристики источника питания

Параметр	Значение
Входные параметры	
Диапазон входных напряжений, В	88~264 AC; 124-370 DC
Диапазон частот, Гц	47-63
КПД, %	91
Переменный ток, А/В	1,4/115 AC; 0,7/230 AC
Пусковой ток, А/В	37/115 VAC; 70/230VAC
Выходные параметры	
Напряжение постоянного тока, А	24
Номинальный ток, А	5
Диапазон тока, А	0-5
Номинальная мощность, Вт	120
Диапазон регулировки напряжения, В	24-28
Допустимое отклонение напряжения, %	±1.0

Для защиты источника питания установим небольшой предохранитель FS-52GF-6.3/250 (5x20мм, стеклянный, быстрый, 6.3А/250В).

Для обеспечения измерения геометрии готовой продукции, а так же для своевременного включения в работу приводов рольгангов, необходимо несколько контрольно-измерительных приборов – датчиков измерения высоты и ширины стяжки, датчиков наличия продукта на начале транспортера забирающей группы роликов и в конце отводящей группы роликов. Для контроля высоты стяжки

выберем фотодатчики компании Sick - WTB 140-P430 , ширины - VL180-2P41136 [20], для определения наличия продукта – фотодатчики компании TEKO - AC43A5-43P-R400-LZS4 [21]. Параметры используемых датчиков приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Параметры используемых фотодатчиков

Название датчика	Sick WTB 140-P430	Sick VL180-2P41136	AC43A5-43P-R400-LZS4
Принцип действия	Отражение от объекта	Отражение от рефлектора	Отражение от объекта
Дистанция работы, мм	2…500	50…700	2…400
Расстояние срабатывания, мм	15…500	50…600	2…400
Вид излучения	Видимый красный свет	Видимый красный свет	Инфракрасный луч
Длина волны, нм	680	645	-
Напряжение питания, В DC	10	10	10
Остаточная пульсация	10%	10%	10%
Токопотребление, мА	30	30	25
Тип защиты, IP	67	67	65

Датчики крепятся стационарно к каркасу машины контроля состояния, обмен информации с контроллером происходит посредством станции удаленного ввода-вывода, обладающей большим числом пинов для приема входных сигналов и отдачи выходных. Обработка сигналов, поступающих с датчиков, производится центральным процессором контроллера. Исполнительные механизмы машины контроля состояния не имеют «жесткой» связи с датчиками, но их алгоритм работы имеет четкую взаимосвязь.

2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата

Объектами регулирования в реконструируемой системе являются приводы двух роликовых конвейеров – забирающей группы роликов, принимающих готовую продукцию из термотоннеля, упакованную в термоусадочную пленку, и отводящей группы роликов, осуществляющих перемещение продукта на транспортную систему или в зону брака. Для обеспечения синхронизации работы приводов, необходимо обеспечить регулирование в автоматическом режиме скорости вращения обоих рядов роликов в широком диапазоне, что возможно в замкнутой двухконтурной системе регулирования скоростей каждого из приводов [22]. Для привода пневмо-оборудования, обеспечивающего вертикальное перемещение платформы с группой забирающих роликов, требований к регулированию таких технологических координат, как скорость или перемещение, не предъявляется, так как его управление обеспечивается дискретно путем переключения пневмораспределителя из одного крайнего положения в другое. Однако, выполнение всего технологического процесса обеспечивается последовательной отработкой оборудования своих алгоритмов. Для выбранных электродвигателей и требований к регулированию такой технологической координаты, как скорость вращения, на рисунке 7 приведена общая функциональная схема САР.

В состав системы автоматического регулирования входят: ПЧ – преобразователи частоты, РТ – регуляторы тока, ДТ – датчики тока, РС – регуляторы скорости, БО – блоки ограничения, ДС – датчики скорости, АД – асинхронные двигатели, ПР – пневмораспределитель, БЗСиП – блок задания скоростей и последовательности. Блок задания скоростей и последовательности включения приводов определяет порядок включения электродвигателей, приводящих в движение рольганги, а так же выдает задание на формирование угловой скорости вращения определенной величины в зависимости от формата фасуемой и, следовательно, упаковываемой в групповую упаковку, продукции.

Внутри блока задания скоростей и последовательности единой системой автоматики объединены программируемый-логический контроллер и датчики наличия и измерения габаритов групповой упаковки готовой продукции. Помимо определения порядка включения рольгангов, блок выдает задание пневмоцилиндру на выдвижение/втягивание штока пневмоцилиндра (формирует дискретный сигнал на переключение пневмораспределителя).

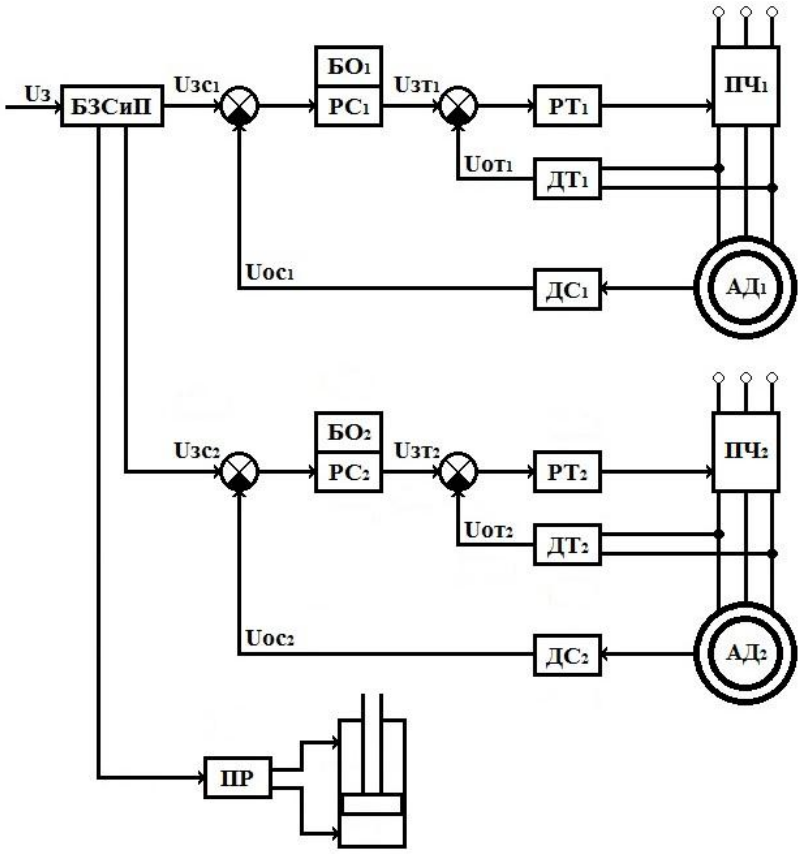


Рисунок 7 – Функциональная схема систем автоматического регулирования электроприводов рольгангов машины контроля состояния

Сигнал задания на скорость поступает на регуляторы скорости, откуда поступает на преобразователи частоты, регулирующие скорость вращения асинхронных электродвигателей. Обратная связь по току и скорости (реализуемая датчиками тока и скорости) дает системе автоматического регулирования

информацию о изменении координаты, на основании которой создается коррелирующее выходную величину воздействие.

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

Реконструкция мехатронной системы перемещения готовой продукции машины контроля состояния подразумевает собой разработку контуров регулирования такой технологической координаты, как угловая скорость исполнительных механизмов (рольгангов).

Система контроля и регулирования этой координаты представляет собой последовательную структуру, во главе которой стоит контроллер, формирующий задание на пуск/остановку и разгон до заданной скорости двигателей исполнительных механизмов в соответствии с сигналами, поступающими с датчиков контроля состояния и наличия готовой продукции.

Общая схема контуров регулирования технологической координаты представлена на рисунке 8.

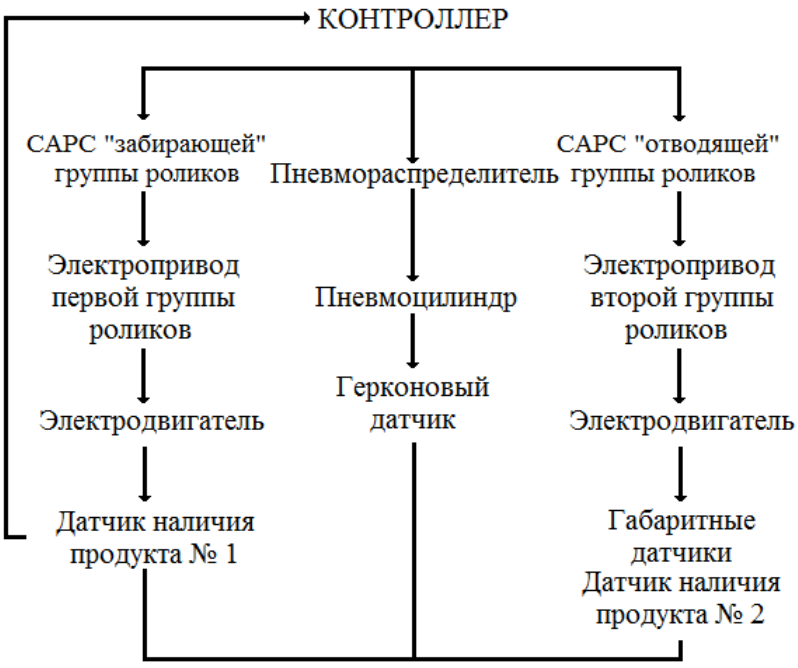


Рисунок 8 Общая схема регулирования

САРС электроприводов рольгангов будет реализована по следующему алгоритму:

1. Сигнал о наличии стяжки с готовой продукцией на выходе из термотоннеля, поступающий с соответствующего датчика №1, служит первопричиной включения электропривода первой группы роликов, перемещающих продукт до конечной точки пространства машины контроля состояния;

2. Происходит втягивание штока пневмоцилиндра, перемещающего в вертикальной плоскости первую группу роликов, одновременно с чем производится контроль состояния групповой упаковки готовой продукции (прием и обработка сигналов с габаритных датчиков) и отключение привода первой группы роликов;

3. В зависимости от соответствия или несоответствия групповой упаковки продукции заданным параметрам электропривод второй группы роликов осуществляет прямой или обратный запуск электродвигателя для транспортировки продукции в зону брака или паллетирования;

4. При отсутствии сигнала с датчика наличия продукта № 2 электропривод второй группы роликов отключается, после чего алгоритм повторяется в течение всего производственного цикла.

2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

Разработка структурной схемы системы автоматического управления (САУ) электропривода включает в себя формирование типовых звеньев, реализующих функции объекта управления (электродвигателя), регуляторов (регулятора скорости со встроенным блоком-ограничителем), обратной связи (датчиков) и оптимизированного контура момента, на основе которого осуществляется регулирование технологической координаты привода – угловой скорости вращения вала электродвигателей, приводящих в движение роликовые конвейера. На рисунке 9 приведена обобщенная структурная схема реализации подчиненного

регулирования угловой скорости электроприводов рольгангов машины контроля состояния участка фасовки готовой продукции в мягкую упаковку. Основными блоками, включаемыми в структурную схему, являются:

1. Объект управления – апериодическое звено, представляющее собой электродвигатель;
2. Система автоматического регулирования - оптимизированный контур момента, состоящий из преобразователя частоты, статорной цепи асинхронного двигателя и регулятора момента;
3. Регулятор скорости;
4. Обратная связь по скорости.

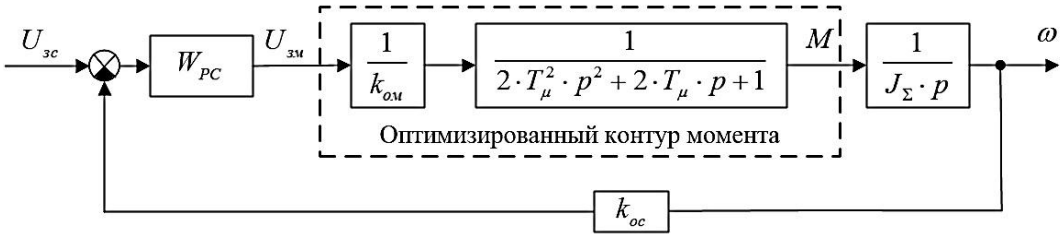


Рисунок 9 – Обобщенная структурная схема САУ

В теории автоматического управления допускается проводить аппроксимацию внутреннего оптимизированного контура момента, так как малая некомпенсируемая постоянная времени, отвечающая за время протекания переходного процесса, принимает незначительную величину (следовательно, второй порядок знаменателя звена окажет малое влияние на общую картину регулирования). Помимо аппроксимации, последовательно к регулятору скорости необходимо подключить блок ограничения (БО), ограничивающий максимально допустимое значение момента. Имея ввиду данные преобразования, приведем видоизмененную структурную схему системы автоматического управления приводами на рисунке 10.

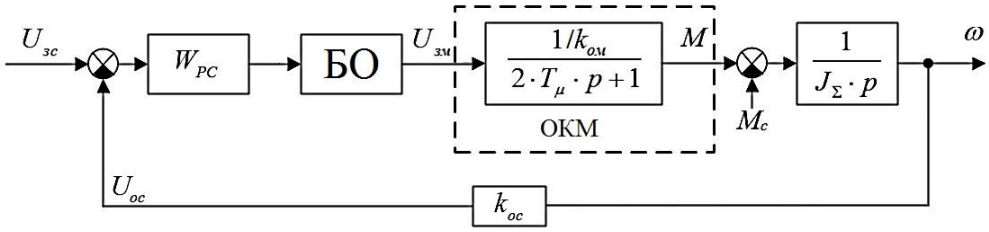


Рисунок 10 – Структурная схема системы автоматического управления с аппроксимированным ОКМ и блоком-ограничителем БО

Рассчитаем коэффициенты для формирования звеньев структурной схемы и последующего моделирования типовых режимов работы электроприводов в среде Matlab Simulink. Индекс «1» соответствует электроприводу отводящего роликового конвейера, индекс «2» – электроприводу «забирающего» роликового конвейера.

Коэффициент обратной связи по току:

$$К_{от} = \frac{10}{2 \cdot I_{ном}}, \tag{22}$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

$$К_{от1} = \frac{10}{2 \cdot I_{ном1}} = \frac{10}{2 \cdot 0{,}73} = 6{,}85$$

$$К_{от2} = \frac{10}{2 \cdot I_{ном2}} = \frac{10}{2 \cdot 0{,}79} = 6{,}33$$

Коэффициент по магнитному потоку:

$$К_{f} = \frac{M_{max}}{I_{max}}, \tag{23}$$

где M_{max} – максимальный момент электродвигателя, Н*м;

I_{max} – максимальный ток электродвигателя, А.

$$К_{f1}=\frac{M_{max1}}{I_{max1}}=\frac{23,078}{3,65}=6,32$$

$$К_{f2}=\frac{M_{max2}}{I_{max2}}=\frac{22,428}{3,95}=5,68$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$К_{ос}=\frac{U_{max}}{\omega_{max}}, \qquad (24)$$

где U_{max} – максимальное напряжение управления, В;

ω_{max} – максимальная угловая скорость электродвигателя, рад/сек.

$$К_{ос1}=\frac{U_{max1}}{\omega_{max1}}=\frac{10}{180}=0,05$$

$$К_{ос2}=\frac{U_{max2}}{\omega_{max2}}=\frac{10}{120}=0,08$$

Коэффициент обратной связи по моменту:

$$К_{ом}=\frac{U_{max}}{M_{max}} \qquad (25)$$

$$К_{ом1}=\frac{U_{max1}}{M_{max1}}=\frac{10}{23,078}=0,433$$

$$К_{ом2}=\frac{U_{max2}}{M_{max2}}=\frac{10}{22,428}=0,446$$

Передаточная функция пропорционального регулятора скорости:

$$W_{PC} = \frac{J_{\Sigma} \cdot K_{от}}{4 \cdot K_f \cdot K_{ос} \cdot T_{\mu}} \tag{26}$$

$$W_{PC1} = \frac{J_{\Sigma 1} \cdot K_{от1}}{4 \cdot K_{f1} \cdot K_{ос1} \cdot T_{\mu}} = \frac{0{,}004554 \cdot 6{,}85}{4 \cdot 6{,}32 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}005} = 1{,}215$$

$$W_{PC2} = \frac{J_{\Sigma 2} \cdot K_{от2}}{4 \cdot K_{f2} \cdot K_{ос2} \cdot T_{\mu}} = \frac{0{,}005229 \cdot 6{,}33}{4 \cdot 5{,}68 \times 0{,}08 \cdot 0{,}005} = 0{,}88$$

Коэффициент-ограничитель блока ограничения:

$$U_{зм.max} = 10 \cdot \frac{M_{max}}{M_н}, \tag{27}$$

где $M_{ном}$ – номинальный момент электродвигателя, н*М.

$$U_{зм.max1} = 10 \cdot \frac{M_{max1}}{M_{н1}} = 10 \cdot [2{,}2] = 22$$

$$U_{зм.max2} = 10 \cdot \frac{M_{max2}}{M_{н2}} = 10 \cdot [2{,}1] = 21$$

Передаточная функция оптимизированного контура момента:

$$W_{ОКМ} = \frac{1/K_{ом}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} \tag{28}$$

$$W_{ОКМ1} = \frac{1/K_{ом1}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{1/0{,}433}{2 \cdot 0{,}005 \cdot p + 1} = \frac{2{,}3}{0{,}01 \cdot p + 1}$$

$$W_{ОКМ2} = \frac{1/K_{ом2}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1} = \frac{1/0{,}446}{2 \cdot 0{,}005 \cdot p + 1} = \frac{2{,}24}{0{,}01 \cdot p + 1}$$

Остальными исходными параметрами, необходимыми для построения математической модели типового режима работы электроприводов, являются значения времени работы/остановок электродвигателей, а так же данные с нагрузочных диаграмм, построенных в ходе подбора оборудования для реконструкции. Регуляторы скорости и блоки-ограничители реализованы на базе звеньев «PID-Controller», для реализации остальных элементов модели были использованы стандартные звенья. Общая реализованная математическая модель работы электроприводов рольгангов машины контроля состояния представлена на рисунке 11.

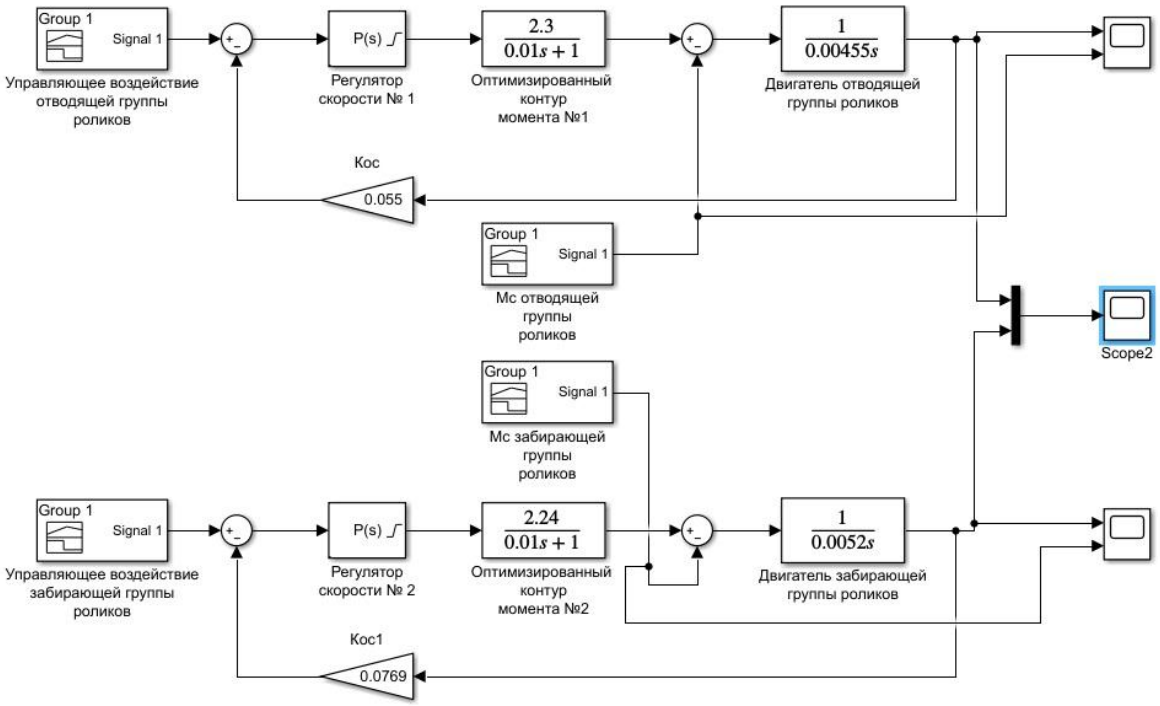


Рисунок 11 – Реализованная в среде Matlab математическая модель типового режима работы электроприводов исполнительных механизмов

Для оценки работы системы и понимания влияния нагрузки на итоговую величину регулируемой технологической координаты, приведем графики переходных процессов регулирования угловой скорости, а так же проанализируем качественные показатели системы автоматического регулирования скорости,

такие как величина перерегулирования и время протекания переходного процесса (длительность достижения установившегося значения регулируемой величины). Регулирование скоростей двух электроприводов осуществляется в разные временные промежутки посредством задания управляющего воздействия на каждый из двигателей рольгангов в зависимости от требований к технологическому процессу фасовки и последующего контроля состояния групповой упаковки.

Графики переходных процессов представлены на рисунках 12 и 13.

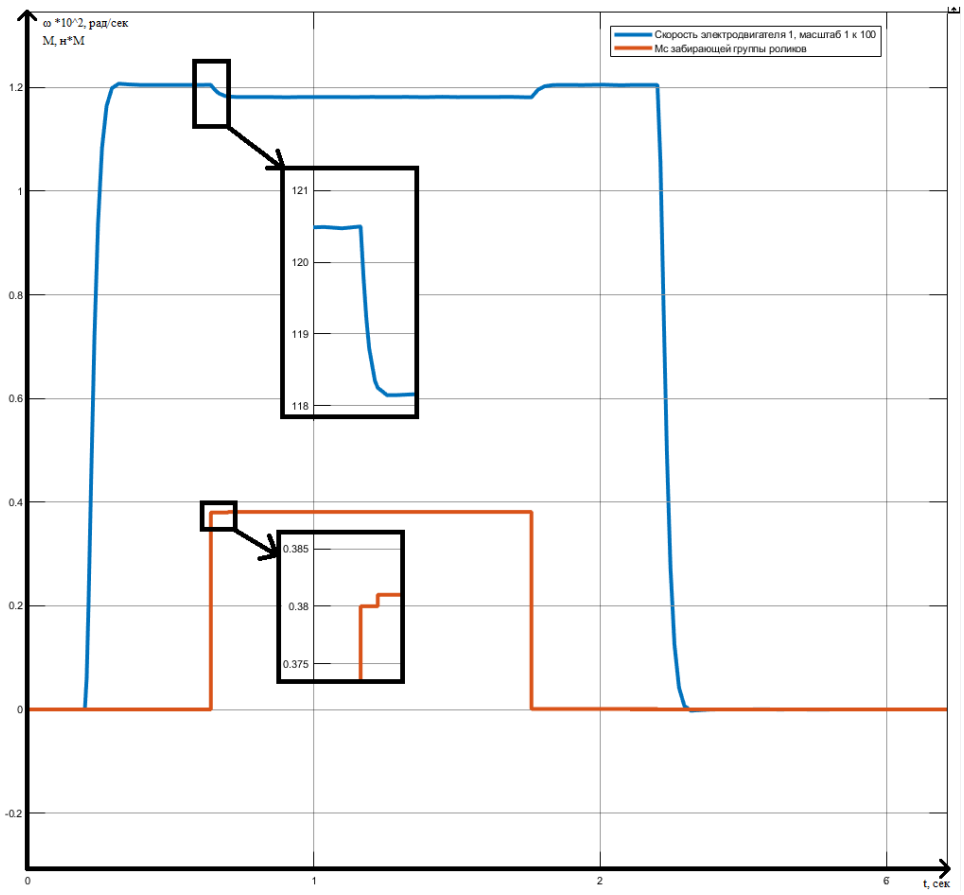


Рисунок 12 – Переходный процесс регулирования скорости забирающей группы роликов

Забирающая группа роликов – первый исполнительный механизм машины контроля состояния. Время первого достижения установившегося значения угловой скорости составляет 0,3 секунды (через 0,1 секунды начала переходного процесса), перерегулирование при этом фактически равно нулю, что

свидетельствует о плавности регулирования угловой скорости первого электропривода. Исходя из заданных требований (разгон до установившегося значения не более, чем за 0,44 секунды) и относительно небольшой величины перерегулирования при столь высоком быстродействии, можно сделать вывод о соответствии качества системы автоматического регулирования требуемому. При подводе к приводу нагрузки (появление на конвейере груза) регистрируется незначительное колебание скорости, что говорит о высокой устойчивости системы к возмущающим воздействиям и о ее способности бесперебойно функционировать во время выполнения технологического процесса.

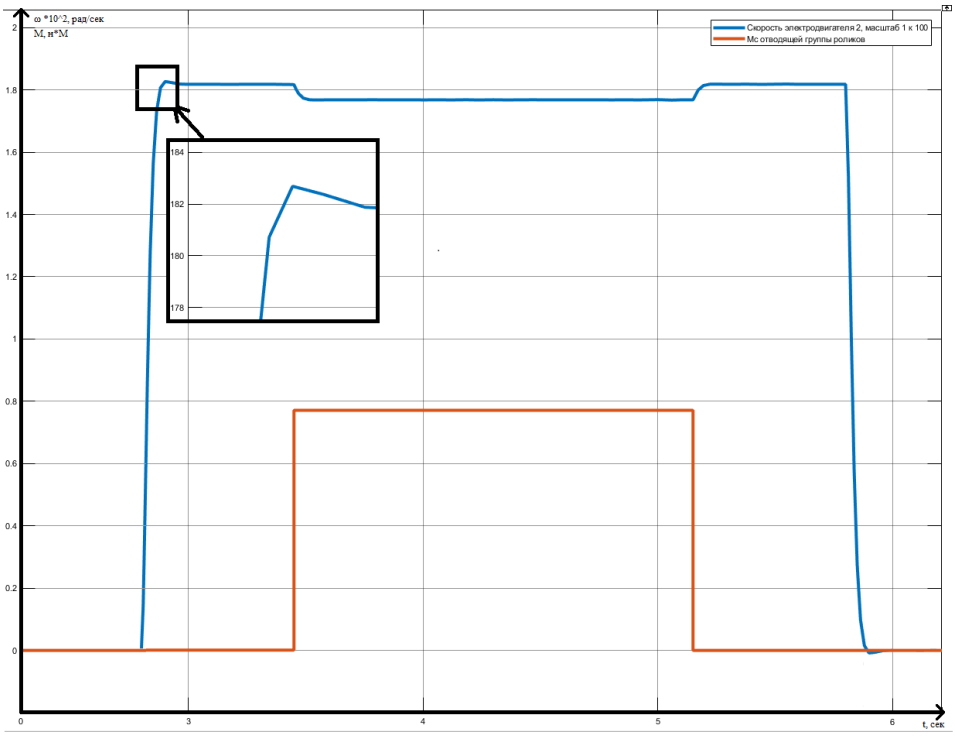


Рисунок 13 – Переходный процесс регулирования скорости отводящей группы роликов

Отводящая группа роликов – второй исполнительный механизм машины контроля состояния. Время первого достижения установившегося значения угловой скорости составляет 2,9 секунды (через 0,1 секунды начала переходного процесса), перерегулирование при этом составляет примерно 0,5% несмотря на запуск электропривода под нагрузкой. Исходя из заданных требований (разгон до

установившегося значения не более, чем за 0,65 секунды) и относительно небольшой величины перерегулирования при столь высоком быстродействии, можно сделать вывод о соответствии качества системы автоматического регулирования требуемому.

Итоговая циклограмма работы всей мехатронной системы представлена на рисунке 14.

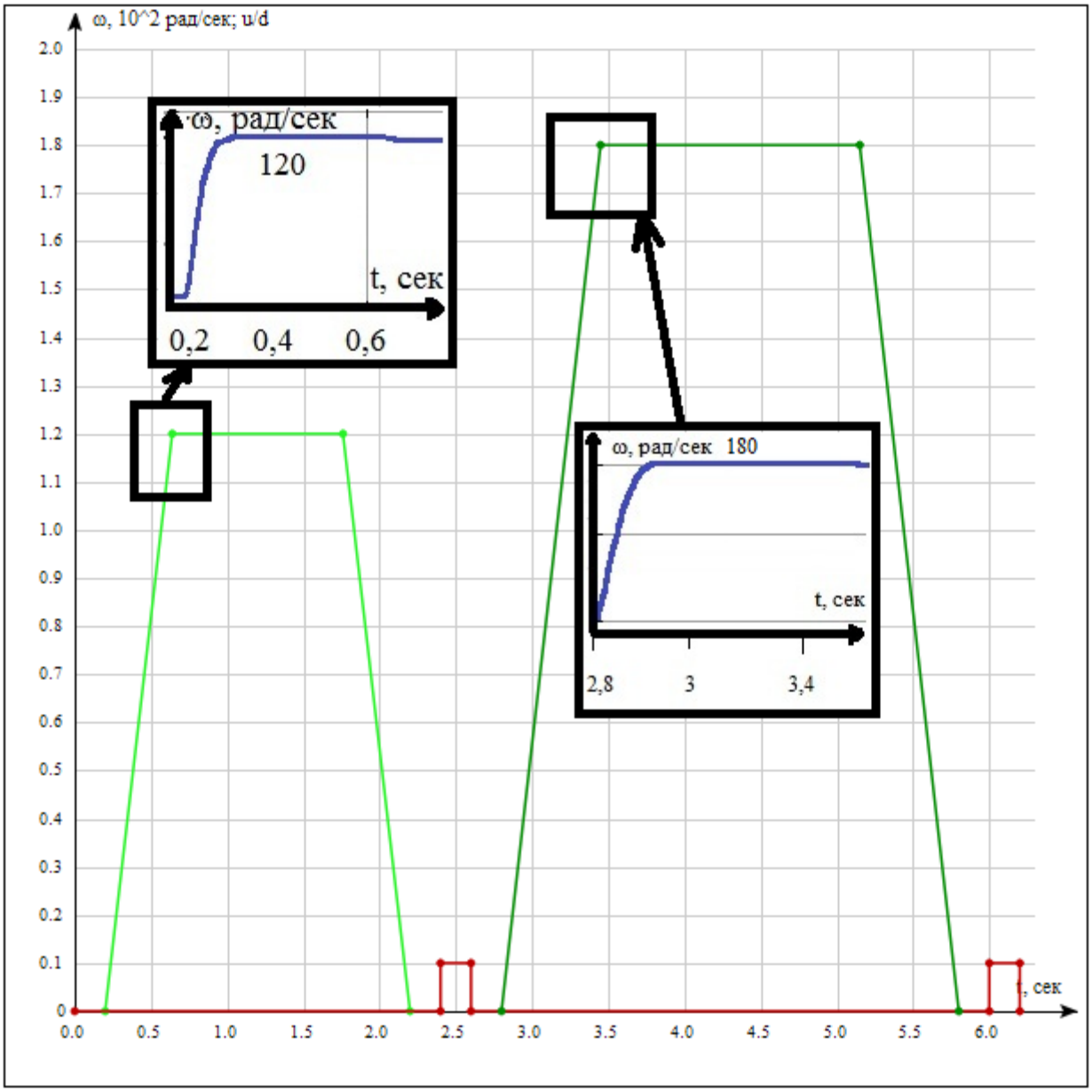


Рисунок 14 – Циклограмма технологического процесса контроля состояния

Одним из немаловажных параметров разрабатываемой системы регулирования является быстродействие электроприводов (способность в течение как можно меньшего времени реагировать на задание по изменению скорости сообразно задающему воздействию). Как видно на циклограмме, разгон обоих электроприводов до номинальных скоростей вращения осуществляется гораздо быстрее, чем заявлено технологическими требованиями, что в будущем позволит сократить время выполнения алгоритма технологического процесса, тем самым значительно повысить производительность фасовочных линий.

Сформулированные задачи для разрабатываемой системы управления мехатронной системы перемещения готовой продукции машины контроля состояния участка фасовки мягкой упаковки можно считать достигнутыми.

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

3.1 Краткая характеристика подразделения и выпускаемой продукции

Компания ООО «Ресурс» сегодня – современный переработчик зерна и производитель качественных круп и зерновых хлопьев. Она успешно систематизировала и опробовала десятки инструментов по росту категории круп и хлопьев в торговых точках разного формата [1].

Сегодня продукция компании поставляется как во все города России областного значения, так и за рубеж. Продукция компании представлена по всех федеральных сетях, что говорит о востребованности продукции конечными потребителями.

Ассортимент компании состоит из следующих позиций:

- Крупы в варочных пакетах ТМ «Увелка»;
- Крупы в мягкой упаковке ТМ «Увелка»;
- Мука гречневая ТМ «Увелка»;
- Хлопья зерновые ТМ «Увелка»;
- Смеси круп, овощей, грибов и специй «Домашние гарниры»;
- Каши овсяные быстрого приготовления ТМ «Увелка».

Крупы и хлопья компании выпускаются по техническим условиям, параметры которых превосходят требования ГОСТ. Компания работает по международному стандарту ГОСТ Р ИСО 22000-2007 «Система менеджмента безопасности пищевой продукции» и регулярно проходит технические аудиты на выявление соответствия производственных показателей государственным и международным стандартам качества.

Логистические характеристики выпускаемой продукции представлены в таблице 12 [1].

Таблица 12 – Логистические характеристики выпускаемой продукции

Наименование	Масса нетто 1 шт, г	Кол-во в гофроящике / термоусадке, шт	Масса нетто 1 гофроящика/ термоусадки, кг	Срок хранения, мес
Крупа в варочных пакетах (5х80г)	400	6	2,4	9-20
Крупы в мягкой упаковке	600-1500	6	3,6-9,0	9-20
Хлопья зерновые	350-400	6	2,1-2,4	12
«Домашние гарниры»	150-300	6-10	1,5-1,8	12
Каши овсяные	40-200	12-20	0,8-2,4	12
Крупы «Коллекция вкусов»	450-500	6	2,7-3,0	9-20

Логистические характеристики продукции отражают полный ассортимент фасуемых в мягкую упаковку и крой-коробки круп. Технико-экономический расчет будет производиться сообразно выпускаемой фасовочными линиями мягких упаковок продукции.

3.2 Расчет производственной программы цеха

Если за 2018 г. план крупоцеха ООО «Ресурс» по фасовке продукции в мягкую упаковку составлял 47416,32т, то фактический объем выпуска продукции

оказался равен 48384т. Реальный показатель превышает запланированный на 2%, что говорит о хороших показателях выработки крупы за отчетный год.

Для увеличения производительности реальной и расчетной, а так же для снижения себестоимости фасовки крупы в упаковку, необходимо добиться снижения времени выполнения каждого этапа всего технологического процесса, сократить время внеплановых простоев оборудования, снизить количество отбракованной продукции и минимизировать затраты расходных материалов при плановых остановках оборудования.

Для достижения вышеперечисленных факторов работники крупоцеха ООО «Ресурс» проводят ежесменное обслуживание и планово-предупредительные ремонты фасовочных линий, модернизации оборудования, разрабатывают и курируют проекты по увеличению качественных показателей производства и (в случае с обслуживающим оборудование персоналом) проходят обучение по повышению квалификаций.

Данные мероприятия помогают регулярно повышать реальные производственные показатели таким образом, что качество готовой продукции неизменно остается на высоком уровне.

Для оценки эффективности деятельности предприятия, в таблице 13 представлены технико-экономические показатели [23] участка фасовки в мягкую упаковку крупоцеха ООО «Ресурс» за 2018г.

Таблица 13 – Технико-экономические показатели участка фасовки МУ

Показатель	Планируемое значение	Фактическое значение
Фасовка крупы, т	47416,32	48384
Производительность, т/ч	13,44	13,44
Плановые остановки, ч	1440	1326,44
Технические простои, ч	360	381,78
Технологич. простои, ч	600	617,64

Себестоимость фасовки 1 тонны крупы в мягкую упаковку составляет 38750 рублей. Готовая продукция реализуется с наценкой в 6% от себестоимости, то есть по цене 41075 рублей. Выручка предприятия от реализации фактически произведенного продукта составит 1987 млн. рублей.

По данным из таблицы 3.2 можно сделать вывод, что превышение запланированного объема производства (фасовки продукции в упаковку) на 967,68т было достигнуто за счет снижения времени простоев на обязательные переходы с продукта на продукт и смену формата упаковки. Фактическая производительность сопоставима с планируемой по причине увеличения времени на обслуживание и ремонт оборудования и в связи с прочими остановками оборудования.

Расчет производственной программы цеха начинается с составления баланса времени работы упаковочного оборудования. При этом рассчитывается календарное, номинальное и фактическое время работы за год. Расчетными данными служат технико-экономические показатели из таблицы 13.

Линии фасовки продукции в мягкую упаковку, а, следовательно, и стоящее на них оборудование, эксплуатируются во всех режимах (как в рабочем, так и в режиме простоя) 247 суток/год, что в пересчете на часы составляет 5928ч.

Фактический годовой фонд работы машины контроля состояния участка фасовки в мягкую упаковку сопоставим с работой всего фасовочного оборудования за вычетом времени технических (включающих в себя время простоя сопряженного оборудования (каждый следующий агрегат линии стоит «на паузе», пока предыдущий не функционирует) (таблица 14)), технологических и плановых простоев всей линии.

В таблице сведены аппроксимированные простои всего технологического оборудования фасовки продукции в мягкую упаковку, располагающегося на пяти автоматизированных линиях (цель реконструкции – проработка возможности замены оборудования на всех линиях с последующим увеличением показателей качества.

Таблица 14 – Технические простои сопряженного оборудования

Причина	Длительность
Ремонт упаковочной машины Б3600	3 суток 17 часов 10 минут 40 секунд
Сбой в работе транспортной системы	2 суток 16 часов 54 минуты 5 секунд
Ошибка термотоннеля Ulma	8 часов 26 минут 8 секунд
Ремонт термотоннеля Ulma	52 минуты 50 секунд
Ремонт на подающем транспортере	4 часа 7 минут
Ремонт на отводящем транспортере	1 час 4 минуты 7 секунд

Фактический годовой фонд работы составляет:

$$T_{ф1}=T_{кал}-T_{план}-T_{т1}-T_{т2}, \quad (29)$$

где $T_{кал}$ – календарное время, ч;

$T_{план}$ – длительность плановых остановок, ч;

$T_{т1}$ – длительность технических простоев, ч;

$T_{т2}$ – длительность технологических простоев, ч.

$$T_{ф1}=5928-1326,44-381,78-617,64=3602,14ч.$$

Увеличение фактического времени работы установки возможно посредством снижения времени простоев по причине сбоев в работе транспортной системы, ошибок термотоннеля, ремонта на отводящем транспортере и уменьшения времени плановых остановок на 1%. В таком случае, годовой фонд работы будет равняться:

$$T_{ф2}=T_{кал}-T_{план}\cdot 0,99-(T_{т1}-74,40)-T_{т2}. \quad (30)$$

$$T_{ф2}=5928-1326,44\cdot 0,99-(381,78-74,40)-617,64=3689,80ч.$$

Машина контроля состояния не является производящим продукт агрегатом, но производит отбраковку геометрически некорректных брикетов (групповая упаковка, вмещающая в себя 6 пакетов с продукцией в мягкой упаковке), поступающих на выходе из термотоннеля. Производительность машины характеризуется ее среднечасовой пропускной способностью:

$$Q=3{,}6\cdot v\cdot\frac{m}{t_г}\ , \tag{31}$$

где v – линейная скорость движения брикета, м/с

m – масса одного брикета, кг

$t_г$ – шаг расположения грузов на конвейере, м

$$Q=\frac{3{,}6\cdot 0{,}341\cdot 4{,}8}{0{,}5}=11{,}78\ т.$$

Годовой объем «контролируемой» продукции до реконструкции:

$$W_{г1}=Q\cdot T_{ф1}=11{,}78\cdot 3602{,}14=42433{,}2\frac{т}{год}. \tag{32}$$

Годовой объем «контролируемой» продукции после реконструкции:

$$W_{г2}=Q\cdot T_{ф2}=11{,}78\cdot 3689{,}80=43465{,}84\frac{т}{год}. \tag{33}$$

Результат расчетов производственной программы цеха фасовки (линий фасовки готовой продукции в мягкую упаковку) представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Производственная программа цеха

Показатель	До реконструкции	После реконструкции
Годовой фонд t,ч	3602,14	3689,80
Годовой объем, т/год	42433,2	43465,84

Таблица наглядно отражает увеличение теоретически возможного годового фонда рабочего времени оборудования после проведения реконструкции, что положительно скажется на выпускаемом объеме продукции.

3.3 Расчет сметы капитальных затрат

Для определения экономической эффективности намеченных мероприятий необходимо определить сумму капитальных затрат на их внедрение.

Общая величина капитальных вложений включает суммарные затраты на приобретение, транспортировку и монтаж оборудования, и строительные работы:

$$К=Ц_{об}+Т_{р}+З_{смр}+З_{нр}, \quad (34)$$

где $Ц_{об}$ – общая стоимость оборудования, руб;

$Т_{р}$ – транспортные расходы (до 10% от общей стоимости оборудования), руб;

$З_{смр}$ – затраты на строительно-монтажные работы (до 15% от общей стоимости оборудования), руб;

$З_{нр}$ – непредвиденные расходы (до 5% от общей стоимости оборудования), руб.

В таблице 16 сведена стоимость монтируемого и демонтируемого с агрегата оборудования.

Таблица 16 – Стоимость оборудования

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, тыс.руб.	Общая стоимость, тыс.руб.
Новое оборудование			
Электродвигатель АИР56В2	5	2,958	14,79
Электродвигатель АИР63А4	5	3,264	16,32
Червячный редуктор NRV 030	10	3,685	36,85
Пневмоцилиндр Festo DSBC-32-50-PPSA-N3	5	3,233	16,165
Пневмораспределитель Festo VUVG-LK14-M52-AT-G18-1R8L-S	5	3,139	15,695
ПЧ Danfoss FC-051PK75T4	10	7,886	78,86
Прочее неучтённое оборудование	10%	–	17,868
Итого стоимость оборудования	–	–	196,548
Демонтируемое оборудование			
Электродвигатели sitipol	10	–	–
Контактор Eaton DILM7-01	10	1,041	10,41
Реверсивная блокировка Eaton DILM12-XMV	10	0,51	5,1
Контактор Eaton DILM7-10	5	1,036	5,18
Пневмоцилиндр camozzi 61m2p050a0050	5	3,902	19,51
Пневмораспредитель Festo VUVG-LK10-M52-AT-M5-1H2LS	5	2,054	10,27
Прочее неучтённое оборудование	10%	–	5,047
Итого стоимость оборудования	–	–	55,517

Перечень необходимого оборудования устанавливается на основании спецификации. Цены на основное оборудование принимаются из прейскуранта оптовых цен, предоставленных производителями.

Стоимость неучтенного оборудования (кабели, проводка и прочее мелкое оборудование) принимается в размере 10% от стоимости учтенного оборудования.

Затраты на монтаж $З_{смр}$, транспортные расходы $Т_р$ и резерв на непредвиденные расходы $З_{нр}$ принимаются как максимально возможные (15, 10 и 5% соответственно):

$$З_{смр}=Ц_{об} \cdot 0,15=196548 \cdot 0,15=29482 \text{ руб.} \quad (35)$$

$$Т_р=Ц_{об} \cdot 0,1=196548 \cdot 0,1=19654 \text{ руб.} \quad (36)$$

$$З_{нр}=Ц_{об} \cdot 0,05=196548 \cdot 0,05=9827 \text{ руб.} \quad (37)$$

Согласно формуле, общая величина капитальных вложений составит:

$$К=196548+29482+19654+9827=255511 \text{ руб.} \quad (38)$$

Демонтируемое оборудование может найти применение в качестве материала для обучения вновь нанимаемого на предприятие персонала (в том числе студентов-практикантов), так как его ресурс еще не выработан.

3.4 Расчет РСЭО

Эксплуатационные расходы, связанные с работой электрооборудования, состоят, как правило, из следующих видов затрат:

а) потерь электроэнергии (Э);

б) амортизационных отчислений (А);

в) затрат на ремонты и обслуживание электрооборудования ($С_{тр}$).

Таким образом, затраты на эксплуатацию системы электропривода (С) можно рассчитать по формуле:

$$С=Э+А+С_{тр}. \quad (39)$$

Эксплуатационные расходы рассчитываются за год.

Расчёт потерь электроэнергии определяется умножением себестоимости 1 кВт·ч энергии на количество потребляемой электроприводом энергии в течении года.

Стоимость потерь электроэнергии рассчитывается по формуле:

$$Э=Р \cdot Т_{ф} \cdot Ц_{э}, \quad (40)$$

где Р – суммарная потребляемая монтируемыми электроприводами мощность, составляющая 2,5 кВт.

$Т_{ф}$– фактическое время работы электрооборудования за год, ч;

$Ц_{э} = 3{,}5$ руб – себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

$$Э=Р \cdot Т_{ф} \cdot Ц_{э}=2{,}5 \cdot 3689{,}8 \cdot 3{,}5=32285{,}75 \text{ руб.}$$

Расчёт годовой суммы амортизационных отчислений производится на основе капитальных затрат на оборудование и нормы амортизации для него [24].

Норма амортизации для оборудования составляет:

$$Н_{а}=\frac{100}{Т_{а}}=\frac{100}{15}=6{,}67\%, \quad (41)$$

где $Н_{а}$ – норма амортизации оборудования, %;

T_a – нормативный срок службы оборудования, равный 15-ти годам для оборудования 7 амортизационной группы, лет.

Сумма амортизации нового устанавливаемого оборудования определяется как:

$$A=\frac{K \cdot H_a}{100}=\frac{255511 \cdot 6,67}{100}=17042 \text{ руб.} \quad (42)$$

Величина затрат на ремонты и обслуживание электрооборудования складывается из множества показателей, таких как стоимость энергии всех видов, материалов, запасных частей, инструментов, инвентаря и заработной платы ремонтного и дежурного персонала.

Из множества этих элементов прямому счёту в рамках дипломного проекта поддаётся только заработная плата. Доля затрат на содержание основных средств, принимается равной k = 0,2.

Тогда величина затрат на ремонт нового оборудования составит:

$$C_{тр}=k \cdot A=0,2 \cdot 17042,58=3408,51 \text{ руб.} \quad (43)$$

Таким образом, сумма годовых затрат на эксплуатацию системы электропривода составит:

$$C=Э+A+C_{тр}=32285,75+17042+3408,51=52736,26 \text{ руб.} \quad (44)$$

3.5 Расчет затрат на материалы и оплату труда со страховыми отчислениями

Из-за отсутствия необходимости в закупке дополнительных материалов (чья стоимость включается в сумму капиталовложений) и в найме дополнительного персонала (в штате предприятия числится большое количество персонала,

обслуживающего электрооборудование), вести расчет затрат на материалы и оплату труда со страховыми отчислениями считается нецелесообразным.

3.6 Расчет прибыли и показателей рентабельности

Прибыль (TR) является важнейшей составляющей показателя эффективности работы предприятия. Она определяется разностью выручки и затратами на производство.

Себестоимость – это стоимостное выражение суммы всех затрат, которые несет предприятие при производстве, хранении и сбыте продукции. А чистая прибыль является основным и главным показателем деятельности организации, на который она влияет.

Для оценки вклада в прибыль модернизируемого привода, получаемую от всех агрегатов, которые участвуют в технологическом процессе, необходимо определить чистую прибыль, которая приходится на долю машины контроля состояния [25].

По данным технологического задания себестоимость фасовки 1 тонны крупы в мягкую упаковку составляет 38750 руб. Готовая продукция реализуется с наценкой в 6% от себестоимости, то есть по цене 41075 рублей за 1 тонну.

Тогда за годовой объем производства в 43465,84 тонн выручка цеха от реализации изготовленной продукции составит:

$$В=41075 \cdot 43465,84=1786 \text{ млн руб}, \quad (45)$$

где 43465,84 – годовой объем производства в тоннах;

41075 – цена в рублях реализации продукции за тонну.

Себестоимость годового объема продукции составляет:

$$С_г=38750 \cdot 43465,84=1684 \text{ млн руб}. \quad (46)$$

Годовая прибыль ООО «Ресурс» (выручка за вычетом себестоимости) от реализации крупы, фасованной в мягкую упаковку, составит:

$$П=1758-1684= 102 \text{ млн руб.} \quad (47)$$

Налог на прибыль составляет 20%:

$$Н_{пб=}102 \cdot 0,2=20,4 \text{ млн руб.} \quad (48)$$

Годовая чистая прибыль, получаемая от реализации произведенной продукции, определяется вычитанием налогов на прибыль из прибыли от реализации продукции:

$$П_ч=102-20,4=81,6 \text{ млн руб.} \quad (49)$$

Расчет прибыли предприятия до модернизации проведем аналогично:

$$В=41075 \cdot 42433,20=1742 \text{ млн руб.}$$

$$С_г=38750 \cdot 42433,20=1644 \text{ млн руб.}$$

$$П=1742-1644= 98 \text{ млн руб.}$$

$$Н_{пб=}98 \cdot 0,2=19,6 \text{ млн руб.}$$

$$П_ч=98-19,6=78,4 \text{ млн руб.}$$

Рентабельность – это доходность предпринимательской деятельности или предприятия. Под этим термином понимают интенсивность производства, поскольку она показывает уровень прибыльности предприятия по отношению к определенной базе. Предприятие тогда будет считаться рентабельным, если выручка от реализации продукции будет достаточна не только на покрытие производственных и реализационных затрат, но и позволит образовать прибыль.

Рентабельность продукции определяется отношением годовой прибыли от реализации продукции цеха к себестоимости реализованного годового объема продукции:

$$P=\frac{81,6}{1684}=5\%. \qquad (50)$$

3.7 Расчет срока окупаемости проекта

Срок окупаемости – время, необходимое для получения дохода после затрат, вложенных на инвестиции. Доля, занимаемая рассматриваемой установкой в общецеховой прибыли, составляет 0,04 или 4%. В таком случае, разница в прибыли, принесенная установкой после модернизации, составит:

$$П_{ч_{пм}}-П_{ч_{дм}}=\left(П_{ч_2}-П_{ч_1}\right)\cdot 0,04=\left(81,6-78,4\right)\cdot 0,04=0,128 \text{ млн руб.} \qquad (51)$$

Тогда срок окупаемости проекта составит:

$$T=\frac{K}{\left(П_{ч_{пм}}-П_{ч_{дм}}\right)}=\frac{255511}{128000}\approx 2 \text{ года.} \qquad (52)$$

3.8 Составление сводной таблицы технико-экономических расчетов

На основании проведенного технико-экономического расчета всех показателей, составим сводную таблицу (таблица 17), наглядно отражающую их изменения, проанализировав отклонения в расчетных величинах, сделаем выводы о целесообразности капиталовложений в реконструкцию машины контроля состояния участка готовой продукции участка фасовки мягкой упаковки.

Таблица 17 – Сводная таблица технико-экономических расчетов

Показатель	До реконструкции	После реконструкции	Δ
Годовой объем производства, т	42433,20	43465,84	1032,64
Фактическое время работы, ч	3602,14	3689,80	87,66
Годовая выручка, млн. руб/год	1742	1786	44
Капитальные вложения, тыс.руб.	–	255,511	255,511
Эксплуатационные затраты, руб/год Всего в том числе: • Потери электроэнергии; • Амортизация; • Текущий ремонт и содержание		52736,26 32285,73 17042 3408,51	
Себестоимость единицы продукции, тыс.руб/т	38750	38750	0
Прибыль от реконструкции (приходящаяся на долю агрегата), тыс.руб	–	128	–
Рентабельность, %	–	5	–
Срок окупаемости, лет	–	2	–

Годовая выручка предприятия при проведении реконструкции возрастает на 44 млн. руб в год посредством сокращения времени простоев оборудования (увеличение фактического времени работы). Капиталовложения на реконструкцию (255 тыс. руб) окупятся предприятию через 2 календарных года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были проведены расчеты по реконструкции мехатронной системы перемещения готовой продукции машины контроля состояния участка фасовки мягкой упаковки ООО «Ресурс».

Был рассмотрен технологический процесс фасовки готовой продукции в индивидуальную и групповую мягкую упаковку, сформулированы требования к электроприводам и системе автоматизации, на основании которых проведен расчет и выбор оборудования, обеспечивающего работу исполнительных механизмов (рольгангов), их силовое оборудование (преобразователи частоты, защитные устройства), а так же выполнены проверки выбранных электродвигателей на возможность работы при перегреве и перегрузках.

Разработанная система автоматического регулирования координат проектируемого агрегата оказалась устойчивой и удовлетворяющей предъявленные требования. Перерегулирование угловой скорости для обоих электроприводов составило менее 1% при значительно более высокой скорости разгона, нежели заявлено.

Был проведен технико-экономический расчет совершаемой реконструкции, в числе операций которого: расчет производственной программы цеха, сметы капитальных затрат, эксплуатационных затрат, а так же расчет прибыли и срока окупаемости от внедрения проекта в производство. За счет увеличения годового фонда рабочего времени оборудования (снижение времени простоев) соответствующим образом повысится производственная мощность предприятия, что положительно скажется на приносимой чистой прибыли. При капиталовложениях, составляющих 255 тысяч рублей, срок окупаемости проекта сообразно прибыли, приходящейся на долю реконструируемой установки, составляет 2 календарных года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 ООО «Ресурс», компания «Увелка» - https://uvelka.ru/about.html

2 Упаковочное оборудование «Бестром» - https://bestrom.ru/by_type

3 Маркировочное оборудование «Маркем Имаж» - https://ru.markem-image.com

4 Термотоннель Ulma «TR 65*100 (H-400)» - http://www.bestrom.ru/product/termotonnel-ulma-tr-65/

5 ФЛЕКС-РУС. Автоматизированная транспортная система: инструкция по эксплуатации / ФЛЕКС-РУС, 2018 – 6 с.

6 ФЛЕКС-РУС. Низковольтные комплектные устройства: паспорт / ФЛЕКС-РУС, 2017 – 55 с.

7 Борисов А.М. Основы построения промышленных сетей автоматики: учебное пособие / А.М. Борисов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. – 108 с.

8 Асинхронные электродвигатели АИР – http://www.esbk.ru/prodinfo_ed.html

9 Редуктор червячный NRV 030 – https://tehprivod.su/katalog/reduktory/chervyachnye-reduktory/nrv/030.html

10 Пневмо-аппаратура «Фесто» - https://www.festo.com/cat/ru_ru/products

11 Герасимов В.Г. Электротехнический справочник. Том 4 / В.Г. Герасимов. – М.: Изд-во МЭИ, 2004, - 696 с.

12 Лукин А.В., Косматов В.И. Преобразователь частоты для асинхронных электроприводов / А.В. Лукин. – Магнитогорск: Издательский центр МГТУ им. Г.И. Носова, 2005. – 49 с.

13 Преобразователь частоты Danfoss FC-051PK74T4 – http://files.danfoss.com/download/Drives/MG02BC50.pdf

14 Выбор силовых элементов системы. – https://studbooks.net/2111382/matematika_himiya_fizika/vybor_silovyh_elementov_sistemy.

15 Автомат защиты двигателей PKZM01-1,6 - http://www.eaton.ru/EatonRU/ProductsServices/Electrical/index.htm

16 Архитектура автоматической системы управления технологическим процессом. – http://arman-engineering.ru/info_center/articles/654

17 Программное обеспечение для автоматизированной системы управления технологическим процессом WonderWare – https://www.wonderware.ru/hmi-scada/

18 Siemens S7-1200 Программируемый логический контроллер - https://www.siemens-pro.ru/components/s7-1200.htm

19 Блок питания MeanWell SDR-120-24 - https://www.siemens-pro.ru/components/s7-1200.htm

20 Датчики фотоэлектрические Sick - https://www.sick.com/ru/ru/c/products

21 Датчики оптические TEKO - https://teko-com.ru/katalog/opticheskie-datchiki/

22 Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями: учебное пособие для вузов / О.В. Слежановский, Л.В. Дацковский. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 253 с.

23 Кучина Е.В. Экономика организации: учебное пособие / Е.В. Кучина. – Челябинск, 2017. – 52 с.

24 Расчет РСЭО. – https://studbooks.net

25 Расчет капитальных вложений . – https://bank-explorer.ru