

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

|   |
|---|
| Тема работы   |
| <b>Частотно-регулируемый электропривод подъемного механизма</b> |

УДК 62-83-523:621.86/.87

Студент

| Группа | ФИО                         | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 5A97   | Климкин Григорий Алексеевич |         |      |

Руководитель ВКР

| Должность      | ФИО                       | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------|---------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЭЭ ИШЭ | Кладиев Сергей Николаевич | К.Т.Н.                 |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Концепция стартап-проекта»

| Должность               | ФИО                         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП<br>ТПУ | Ермушко Жанна Александровна | К.Э.Н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность             | ФИО                         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Черемискина Мария Сергеевна | -                      |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель ООП | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОЭЭ ИШЭ   | Тютеева П.В. | К.Т.Н.                 |         |      |

| 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника<br>Промышленная электротехника и автоматизация<br>Электропривод и автоматика |  |
|--|--|
| Код компетенции<br>СУОС  | Наименование компетенции СУОС  |
| <b>Универсальные компетенции</b>   |  |
| УК(У)-1  | Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач   |
| УК(У)-2  | Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений   |
| УК(У)-3  | Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде  |
| УК(У)-4  | Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)  |
| УК(У)-5  | Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах   |
| УК(У)-6  | Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни  |
| УК(У)-7  | Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности   |
| УК(У)-8  | Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов |
| УК(У)-9  | Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи  |
| УК(У)-10   | Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности   |
| УК(У)-11   | Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению   |
| <b>Общепрофессиональные компетенции</b>  |  |
| ОПК(У)-1   | Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности  |
| ОПК(У)-2   | Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения  |
| ОПК(У)-3   | Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач  |
| ОПК(У)-4   | Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин   |
| ОПК(У)-5   | Способен использовать свойства конструкционных и электротехнических материалов в расчетах параметров и режимов объектов профессиональной деятельности  |
| ОПК(У)-6   | Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин применительно к объектам профессиональной деятельности  |
| <b>Профессиональные компетенции университета</b>   |  |
| ПК(У)-1  | Способен анализировать параметры и требования, а также характеристики нагрузки, как основы технического задания для проектирования электроприводов и их компонентов  |
| ПК(У)-2  | Способен осуществлять сбор информации для решения проектных задач, поиск и систематизацию технико-экономических показателей существующих технических решений, их предварительный анализ  |
| ПК(У)-3  | Способен проводить проектирование отдельных узлов низковольтных комплектных устройств и электропривода в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных методов  |
| ПК(У)-4  | Способен проверять техническое состояние электротехнического оборудования, проводить профилактический осмотр и текущий ремонт по заданной методике   |
| ПК(У)-5  | Способен осваивать электротехническое оборудование по имеющейся технической документации   |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная Школа Энергетики  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение электроэнергетики и электротехники  
 Специализация Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Тютеева П.В.  
 (Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                     |
|---------------------|
| Бакалаврской работы |
|---------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО                         |
|--------|-----------------------------|
| 5A97   | Климкин Григорий Алексеевич |

Тема работы:

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <b>«Частотно-регулируемый электропривод подъемного механизма»</b> |                            |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                       | от 29.05.2023 г. №149-58/с |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

|  |
|--|
|  |
|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Исходные данные к работе</b><br/> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <p>Объектом исследования является технология охлаждения раскаленного кокса в технологическом процессе металлургического производства</p> |
|---|--|

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br/> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор технической литературы, содержащий описание технологического процесса металлургического производства;</li> <li>2. Расчет статических характеристик асинхронного двигателя;</li> <li>3. Исследование динамических характеристик электропривода;</li> <li>4. Моделирование силовой системы электропривода;</li> <li>5. Проработка разделов концепции стартап-проекта и социальной ответственности;</li> <li>6. Провести соответствующие выводы по данной работе.</li> </ol> |
|--|---|

|  |                           |
|--|---------------------------|
| <p><b>Перечень графического материала</b><br/> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <p><b>Презентация</b></p> |
|--|---------------------------|

|   |                           |
|---|---------------------------|
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br/> <i>(с указанием разделов)</i></p> |                           |
| <p><b>Раздел</b></p>  | <p><b>Консультант</b></p> |
| <p>Основной раздел ВКР</p>  | <p>Кладиев С.Н.</p>       |
| <p>Концепция стартап-проекта</p>  | <p>Ермушко Ж.А.</p>       |
| <p>Социальная ответственность</p>   | <p>Черемискина М.С.</p>   |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p> |  |
|--|--|

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

| Должность         | ФИО                              | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|---------|------|
| <p>Доцент ОЭЭ</p> | <p>Кладиев Сергей Николаевич</p> | <p>К.Т.Н.</p>          |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа      | ФИО                                | Подпись | Дата |
|-------------|------------------------------------|---------|------|
| <p>5А97</p> | <p>Климкин Григорий Алексеевич</p> |         |      |

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника Уровень образования: бакалавр  
Отделение Электроэнергетики и электротехники Период выполнения: осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**

**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)        | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|--|------------------------------------|
| 21.02.23      | Анализ исходных данных для исследования                      | 5                                  |
| 25.02.23      | Описание технологического процесса                           | 10                                 |
| 04.03.23      | Описание механизма подъема                                   | 10                                 |
| 14.03.23      | Расчет параметров схемы замещения и характеристик двигателя. | 15                                 |
| 29.03.23      | Построение динамических характеристик АД                     | 10                                 |
| 10.04.23      | Имитационная модель ПЧ-АД                                    | 15                                 |
| 15.04.23      | Имитационная модель активного выпрямителя напряжения         | 15                                 |
| 26.04.23      | Концепция стартап-проекта.                                   | 10                                 |
| 11.05.23      | Социальная ответственность                                   | 10                                 |
|               |  | 100                                |

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

| Должность | ФИО                       | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Кладиев Сергей Николаевич | к.т.н., доцент         |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

| Должность | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Тютёва П.В. | к.т.н., доцент         |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  |
| 5A97          | Климкин Григорий Алексеевич |

|                            |             |                    |  |
|----------------------------|-------------|--------------------|--|
| <b>Школа</b>               | <b>ИШЭ</b>  | <b>Направление</b> | 13.03.02 Электроэнергетика<br>и электротехника |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат |                    |  |

| <b>Перечень вопросов, подлежащих разработке:</b>   |   |
|--|---|
| <i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР</i> | Активный выпрямитель напряжения<br>Энергосбережение и повышение энергетических показателей<br>Проблема: Отсутствие возврата в сеть избыточной энергии при спуске груза. |
| <i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>   | Коммерческая тайна  |
| <i>Объем и емкость рынка</i>   | Объем российского рынка: 114,3 млрд. руб.   |
| <i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>         | Основой перспективного роста продаж АВН служит меньшая цена продукта относительно иностранных аналогов и заинтересованность предприятий в энергосбережении.             |
| <i>Себестоимость продукта</i>  | 603000 рублей   |
| <i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>   | Более низкая стоимость устройства относительно иностранных аналогов;<br>Отечественное производство;<br>Отсутствие конкурентов на российском рынке.                      |
| <i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>            | На основании конкурентных преимуществ   |
| <i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>   | Строительная отрасль, металлургия и машиностроение  |
| <i>Бизнес-модель проекта</i>   | Модель по А. Остервальду и И. Пинье   |
| <i>Производственный план</i>   | 2 шт. в месяц   |
| <i>План продаж</i>   | 2 шт. в месяц   |
| <b>Перечень графического материала:</b>  |   |
| <i>При необходимости представить эскизные графические материалы</i>  | Модель по А. Остервальду и И. Пинье, таблицы расчета бюджета проекта  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

| Должность | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|------------------------|---------|------|
| доцент    | Ермушко Ж.А. | к.э.н.                 |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО          | Подпись | Дата |
|--------|--------------|---------|------|
| 5A97   | Климкин Г.А. |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

|                            |                             |                                  |   |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| <b>Группа</b>              |                             | <b>ФИО</b>                       |   |
| 5A97                       |                             | Климкину Григорию Алексеевичу    |   |
| <b>Школа</b>               | Инженерная школа энергетики | <b>Отделение (НОЦ)</b>           | Электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавр                    | <b>Направление/специальность</b> | Электроэнергетика и электротехника          |

Тема ВКР:

|   |  |
|---|--|
| Частотно-регулируемый электропривод подъемного механизма  |  |
| <b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>  |  |
| <p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>- Описание рабочей зоны (рабочего места) при эксплуатации</li> </ul>                              | <p><i>Объект исследования: <u>Подъемная лебедка коксового вагона установки тушения кокса</u>;</i><br/> <i>Область применения: <u>Энергетическая отрасль</u>;</i><br/> <i>Рабочая зона: <u>производственное помещение</u></i><br/> <i>Размеры <u>20x20x20м</u> помещения.</i><br/> <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны: <u>электродвигатели(4шт.), редукторы(2шт.), барабан(1шт.), активный выпрямитель напряжения(1шт.)</u>.</i><br/> <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: <u>подъем и спуск вагона установки тушения кокса с помощью лебедки</u>.</i></p>  |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:  |  |
| <p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>ГОСТ 12.2.033-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.</i></li> <li>- <i>ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора.</i></li> <li>- <i>Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</i></li> <li>- <i>ГОСТ 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования.</i></li> <li>- <i>ТК РФ. Глава 15. Рабочее время. Общие положения;</i></li> </ul>   |
| <p><b>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> </ul>  | <p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Высокий уровень шума</li> <li>- Вибрация выше установленной нормы</li> <li>- Недостаток естественного света</li> <li>- Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны</li> </ul> <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Поражение электрическим током</li> <li>- Травмирование персонала вращающимися частями электродвигателей и механизмов</li> </ul> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Защитные диэлектрические перчатки</li> <li>- Каски, специальная одежда (комбинезон)</li> <li>- Защитные очки</li> <li>- Защитное заземление, ограждения и таблички</li> </ul> |

|  |  |
|--|--|
|  | - Устройства защитного отключения  |
| <b>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</b>            | <i>Воздействием на селитебную зону являются отходы, которые образуются в ходе эксплуатации различного электротехнического оборудования.<br/>Вредные выбросы в атмосферу – выбросы в атмосферу некоторых продуктов сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива, к примеру таких как зола.<br/>Вредные выбросы в литосферу – бытового мусор, отработанные лампы, электротехнические устройства, выработавшие свой ресурс.<br/>Вредные выбросы в гидросферу – жидкие отходы в результате пользования водопроводом.</i> |
| <b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</b> | Возможные ЧС полное или частичное обрушение конструкции здания при природных бедствиях.<br>Наиболее типичной ЧС являются пожар.  |
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику             |  |

**Задание выдал консультант:**

| Должность         | ФИО                         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Ст. преподаватель | Черемискина Мария Сергеевна | -                      |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                         | Подпись | Дата |
|--------|-----------------------------|---------|------|
| 5A97   | Климкин Григорий Алексеевич |         |      |

## РЕФЕРАТ

Представленная выпускная квалификационная работа содержит 83 страницы, 10 таблиц, 35 рисунков и 1 лист приложения.

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросам разработки частотно-регулируемого электропривода подъёмного механизма для установки сухого тушения кокса.

В качестве базового электропривода был принят серийно выпускаемый преобразователь частоты и модуль рекуперации марки *ALTIVAR*, фирмы *Schneider Electric*, и электродвигатель *1LG4318-8AB-Z* фирмы *Siemens*.

В выпускной квалификационной работе был разработан и спроектирован электропривод подъема с применением АВН для повышения энергетических показателей и энергосбережения. В ходе проектирования, с помощью *Mathcad* были рассчитаны параметры схемы замещения АД, на основе этого были получены естественные и искусственные механические и электромеханические характеристики. После чего для оценки адекватности работы электрической машины с помощью переходных процессов, было произведено моделирование электродвигателя в осях  $\alpha$ ,  $\beta$  и блока АД из библиотеки *SimPowerSystems*.

Далее была построена силовая часть и система управления электропривода, причем у АВН осуществлено векторное управление, а у ПЧ – скалярное. В результате были продемонстрированы графики при потреблении активной мощности из сети и при рекуперации реактивной мощности в сеть, что свидетельствует о правильности выполненной работы.

Помимо этого, в работе рассмотрены вопросы экономики и техники безопасности.

## Список принятых сокращений

- АВН – активный выпрямитель напряжения;
- АД – асинхронный двигатель;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- ВРК – вагон раскаленного кокса;
- ЗПТ –звено постоянного тока;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ПЧ –преобразователь частоты;
- САУ ЭП –система автоматического управления электропривода;
- УСТК – установка сухого сушения кокса;
- ХХ – холостой ход;
- ШИМ –шиотно-импульсная модуляция;
- ЭДС –электродвижущая сила;
- ЭП–электропривод.

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....   | 13 |
| <b>1. ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА, ХАРАКТЕРИСТИКИ</b> .....  | 14 |
| 1.1. Кинематическая схема .....   | 18 |
| 1.2. Система управления без АВН.....  | 22 |
| 1.3. Активный выпрямитель напряжения .....  | 23 |
| 1.4. Краткое описание работы функциональной схемы.....  | 26 |
| 1.5. Внешний вид электропомещения и датчики .....   | 27 |
| 1.6. Временная диаграмма подъемника .....   | 28 |
| <b>2. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ПОДЪЕМА</b> .....   | 29 |
| <b>3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АД</b> .....  | 30 |
| 3.1 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик АД..... | 36 |
| <b>4. ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД</b> .....                                      | 43 |
| <b>5. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЧ-АД</b> .....   | 50 |
| <b>6. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....                          | 53 |
| <b>7. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА</b> .....   | 58 |
| 7.1. Проблема конечного потребителя.....  | 58 |
| 7.2. Защита интеллектуальной собственности .....  | 59 |
| 7.3. Объем и емкость рынка .....  | 60 |
| 7.4. Современное состояние и перспективы отрасли .....  | 60 |
| 7.5. Конкурентные преимущества разрабатываемого продукта .....                                | 62 |
| 7.6. Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта.....                                 | 62 |
| 7.7. Планируемая стоимость продукта.....  | 63 |
| 7.8. Бизнес-модель проекта .....  | 63 |
| 7.9. Производственный план и план продаж.....   | 64 |
| 7.10. Стратегия продвижения продукта на рынок .....   | 65 |
| <b>8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ</b> .....  | 67 |
| 8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....                         | 67 |
| 8.2. Производственная безопасность.....   | 68 |
| 8.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов .....                                 | 69 |

|   |           |
|---|-----------|
| 8.3.1. Высокий уровень шума .....   | 69        |
| 8.3.2. Вибрация выше установленной нормы.....   | 70        |
| 8.3.3. Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны .....                                 | 71        |
| 8.3.4. Поражение электрическим током.....   | 72        |
| 8.3.5. Травмирование персонала вращающимися частями электродвигателей<br>и механизмов ..... | 73        |
| 8.4. Экологическая безопасность.....  | 74        |
| 8.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....   | 75        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>78</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>   | <b>80</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>  | <b>83</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

В наши дни на металлургическом производстве все чаще стараются автоматизировать технологический процесс, активно используя при этом различные системы и элементы электрооборудования. Важную роль в этом отведена электроприводу, который позволяет с большей точностью и повышенным качеством выпускать готовые изделия, причем за более короткий промежуток времени и при меньшем количестве рабочего персонала.

Активно автоматизацией технологических процессов занимаются на предприятии ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», на котором для охлаждения раскालённого сырья применяется установка сухого сушения кокса (УСТК). Данный элемент технологического процесса имеет в своем составе электропривод передвижения и подъема, последний из них в конкретной работе необходимо всесторонне исследовать, рассчитать и смоделировать, а также оптимизировать процесс для экономии электроэнергии—это и будет целью выполнения выпускной квалификационной работы.

Технология охлаждения раскаленного кокса в технологическом процессе металлургического производства объектом исследования. Предметом исследования является механизм электропривода подъема установки сухого тушения кокса (УСТК). Результаты полученные в ходе выполнения работы могут быть применены не только в металлургическом производстве, но и в других отраслях жизнедеятельности, где присутствует активный момент.

В процессе выполнения работы было произведено моделирование силовой части и системы управления частотно-регулируемого электропривода подъема с применением активного выпрямителя напряжения, по рассчитанным ранее параметрам схемы замещения АД. Электротехническое устройство—АВН применяется на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат».

## 1. ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА, ХАРАКТЕРИСТИКИ

На предприятии ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» для тушения горячего кокса используется установка сухого тушения кокса (УСТК), в которой применяются несколько механизмов, для подъема и спуска груза и передвижения. В данной работе будет рассмотрен механизм электропривода подъема [1].

Полный принцип получения горячего кокса можно описать следующим образом, Угольная шихта поступает в коксовый цех из цеха углеподготовки по конвейерам на угольные башни. Из угольной башни шихта загружается в углезагрузочные вагоны, затем шихта выгружается в камеры коксования через специальные люки, которые закрываются герметично. Для коксования угольной шихты существует коксовая батарея, состоящая из коксовых камер, число которых достигает порядка нескольких десятков.

Большое количество коксовых камер обуславливается увеличением площади контакта шихты и обогревательных простенок, что обеспечивает более быстрый и равномерный прогрев шихты. Сами простенки, которые находятся между камерами, обогреваются с помощью горячих газов, проходящие через специальные отопительные каналы. Для удаления шихты из камер применяются герметичные металлические двери, располагающиеся с торцевой стороны. При процессе коксования идет образования взрывоопасных газообразных продуктов, которые отводятся в газосборник.

В целях обеспечения высокого и равномерного качества кокса, выдача его из печей должна производиться по минутному цикличному графику, с соблюдением постоянства периодов коксования. Обслуживание одного блока коксовых печей, состоящего их двух батарей, производится двумя комплектами коксовыталкивателей, загрузочных вагонов, двересъемных машин и одним

тушильным или коксовозным вагоном (вагоном раскалённого кокса (ВРК)) с электровозом.

Строительство УСТК в нашей стране ставит перед собой следующие задачи:

– эффективно использовать вторичные энергетические ресурсы коксового производства;

– улучшать качественные показатели доменного кокса, например, увеличить механическую прочность и снизить и стираемость кокса, стабилизировать его фракционный состав и влажность, и другие;

– применять меры по прекращению загрязнения воздушного пространства парами, имеющие в своем составе: аммиак, сернистые соединения, фенол и тд., образующимися при мокром тушении кокса;

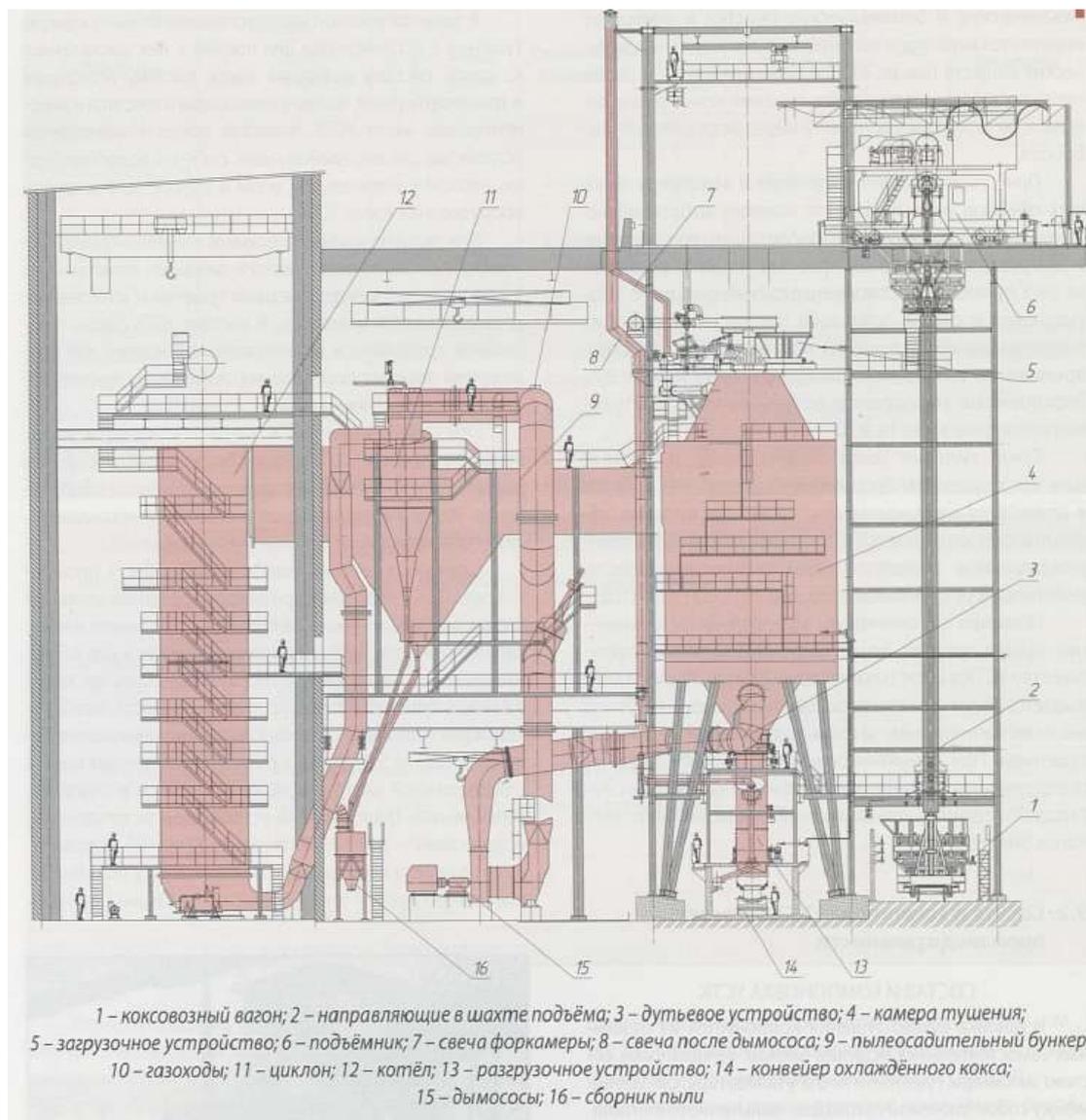
– улучшать условия труда для рабочих на коксовой стороне печей (отсутствие запарованности на обслуживающих площадках).

Для тушения кокса сухим способом предназначена установка сухого тушения кокса – установка представляет собой цилиндрическую камеру, сверху в которую загружается раскаленный кокс и по мере опускания к трактам конвейеров, он тушится охлажденным теплоносителем в виде циркуляционного газа, поступающего в камеру снизу. Газ после прохождения камеры отдает тепло нагреву воды в котле-утилизаторе и поступает вновь на тушение. Кокс загружается в камеру с температурой  $1050\pm 50^{\circ}\text{C}$ , а после тушения выходит при температуре не выше  $200-250^{\circ}\text{C}$ . Производительность установок 52-54 т/час с одной камеры.

Кокс, выдаваемый из печей, должен приниматься в вагон раскаленного кокса (ВРК). Два вагона раскаленного кокса, приводятся в движение электровозом.

Во время приема кокса вагон раскаленного кокса необходимо передвигать со скоростью, примерно, равной скорости хода штанги коксовыталикателя, что обеспечивает равномерное распределение кокса по всей длине тушильного вагона.

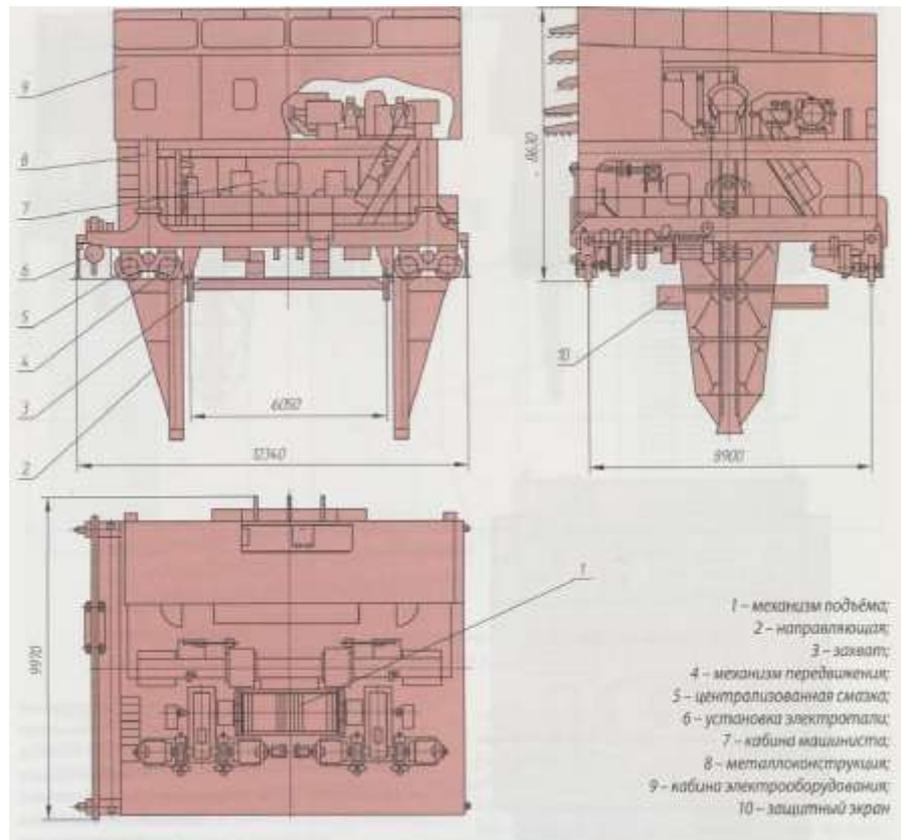
Общая схема УСТК изображена на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Общий вид камеры УСТК*

Кузов с раскаленным коксом подъемником, изображенным на рисунке 2, поднимается наверх к одной из загружаемых камер. Крышка загрузочного люка, которая показана на рисунке 3 открывается в момент подхода подъемника к загружаемой камере, и на ее место устанавливается направляющая воронка для выпуска кокса из коксоприемного кузова в камеру тушения. После выгрузки горячего кокса в камеру, загрузочный люк автоматически закрывается крышкой. Герметизация загрузочного устройства достигается за счет применения гидрозатвора высотой 70-100мм. Необходимо обеспечить постоянное заполнение гидрозатвора водой. Гидрозатвор необходимо периодически очищать от кокса и

шлама.



*Рисунок 2 – Одно из исполнений подъемника для индивидуальной камеры тушения*



*Рисунок 3 – Загрузочный люк УСТК*

Доставка порожнего кузова на платформу и тележку коксовозного вагона

производится в обратной последовательности. Общее время с момента приемки горячего кокса в кузов до конца его выгрузки в камеру тушения не должно превышать на УСТК-4 – 370с. На рисунке 4 показана тахограмма работы подъемника.

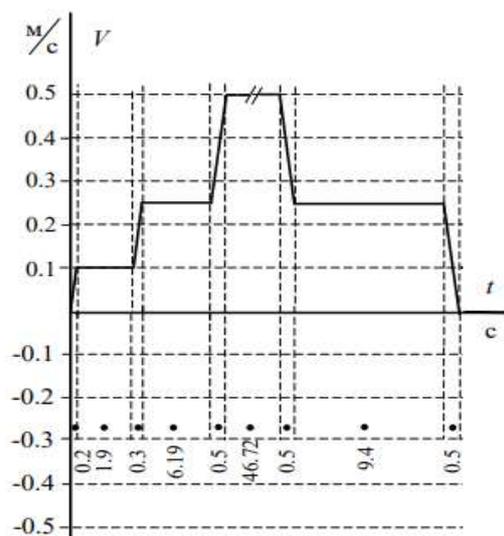


Рисунок 4 – Тахограмма электропривода подъемника

### 1.1. Кинематическая схема

Механизм подъема состоит из барабана, двух цилиндрических редукторов «CNZ – 500», четырех электродвигателей (мощностью 132 кВт, все 4 двигателя работают совместно), тормозов «ТКП – 600» на каждый электродвигатель и путевого выключателя [2].

В таблице 1 приведена основная информация о электродвигателях:

Таблица 1 – основная информация о электродвигателях

| Электрооборудование | Тип              | Характеристика   | Класс защиты по IP | Производитель | Количество |
|---------------------|------------------|--|--------------------|---------------|------------|
| Электродвигатель    | 1LG4 318-8AB90-Z | 132 кВт, 8-полюсов, 730 об/мин, 50 Гц, масса 1125 кг, класс вибрации RAL 7030, напряжение 380В | IP55               | SIEMENS       | 4          |

Барабан осуществляет вращательное движение с помощью двух редукторов, связанных общим механическим валом. Каждый редуктор приводится в работу из-за пары асинхронных двигателей, также соединенных общим валом. Так как общая длина ветки стального каната составляет 150 метров, то для его намотки на барабане применены нарезки по обе стороны, рассчитанные на укладку 2,5 витка для крепления самого каната, 30 рабочих витков, а также 1,5 в качестве запаса.

Кинематическая схема механизма подъемной лебедки приведена на рисунке 5 и состоит из следующих устройств:

1. барабан;
2. четыре тормоза;
3. четыре асинхронных электродвигателя;
4. два редуктора.

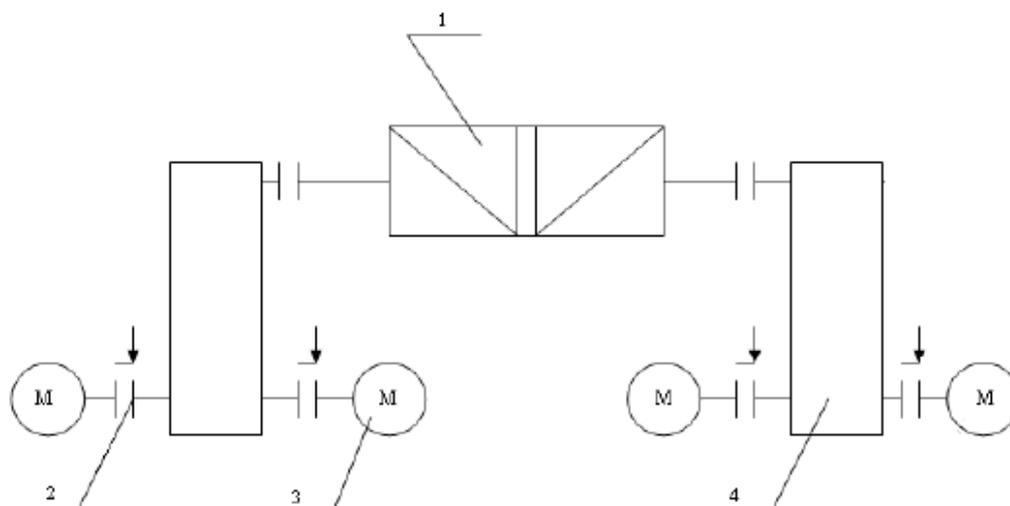


Рисунок 5 – Кинематическая структурная схема подъемника УСТК

Для захвата и удержания вагона с раскаленным коксом в процессе транспортировки груза вверх до камеры тушения и спуска, в конструкции УСТК применяется механизм захвата. Кинематическая схема механизма захвата представлена на рисунке 8 и состоит из следующих устройств:

1. Две пары сдвоенных блоков – сдвоенный полиспаст.

2. Верхняя траверса.
3. Два захватных крюка, закрепленных на верхней траверсе.
4. Тепловой экран.

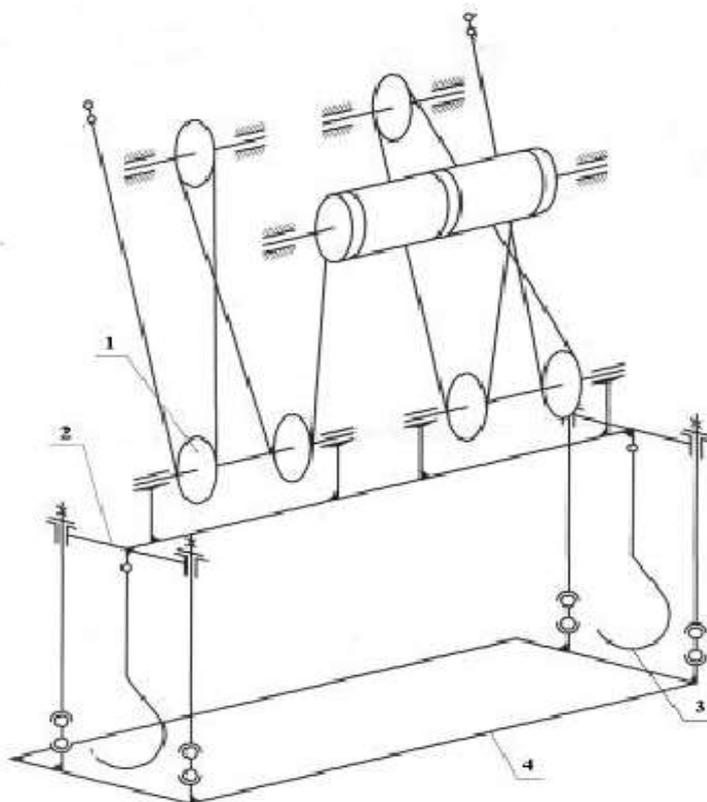


Рисунок 6 – Кинематическая схема захватного устройства

Технические данные подъемника приведены в таблице 2:

Таблица 2 – технические характеристики подъемника

| Параметр                         | Обозначение | Ед. изм. | Значение |
|----------------------------------|-------------|----------|----------|
| Масса кокса                      | $m_K$       | кг       | 24000    |
| Масса пустого вагона             | $m_B$       | кг       | 29500    |
| Масса траверсы верхней           | $m_{ТВ}$    | кг       | 5650     |
| Масса траверсы нижней            | $m_{ТН}$    | кг       | 2027     |
| Диаметр барабана                 | $D_б$       | м        | 1.21     |
| Передаточное отношение редуктора | $i_{ред}$   |          | 23,255   |

Продолжение таблицы 2

|  |                |             |        |
|--|----------------|-------------|--------|
| Номинальный выходной момент редуктора  | $M_{ред.ном}$  | Н·м         | 47500  |
| Кратность полиспаста                   | $i_{пол}$      |             | 4      |
| Высота подъема в шахте                 | $H$            | м           | 24.8   |
| Высота спуска в разгрузочной камере    | $h$            | м           | 0.605  |
| Рабочая скорость подъёма/спуска        | $v_{п}$        | м/с         | 0.5    |
| Рабочая (номинальная) грузоподъемность | $m_{груз.ном}$ | кг          | 50000  |
| Расстояние до камеры                   | $L$            | м           | 24     |
| Скорость передвижения                  | $v_{л}$        | м/с         | 0.3    |
| Производительность                     |                | кг/час      | 120000 |
| Режим работы                           |                | циклический |        |

Дополнительные параметры подъемного механизма:

- КПД редуктора CNZ – 500 принято  $\eta_{ред} = 0,9$ ;
- КПД механизма подъема принято  $\eta_{мех} = 0,86$ ;
- максимальное допустимое значение ускорения для металлургических специальных кранов  $a = 0,5 \text{ м/с}^2$ .

Значения скоростей, которые необходимы для расчетов:

- при закрытии/открытии захватов вагона – 0,1 м/с;
- в направляющих лафета подъемника – 0,25 м/с;
- в стационарных направляющих – 0,5 м/с.

## 1.2. Система управления без АВН

Для управления электроприводов подъема наиболее распространена схема (Сеть- Преобразователь частоты (ПЧ)- Двигатель), при данном подключении в момент спуска груза образуется избыточная мощность, которая обычно рассеивается на тормозном резисторе в виде тепла, классическая схема электропривода подъема груза представлена на рисунке 7 [3].

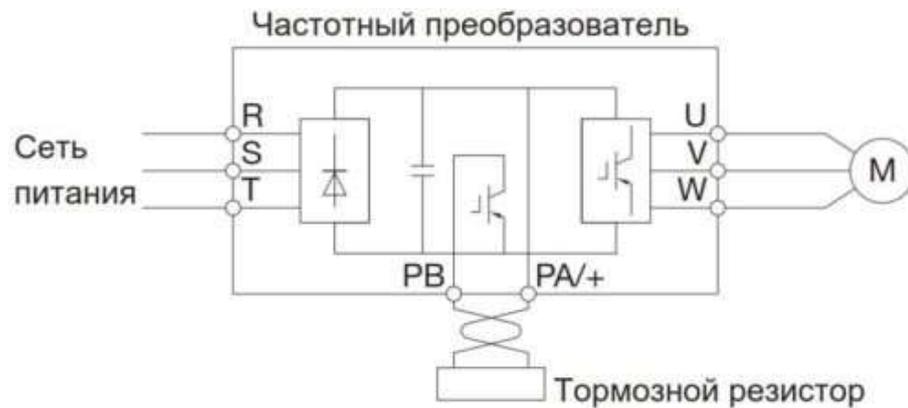


Рисунок 7 – Классическая схема электропривода подъема груза

В зависимости от требуемой мощности двигателя, массогабаритные показатели тормозного резистора изменяются, внешний вид тормозного резистора показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид тормозного резистора

### 1.3. Активный выпрямитель напряжения

Данный процесс можно усовершенствовать путем введения в схему активного выпрямителя напряжения (АВН), который будет возвращать в сеть энергию при спуске.

Подъем вагона раскаленного кокса осуществляется с помощью четырех двигателей. Каждые два двигателя присоединены к двум редукторам, с помощью которых уже вращается барабан со стальным канатом. Управление осуществляется с помощью частотных преобразователей и активного выпрямителя напряжения фирмы *Schneider Electric*. На рисунке 9 представлена функциональная схема САУ ЭП [4].

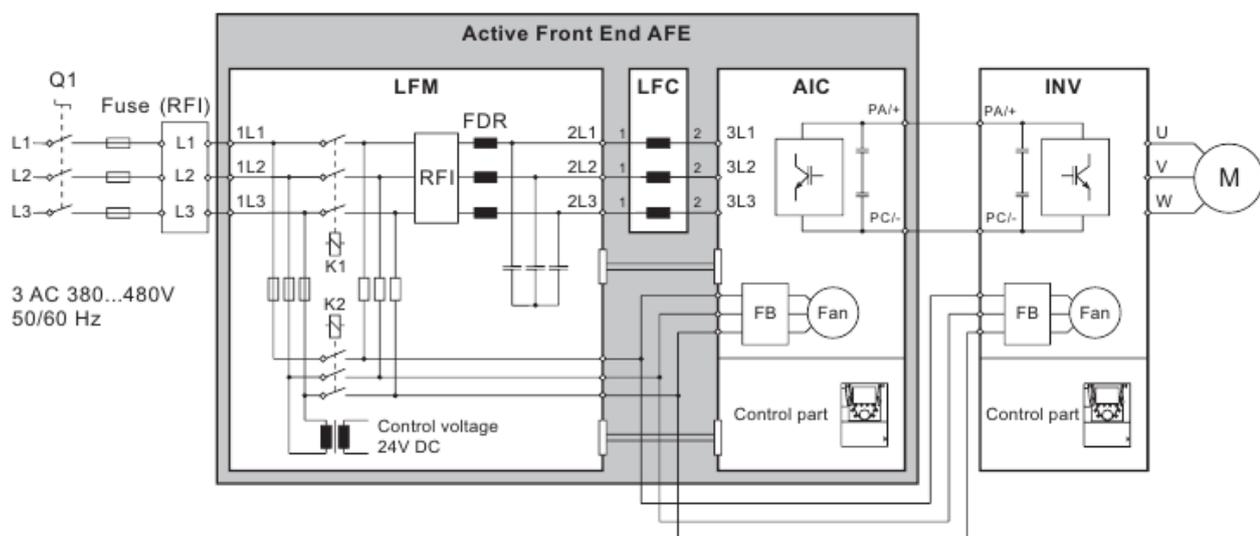


Рисунок 9 – Функциональная схема подключения АД с АВН

Активный выпрямитель напряжения имеет в своем составе 3 основные части, которые устанавливаются на входе ПЧ между питающей сетью и двигателем. Главной особенностью активного выпрямителя напряжения является возврат в сеть энергии, когда кузов спускают обратно вниз, при спуске привод притормаживает кузов для плавности хода, при этом образуется отрицательный момент, электродвигатели переходят в генераторный режим, таким образом энергия

возвращается в сеть, выражаясь научным языком осуществляется рекуперация энергии. Активный выпрямитель напряжения содержит следующие элементы:

1. Модуль сетевого фильтра LFM, устанавливаемый на входе и состоит из зарядной цепи, сетевого контактора и фильтра ЭМС.

Сетевые фильтра применяются чтобы уменьшить значение гармонических составляющих тока. При совместном использовании дросселя постоянного тока (ПТ) и пассивного фильтра, гармоники тока уменьшаются с полным уровнем искажения до 5 - 10 %, а при отсутствии дросселя данный показатель составляет меньше 10 - 16 %, однако серьезным минусом фильтров является увеличение реактивной мощности при работе в режиме холостого хода (ХХ) или при малой нагрузке. Снизить реактивную мощность, путем отключения фильтров можно с помощью контактора, который управляется релейным входом ПЧ.

2. Сетевой дроссель LFC, состоящий из трех однофазных дросселей. Подключается между автономным инвертором напряжения АИС и сетевым фильтром. Сетевой фильтр применяется для сокращения гармоник тока, снижение перенапряжения на клеммах двигателя.

Сетевой дроссель LFC предназначен для защиты ПЧ при коротких замыканиях (КЗ) на выходе, ограничивая скорость нарастания тока КЗ, что способствует срабатыванию токовой защите ПЧ. Применение сетевого дросселя способствует выравниваю линейных напряжений при неравномерной нагрузке.

3. Автономный инвертор напряжения АИС.

АВН обеспечивает работу электропривода в 4-квadrантном режиме, то есть в двигательном и генераторном режимах при прямом пуске и реверсе.

АИН питает ПЧ через промежуточное звено постоянного тока (ЗПТ), обеспечивая возврат энергии в питающую сеть. Он позволяет также:

- ограничить коэффициент нелинейных искажений THDI <4%;
- подключение нескольких ПЧ с разными мощностями, работающих параллельно.

ПЧ поддерживают постоянный момент на валу двигателя как при

переменной и постоянной нагрузке:

- Регулирует момент во время пуска и скорость вращения;
- Обеспечивает максимальный момент как при пуске, так и во время работы;
- Повышает  $\cos \varphi$  системы ПЧ-АД до уровня 0,97 – 0,99%;
- Энергосбережение до 60%.

На рисунке 9 показана функциональная схема одного ЭП, а на подъёмнике четыре таких одинаковых привода, для каждого двигателя отдельно. Это было применено из соображений безопасности, то есть чтобы вагон с раскаленным коксом не упал, если один ЭП выйдет из строя, то три двигателя его смогут удержать.

Выравнивание нагрузки в данном частотно-регулируемом приводе осуществляется с помощью функции выравнивания нагрузки, которое применяет искусственное скольжение, формируемое ПЧ. Так как пользователь обычно формирует искусственные характеристики, то данный метод способен выравнивать нагрузку между электродвигателями с неодинаковыми характеристиками.

Для того чтобы нагрузка между электродвигателями распределялась пропорционально жесткости их механических характеристик, необходимо учитывать выравнивание нагрузки в приводах, причем двигатели должны иметь одинаковые скорости  $\omega$  и быть связаны общим механическим валом.

Двигатель с более жесткой характеристикой будет перегружен и, как видно из механической характеристики на рисунке 10, тем больше, чем больше нагрузка.

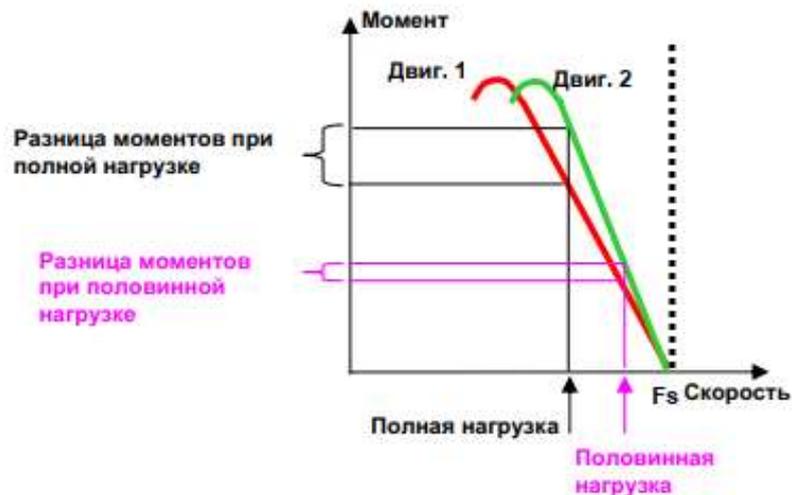


Рисунок 10 – Механическая характеристика двух параллельно включенных двигателе

#### 1.4. Краткое описание работы функциональной схемы

Питание привода осуществляется с троллей. Технические данные троллей описаны в таблице 3:

Таблица 3 – Основные значения троллеи

| Наименование             | Значение |
|--------------------------|----------|
| Напряжение               | 380 В    |
| Частота                  | 50 Гц    |
| Ток                      | 1000 А   |
| Мгновенное значение тока | 30 кА    |

Силовое напряжение через силовые автоматы и модуль силовых быстродействующих предохранителей, которые осуществляют защиту от короткого замыкания и перегрузки, поступает в модуль сетевого фильтра (LFC). Силовое напряжение через блок LFC подается в автономный инвертор напряжения (АИН), где происходит преобразование из переменного напряжения в постоянное и питает звено постоянного тока преобразователя частоты, который питает

силовым напряжением двигатель с заданной частотой.

Чтобы запитать модуль автономного инвертора силовым напряжением напрямую, нужно зарядить звено постоянного тока автономного инвертора напряжения и преобразователя частоты через разрядные резисторы. После окончания того, как звено постоянного тока АИН и ПЧ зарядилось, замыкается силовой пускатель К1, автономный инвертор напряжения питается напрямую.

### 1.5. Внешний вид электропомещения и датчики

Электропомещение, в котором располагается оборудование для управления электропривода, то есть активный выпрямитель напряжения представлен на рисунке 11:



*Рисунок 11 – Внешний вид электропомещения*

В данном механизме подъема используются несколько типов датчиков, а именно энкодер и 4 датчика позиции механизма (позиционеры). Энкодер подключен к ПЛК и показывает высоту, на которую траверса (грузозахватное приспособление, применяемое для подъема вагона с раскаленным коксом) должна поднять вагон. После того, как вагон с раскаленным коксом был поднят на необходимую высоту, подъемник, с помощью механизма передвижения, двигается к загрузочному люку для высыпания раскаленного кокса. Позиционеры

применяются для точного определения позиции подъемника.

Описание датчиков приведены в таблице 4:

Таблица 4 – Описание датчиков

| Наименование | Тип                 | Характеристика           | Производитель | Количество |
|--------------|---------------------|--------------------------|---------------|------------|
| Позиционеры  | КУ 703 У2           | 1р+1м, 1А,<br>250В       | SIEMENS       | 4          |
| Энкодер      | FGH4K-<br>2828G-90G | 24В, 2828<br>о/min, IP56 | HUBNER        | 1          |

### 1.6 Временная диаграмма подъемника

Передвижение подъемника представлено схематично на рисунке 12, на ней указаны протяженность участков и скорость движения подъемника на них:

- т.0 - т.1 – сведение захватов и натяжение канатов;
- т.1 – т.2 – подъем (спуск) с платформы в направляющих лафета;
- т.2 – т.3 – подъем (спуск) в стационарных направляющих;
- т.3 – т.4 - подъем (спуск) в стационарных направляющих;
- т.4 – т.5 – участок движения до камеры.

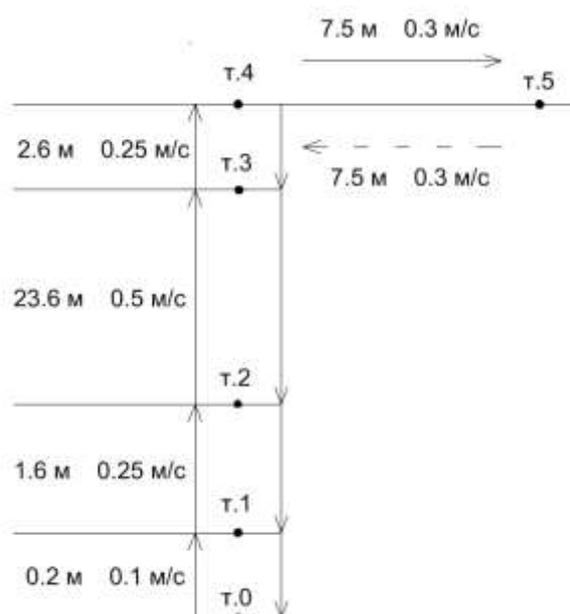


Рисунок 12 – Временная диаграмма подъемника

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ПОДЪЕМА

От электропривода механизма подъема требуется выполнение следующих задач:

- при поломке одного из электродвигателей, механизм должен работать в нормальном режиме, согласно данному технологическому процессу;
- точное и последовательное выполнение временной диаграммы (тахограммы)
- обеспечение плавного изменения скорости при подъеме и спуске груза в начальном и коечном участках;
- в установившемся режиме работы соотношение диапазона регулирования скорости не должно быть меньше 1:5.
- точная остановка вагона раскаленного кокса на нижнем и верхнем уровнях;
- обеспечение высокого коэффициента полезного действия (КПД);
- возврат энергии в питающую сеть при активном моменте.

Ранее данные требования выполнялись электроприводом, в состав которого входили 4 асинхронных двигателя с фазным ротором МТН713-10, мощность каждого составляла 132 кВт. При эксплуатации данного оборудования был выявлен существенный недостаток, происходили частые выходы из строя электродвигателей, с периодичностью один раз в 1,5-2 месяца. С целью устранения данной проблемы была применена частотно-регулируемая система управления электропривода с четырьмя асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. За счет данной модернизации был увеличен срок эксплуатации электрических машин, применение ПЧ позволило обеспечивать плавный разгон и торможение при подъеме и спуске за счет ограничения момента на валу электродвигателей, а также экономию электроэнергии.

### 3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АД

Паспортные параметры асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором 1LG4317-6AA представлены в таблице 5:

Таблица 5 Паспортные параметры электродвигателя 1LG4317-6AA

|                |        |
|----------------|--------|
| $P_n$ , кВт    | 132    |
| $n_0$ , об/мин | 1000   |
| $n_n$ , об/мин | 988    |
| $U_{ЛН}$ , В   | 380    |
| $U_{1Н}$ , В   | 220    |
| $\eta$ , %     | 0,95   |
| $\cos\varphi$  | 0,86   |
| $f_0$ , Гц     | 50     |
| $Z_p$          | 3      |
| $i_{ред}$      | 23,255 |
| $K_i$          | 7,5    |
| $K_{max}$      | 3      |
| $K_{п}$        | 2      |

Для расчета всех необходимых параметров двигателя и построения механических и электромеханических характеристик воспользуемся Т-образной схемой замещения. Схема замещения и основные уравнения АД, соответствующий схеме Т-образной схемы замещения представлены на рисунке 13 [5].

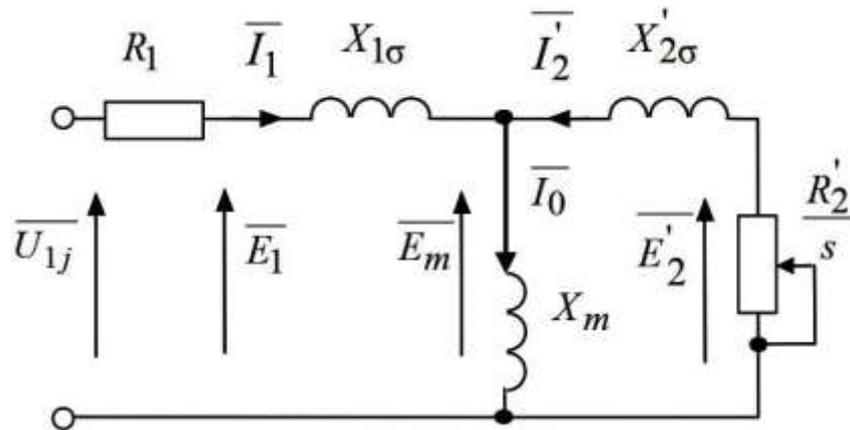


Рисунок 13 – T-образная схема замещения АД

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующей представленной схеме замещения:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - jX_{1\sigma}\bar{I}_1 - R_1\bar{I}_1 = 0 \\ \bar{E}_m + jX_{2\sigma}'\bar{I}_2' + R_2'\bar{I}_2'/s = 0 \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0 \end{cases}$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение обмотки статора;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$I_1$  – ток обмотки статора;

$E_1$  – ЭДС обмотки статора;

$R_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$s$  – скольжение;

$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0}{z_p}$  – синхронная угловая скорость;

$\omega$  – угловая скорость асинхронного двигателя;

$z_p$  – число полюсов;

$f_1$  – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке

статора;

$E_m$  – ЭДС от главного магнитного потока машины;

$E_2'$  – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

На рисунке 14 приведена векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих системе основных уравнений АД:

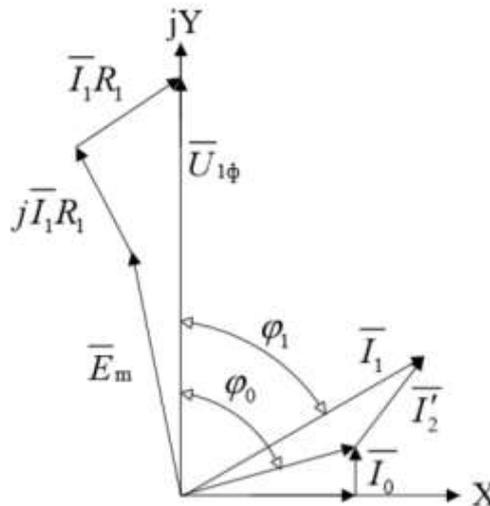


Рисунок 14 – Векторная диаграмма АД

Найдем номинальную угловую частоту вращения:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 988}{30} = 103,463 \text{ рад/с}$$

Определим синхронная скорость вращения электродвигателя:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0}{z_p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,720 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Вычислим номинальное скольжение электродвигателя:

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} = \frac{103,463 - 104,720}{103,463} = 0,012 \text{ о. е.}$$

Номинальный ток АД:

$$I_{H1} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{132 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,95} = 244,798 \text{ А.}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{H1} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{132 \cdot 10^3}{104,720} = 1276 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Примем поправочные коэффициенты для КПД и коэффициента мощности равном 1:

$$k_{\cos} = 1; k_{\eta} = 1.$$

Методика для расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя базируется на определении коэффициента мощности и КПД при частичной нагрузке  $0,75 \cdot P_H$ .

Коэффициент мощности при частичной нагрузке:

$$\cos \varphi_* = 0,851$$

КПД при частичной нагрузке:

$$\eta_* = \eta \cdot k_{\eta} = 0,95$$

Коэффициент загрузки двигателя:

$$p_* = 0,75.$$

Ток при частичной нагрузке:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 132 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,851 \cdot 0,95} = 185,453 \text{ А}.$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( p_* \cdot I_{H1} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_* \cdot s_H} \right)^2}{1 - \left( p_* \cdot I_{H1} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p_* \cdot s_H} \right)^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{185,453^2 - \left( 0,75 \cdot 244,798 \cdot \frac{1 - 0,012}{1 - 0,75 \cdot 0,012} \right)^2}{1 - \left( 0,75 \cdot 244,798 \cdot \frac{1 - 0,012}{1 - 0,75 \cdot 0,012} \right)^2}} = 44,883 \text{ А}.$$

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем  $\beta = 1$ . Тогда критическое скольжение:

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}$$

$$= 0,012 \cdot \frac{3 + \sqrt{3^2 - [1 - 2 \cdot 0,012 \cdot 1 \cdot (3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,012 \cdot 1 \cdot 3 - 1} = 0,074 \text{ о. е.}$$

Вспомогательный коэффициент

$$C_1 = 1 + \left( \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{H1}} \right) = 1 + \left( \frac{44,883}{2 \cdot 7,5 \cdot I_{H1}} \right) = 1,012 \text{ о. е.}$$

Определим коэффициент, причем количество фаз 3:

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,012}{2 \cdot 1,012 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 10^3} = 0,179 \text{ о. е.}$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left( \beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{0,179}{\left( 1 + \frac{1}{0,074} \right) \cdot 1,012} = 0,012 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление статора обмотки рассчитываем по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,012 \cdot 0,012 \cdot 1 = 0,012 \text{ Ом}$$

Определим параметр  $g$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{KH}$ :

$$\gamma = \sqrt{\left( \frac{1}{s_k^2} \right) - \beta^2} = \sqrt{\left( \frac{1}{0,074^2} \right) - 1^2} = 13,555 \text{ о. е.}$$

Если значение  $\gamma$  отрицательно, то необходимо изменить первоначально принятое значение  $\beta$ . Найдем значение индуктивного сопротивления короткого замыкания.

$$X_{KH} = C_1 \cdot R'_2 \cdot \gamma = 1,012 \cdot 0,012 \cdot 13,555 = 0,166 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2H} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,166}{1,012} = 0,095 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивность роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$L'_{2H} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = \frac{0,095}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,032 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Найдем индуктивное сопротивление статорной обмотки, приведенное к статорной:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 0,166 = 0,07 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивность статорной обмотки:

$$L_{1H} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = \frac{0,07}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,222 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

По найденным значениям  $C_1$ ,  $R'_2$  и  $X_{KH}$  определим критическое скольжение:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,012 \cdot 0,012}{\sqrt{0,012^2 + 0,166^2}} = 0,074 \text{ о. е.}$$

Для того, чтобы найти ЭДС ветви намагничивания  $E_1$  найдем  $\sin \varphi$

$$\phi = \arccos (\cos \varphi)$$

$$\sin \varphi = \sin (\phi) = 0,51$$

Найдем ЭДС ветви намагничивания  $E_1$ , наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{H1})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - X_{1H} \cdot I_{H1})^2} = \\ \sqrt{(220 \cdot 0,86 - 0,012 \cdot 244,798)^2 + (220 \cdot 0,51 - 0,07 \cdot 244,798)^2} = 209,112 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{209,112}{44,883} = 4,659 \text{ Ом}$$

Тогда индуктивность намагничивания:

$$L_{\mu H} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = \frac{4,659}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

В таблице 6 привели параметры схемы. Далее производим расчет механических и электромеханических характеристик.

Таблица 6 – Расчетные параметры схемы замещения АД

| $R_1, \text{ Ом}$ | $R_2, \text{ Ом}$ | $X_{кн}, \text{ Ом}$ | $X_{1н}, \text{ Ом}$ | $X_{2н}, \text{ Ом}$ | $X_{\mu н}, \text{ Ом}$ |
|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 0,012             | 0,012             | 0,166                | 0,07                 | 0,095                | 4,659                   |

### 3.1 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик АД

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left( X_{кн}^2 + \left( R_1 - \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu н}} \right)^2 \right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,012}{104,72 \cdot s \cdot \left( 0,166^2 + \left( 0,012 - \frac{0,012}{s} \right)^2 + \left( \frac{0,012 \cdot 0,012}{s \cdot 4,659} \right)^2 \right)}$$

Естественная механическая характеристика двигателя представлена на рисунке 15.

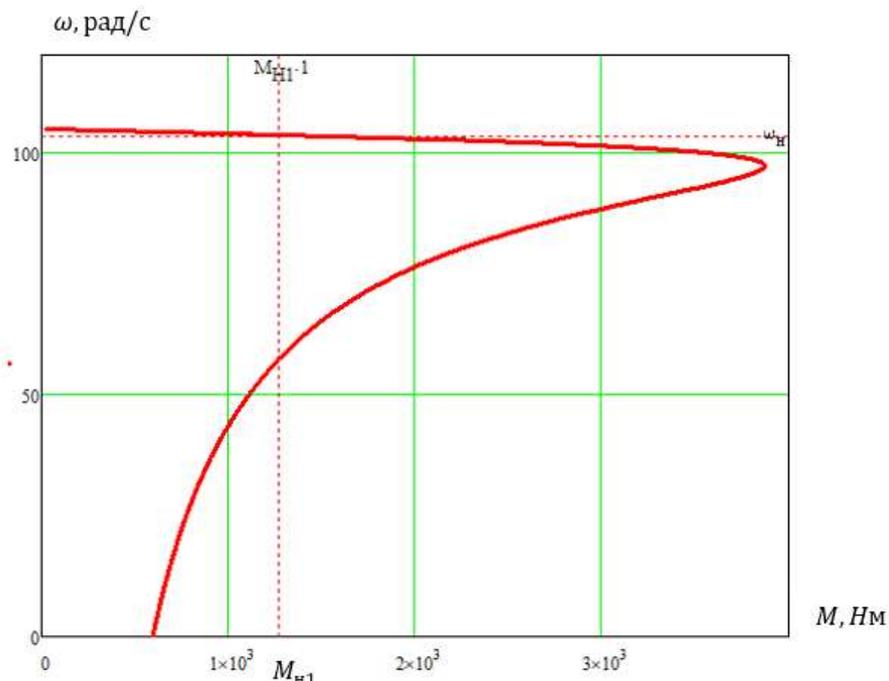


Рисунок 15 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя  $M=f(\omega)$

Максимальный момент двигателя:

$$M_{\max} = M_H \cdot k_{\max} = 1275,81 \cdot 3 = 3827,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{\pi} = M_H \cdot k_{\pi} = 1275,81 \cdot 2 = 2552 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Естественная электромеханическая характеристика:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1H} + X'_{2H})}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,012 + \frac{0,012}{s}\right)^2 + (0,07 + 0,095)}}$$

Ток статора:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin\varphi_2}$$

$$= \sqrt{44,883^2 + I'_2(\omega)^2 + 2 \cdot 44,883 \cdot I'_2(\omega) \cdot 0,51}$$

Естественная электромеханическая характеристика двигателя представлена на рисунке 16.

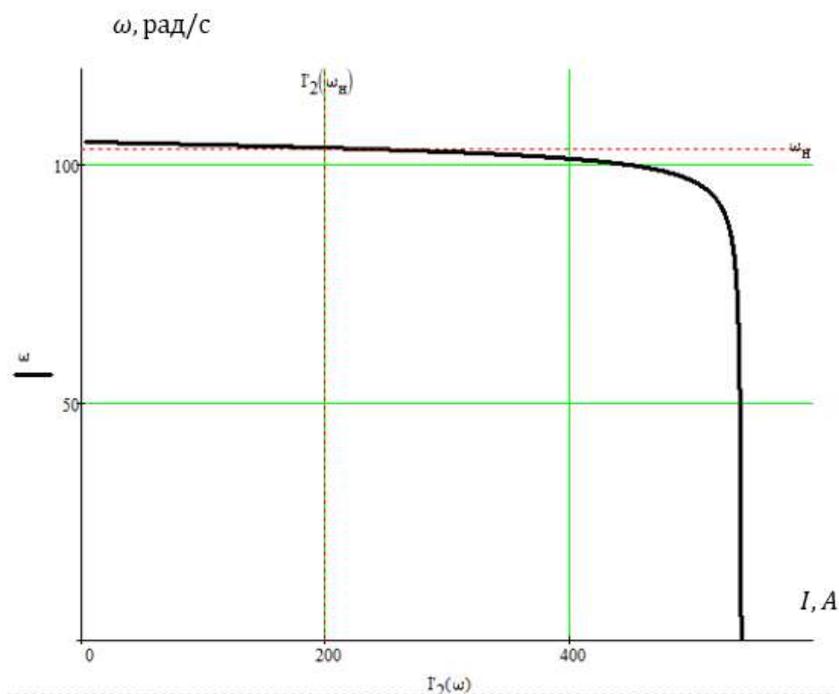


Рисунок 16 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя  $I'_2=f(\omega)$

Построим естественные механические характеристики при различном значении пускового момента (рисунок 17).

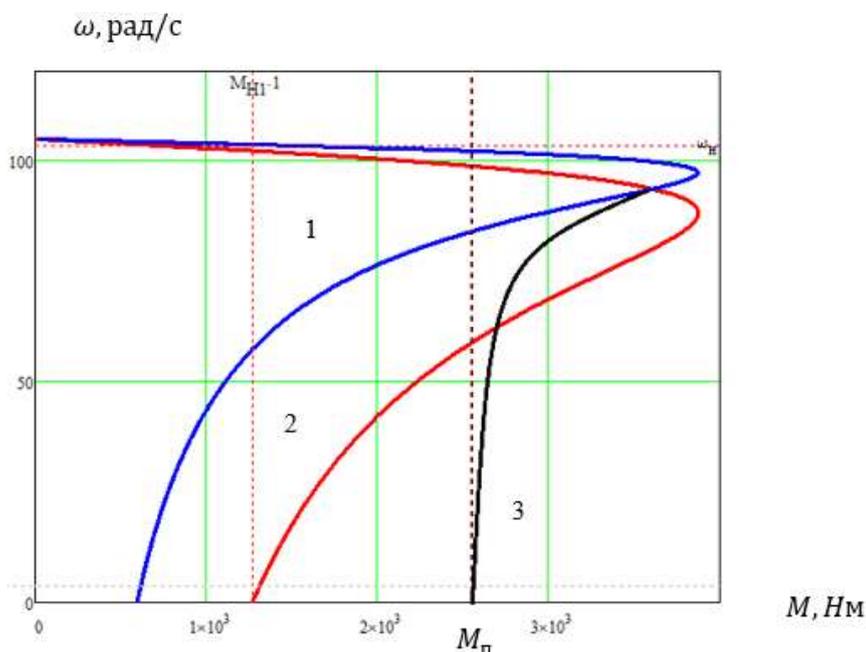


Рисунок 17 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя  $M=f(\omega)$  при различном значении пускового момента 1- ест. механическая характеристика АД; 2-ест. механическая характеристика АД при увеличенном сопротивлении ротора; 3- ест. механическая характеристика при заданном пусковом моменте

Статические характеристики подъемника при регулировании скорости по закону регулирования  $\frac{U_{1j}}{f_{1j}} = \text{const.}$

Так как минимальная и максимальная линейные скорости движения груза при подъеме и спуске составляют 0.1 и 0.5 м/с соответственно, то определим частоту на выходе инвертора, а следовательно, и угловую частоту вращения двигателей.

Максимальная требуемая скорость вращения приводных электродвигателей:

$$\omega_{\text{эп.макс}} = \frac{2 \cdot v_{\text{макс}}}{D_{\text{б}}} \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} = \frac{2 \cdot 0,5}{1,21} \cdot 23,255 \cdot 4 = 76,876 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$n_{\text{элп.макс}} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_{\text{элп.макс}} = \frac{30}{3,14} \cdot 76,876 = 734,13 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Минимальная требуемая скорость вращения приводных электродвигателей:

$$\omega_{\text{элп.мин}} = \frac{2 \cdot v_{\text{мин}}}{D_6} \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}} = \frac{2 \cdot 0,1}{1,21} \cdot 23,255 \cdot 4 = 15,375 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$n_{\text{элп.мин}} = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_{\text{элп.мин}} = \frac{30}{3,14} \cdot 15,375 = 146,82 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Определим частоты, при которых механическая характеристика проходит через пересечение скорости вращения (максимальная или минимальная) и момента при частичной загрузке:

$$f_{1н1} = 50 \text{Гц}; f_{11}^* = \frac{f_{1н1}}{f_{1н}} = \frac{50}{50} = 1$$

$$f_{1н2} = 37,7 \text{Гц}; f_{12}^* = \frac{f_{1н2}}{f_{1н}} = \frac{40}{50} = 0,754$$

$$f_{1н3} = 30 \text{Гц}; f_{13}^* = \frac{f_{1н3}}{f_{1н}} = \frac{30}{50} = 0,6$$

$$f_{1н4} = 20 \text{Гц}; f_{14}^* = \frac{f_{1н4}}{f_{1н}} = \frac{20}{50} = 0,4$$

$$f_{1н5} = 8,3 \text{Гц}; f_{15}^* = \frac{f_{1н5}}{f_{1н}} = \frac{10}{50} = 0,166$$

Для поддержания отношения  $\frac{U_{1j}}{f_{1j}} = \text{const}$  необходимо изменять U:

$$U_{1н1} = 4,4 \cdot f_{1н1} = 4,4 \cdot 50 = 220 \text{ В}$$

$$U_{1н2} = 4,4 \cdot f_{1н2} = 4,4 \cdot 37,7 = 165,88 \text{ В}$$

$$U_{1н3} = 4,4 \cdot f_{1н3} = 4,4 \cdot 30 = 132 \text{ В}$$

$$U_{1н4} = 4,4 \cdot f_{1н4} = 4,4 \cdot 20 = 88 \text{ В}$$

$$U_{1н5} = 4,4 \cdot f_{1н5} = 4,4 \cdot 8,3 = 36,52 \text{ В}$$

Где  $z_p = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = 4,4$ ;

Синхронная скорость на естественной характеристике:

$$\omega_0 = \frac{n_0}{9,55} = \frac{1000}{9,55} = 104,720 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Синхронная скорость на регулировочных характеристиках:

$$\omega_{12} = \omega_0 \cdot f_{12}^* = 104,720 \cdot 0,754 = 78,959 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\omega_{13} = \omega_0 \cdot f_{13}^* = 104,720 \cdot 0,6 = 62,382 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\omega_{14} = \omega_0 \cdot f_{14}^* = 104,720 \cdot 0,4 = 41,888 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\omega_{15} = \omega_0 \cdot f_{15}^* = 104,720 \cdot 0,166 = 17,383 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Рассчитаем электромеханические характеристики АД  $I_2' = f(\omega)$  при различных значениях частот обмоток статора:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{11}^* + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{11}^*}\right)}}$$

где,  $s_j = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}$  - относительное скольжение.

Электромеханические характеристики представлены на рисунке 18.

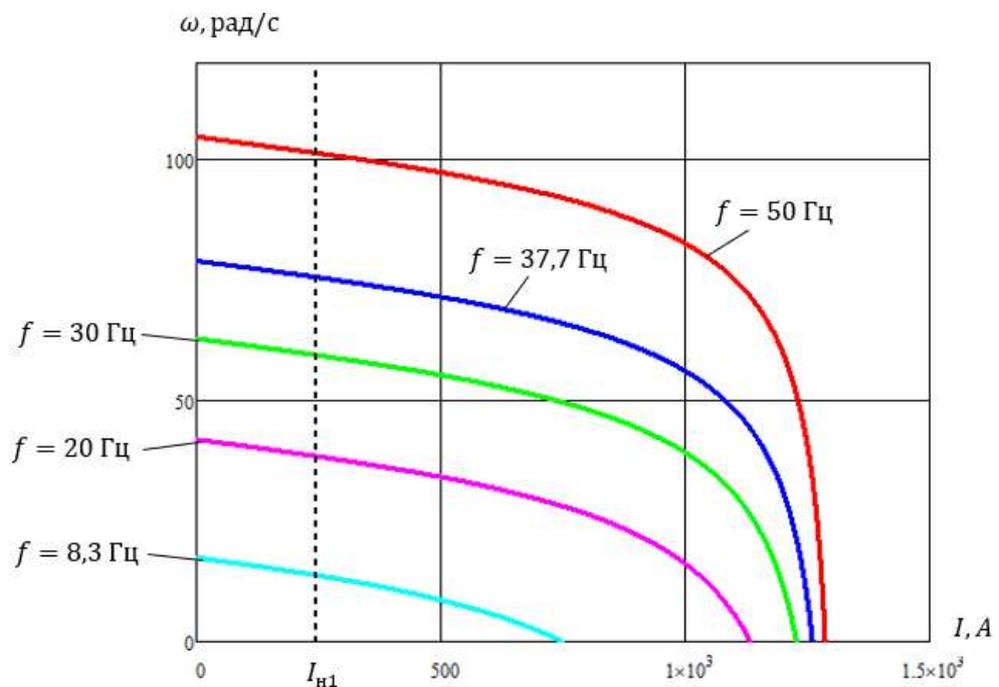


Рисунок 18 – Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$

Выражение для расчета механических характеристик:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left( X_{KH}^2 \cdot f_{11}^{*2} + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{11}^*} \right)^2 \right)}$$

Механические характеристика АД  $M = f(s)$  представлена на рисунке 19.

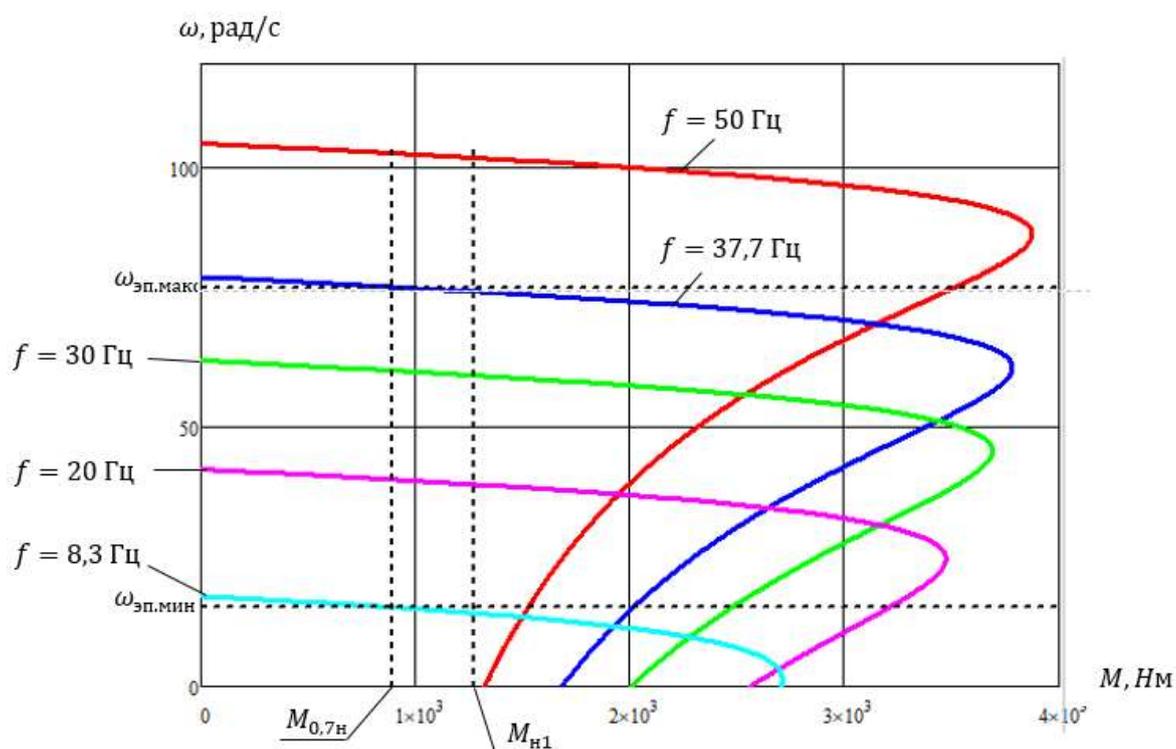


Рисунок 19 – Семейство механических характеристик  $M = f(s)$

После построения семейства механических характеристик необходимо построить зависимость  $U(f)$ , без коррекции напряжения на низких частотах. При задании частоты выше максимальной и ниже минимальной, напряжение не будет пропорционально изменяться, а останется в области насыщения (рисунок 20).

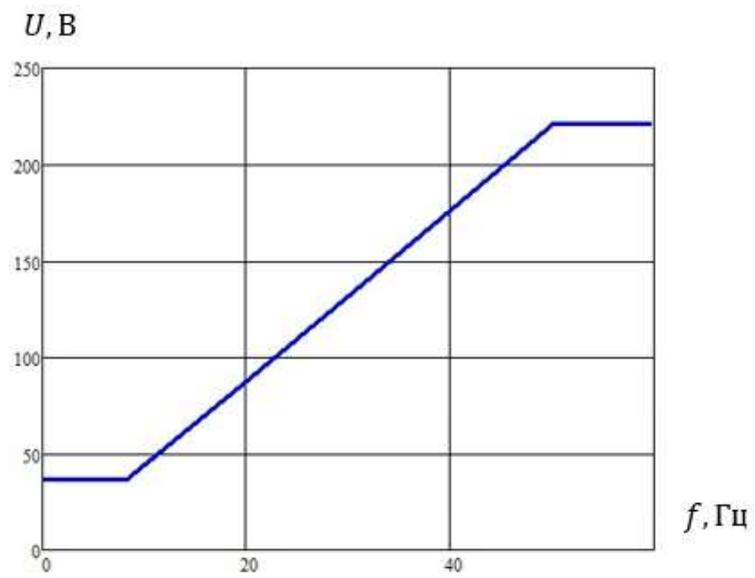


Рисунок 20 – Зависимость  $U(f)$

#### 4. ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД

Для исследования динамических режимов АД будут использоваться ранее рассчитанные параметры схемы замещения. Моделирование будет производиться в программной среде *MATLAB*.

Имитационное моделирование асинхронного двигателя произведем с учетом следующих допущений:

1. Не учитывается неравномерность зазора.
2. МДС изменяется по синусоидальному закону.
3. Магнитная цепь не насыщается.
4. Сопротивления роторных обмоток одинаковы и постоянны.
5. Сопротивления статорных обмоток одинаковы и постоянны
6. Собственные индуктивности статорных обмоток одинаковы и постоянны.
7. Собственные индуктивности роторных обмоток одинаковы и постоянны.
8. Механические потери не учитываются.

Для верности полученных результатов, необходимо собрать имитационную модель в осях  $\alpha$  и  $\beta$ , а также заполнить параметры блока АД, полученных в ходе расчета параметров схемы замещения [6].

Приведем роторные переменные к неподвижной статорной системе координат  $\alpha, \beta$  уравнения напряжений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором имеют вид:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{1\alpha\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} - j \cdot \omega_{эл.р} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta},\end{aligned}$$

где  $R_2'$  – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора.

Векторы результирующего потокосцепления в любой системе координат:

$$\vec{\Psi}_1 = L_1 \cdot \vec{I}_1 + L_m \cdot \vec{I}_2;$$

$$\vec{\Psi}_2 = L_2 \cdot \vec{I}_2 + L_m \cdot \vec{I}_1,$$

где  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;

$L_2 = L'_{2\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн;

$L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;

$L'_{2\sigma}$  – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн;

$L_m$  – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины, Гн.

Система уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ , получена на основе вышеизложенных уравнений и имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_3 \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{эм} - \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{эм} - M_c), \end{array} \right.$$

где

$U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1)$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\alpha$  ортогональной неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$ , В;

$U_{1\beta} = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1)$  – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\beta$  системы координат  $\alpha, \beta$ , В;

$U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$  – амплитудное значение фазного напряжения статорной

обмотки, В;

$U_1$  – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В;

$f_1$  – частота напряжения статора, Гц;

$I_{1\alpha}, I_{1\beta}$  – составляющие тока статора в системе координат  $\alpha, \beta$ , А;

$\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$  – составляющие потокосцепления ротора в системе координат  $\alpha, \beta$ , Вб;

$M_{эм}$  – электромагнитный момент двигателя,  $H \cdot м$ ;

$M_c$  – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя,  $H \cdot м$ ;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$  – коэффициент рассеяния;

$J$  – момент инерции двигателя,  $кг \cdot м^2$ .

По вышеизложенным дифференциальным уравнениям создадим имитационную модель двигателя в осях  $\alpha$  и  $\beta$  показана на рисунке 21, а также сравним графики динамических характеристик с результатами, полученных с помощью блока асинхронного двигателя, изображенного на рисунке 22.

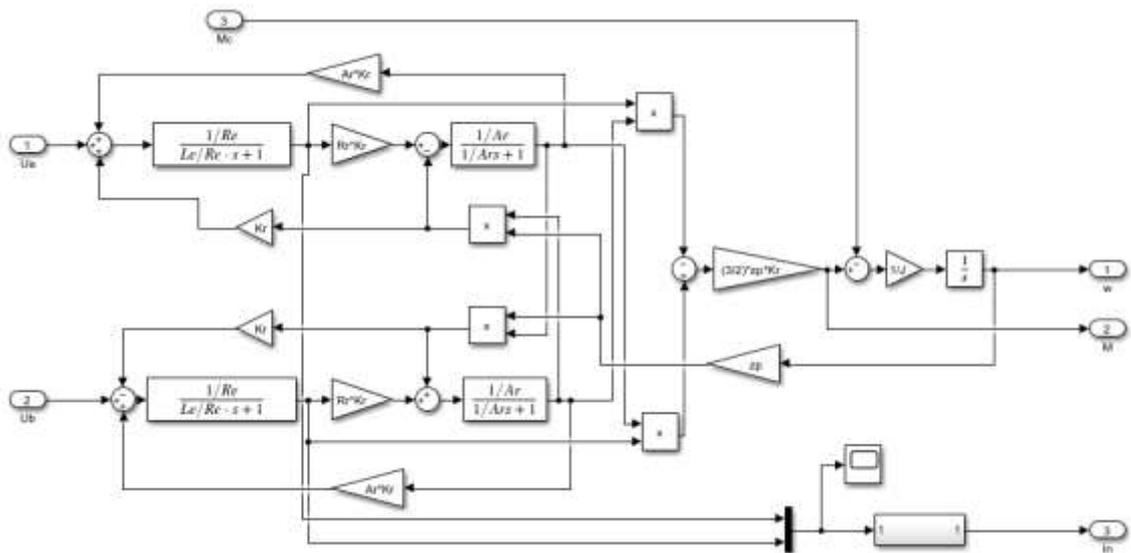
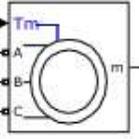


Рисунок 21 – Имитационная модель асинхронного двигателя в осях  $\alpha$  и  $\beta$

Где  – Блок асинхронного двигателя.

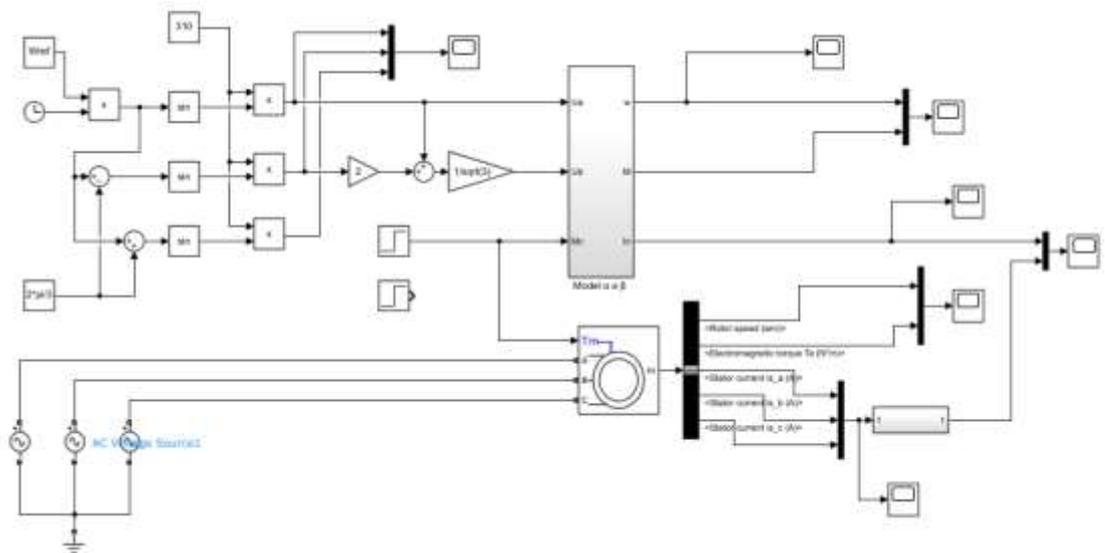


Рисунок 22 – Имитационная модель асинхронного двигателя в программной среде MATLAB-Simulink

Ввод параметров схемы замещения асинхронного двигателя в программе MATLAB-Simulink приведен на рисунке 23.

| Workspace |               |
|-----------|---------------|
| Name      | Value         |
| Ar        | 0.7841        |
| f         | 50            |
| In        | 244.7980      |
| J         | 4             |
| Km        | 4.5000        |
| Kr        | 0.9802        |
| Le        | 5.1939e-04    |
| Lm        | 0.0150        |
| Lr        | 0.0153        |
| Lr_       | 3.0320e-04    |
| Ls        | 0.0152        |
| Ls_       | 2.2220e-04    |
| Mn        | 1.2758e+03    |
| n         | 988           |
| p         | 6             |
| Pn        | 132000        |
| PsirRef   | 0.8500        |
| Re        | 0.0235        |
| Rr        | 0.0120        |
| Rs        | 0.0120        |
| tout      | 1000x1 double |
| Uf        | 381.0512      |
| Un        | 220           |
| w         | 103.4631      |
| Wref      | 314.1593      |
| zp        | 3             |

Рисунок 23 – Ввод параметров схемы замещения асинхронного двигателя в программе MATLAB-Simulink

Следующим пунктом исследуем адекватность модели в осях  $\alpha$  и  $\beta$ , а также правильность нахождения параметров схемы замещения, по графикам переходных процессов.

На рисунке 24 представлены графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$  при пуске асинхронного электродвигателя прямым включением в сеть с набросом нагрузки в момент времени 1,5 секунды, полученных с помощью модели в осях  $\alpha$  и  $\beta$  (а) и блока АД (б).

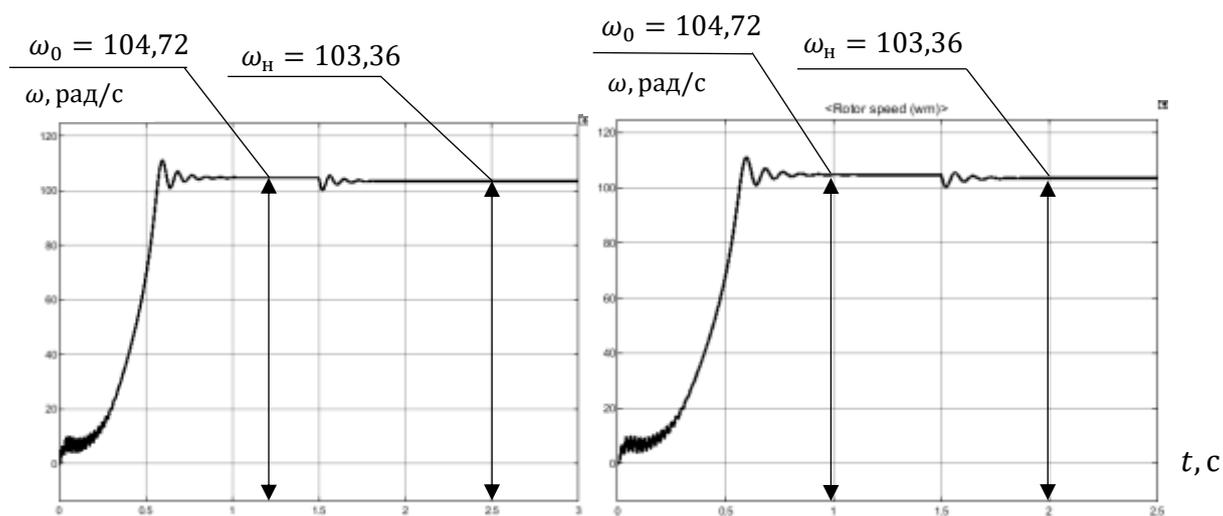
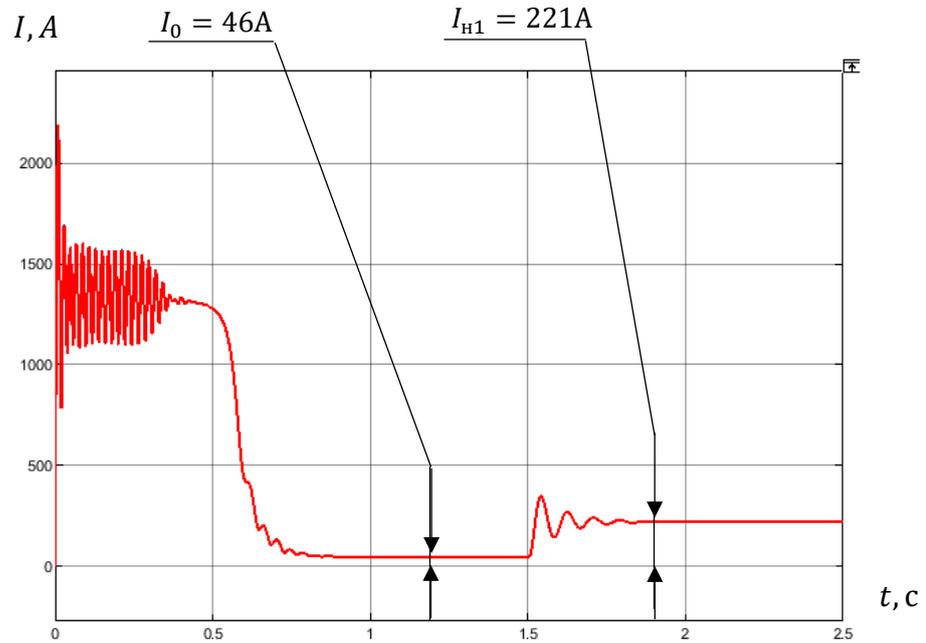


Рисунок 24 – Графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$ , полученных  
а – в модели в осях  $\alpha$  и  $\beta$ ; б – в блоке АД

Так как в обоих случаях скорость холостого хода совпадает и равна расчетной, значит это свидетельствует об адекватности построенной модели.

Далее исследуем график переходного процесса тока статора на холостом ходу и при набросе нагрузки, рисунок 25.



*Рисунок 25 – График переходного процесса тока статора на холостом ходу и при набросе нагрузки*

Значения, полученные из моделирования, совпадают с расчетными, но с некоторой погрешностью, которая составляет у тока холостого хода 3%, а у номинального тока 10%. Причиной погрешностей можно объяснить тем, что не учитывался эффект вытеснения тока и конструктивные особенности данного двигателя. При пуске двигателя, когда индуктивное сопротивление  $X_2 = \max$ , ток вытесняется в наружный слой паза и из-за этого не задействовано все сечение проводника, следовательно, активное сопротивление обмотки ротора будет увеличиваться.

Для обеспечения приемлемого пускового момента было принято решение увеличить расчетное значение активного сопротивления ротора в 2 раза (рисунок 26).

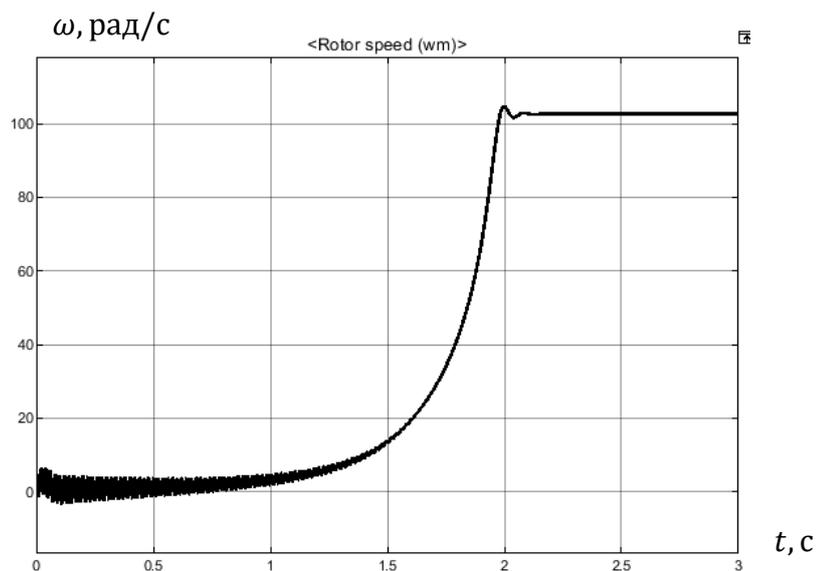


Рисунок 26 – Графики переходных процессов скорости  $\omega=f(t)$  при увеличении активного сопротивления ротора в 2 раза

Затем построим графики переходных процессов момента  $M=f(t)$ , показанных на рисунке 27.

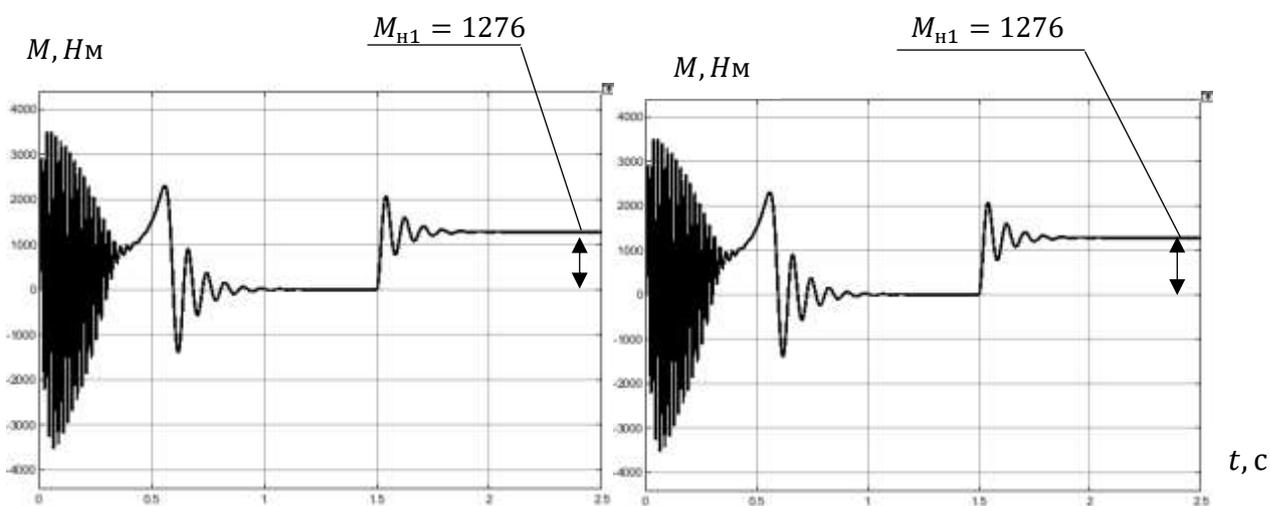


Рисунок 27 – Графики переходных процессов скорости  $M=f(t)$ , полученных а – в модели в осях  $\alpha$  и  $\beta$ ; б – в блоке АД

Величина номинального момента, полученного как в одном, так и в другом случае совпадает, что свидетельствует о адекватности модели.

## 5. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЧ-АД

Для получения семейства переходных процессов при разном значении частоты и требуемой тахограммы, произведем моделирование системы ПЧ-АД с учетом допущения, заключающаяся в том, что при рассмотрении системы электропривода с одним АД, считаем, что остальные работают аналогично и нагрузка между электродвигателями распределяется равномерно.

Определим величину сопротивления для исследования графиков переходного процесса при потреблении и отдачи мощности. Сначала необходимо найти ток в ЗПТ, для этого соберем имитационную модель (рисунок 28).

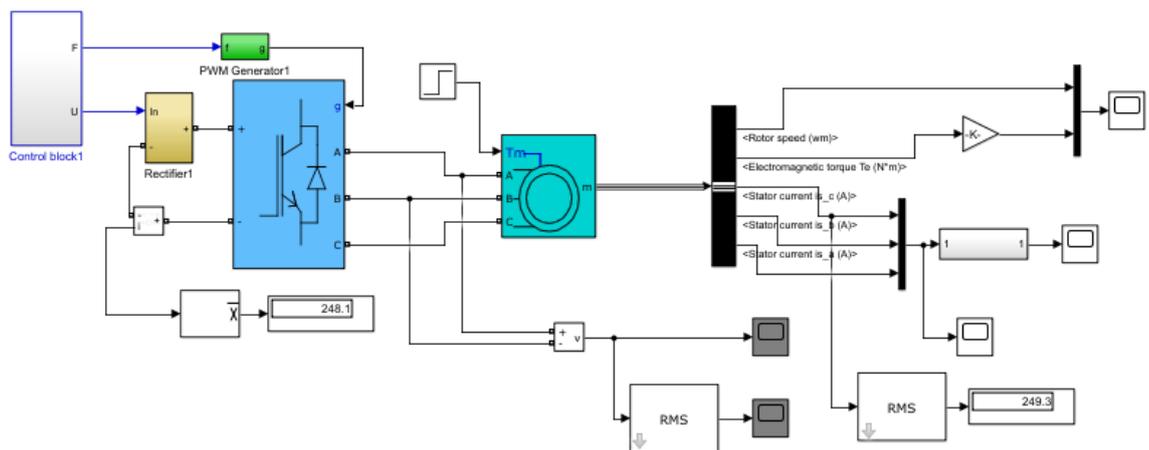


Рисунок 28 – Имитационная модель для нахождения тока в ЗПТ в программной среде MATLAB-Simulink

После определения тока, найдем сопротивление согласно закону Ома.

$$R_{dc} = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{513}{248} = 2,06 \text{ Ом}$$

Для обеспечения работы электропривода в соответствии с заданным технологическим процессом, необходимо ступенчато увеличивать и уменьшать частоту тока в определенные моменты времени. Переходный процесс на рисунке 29 отражает плавно-ступенчатое изменение скорости.

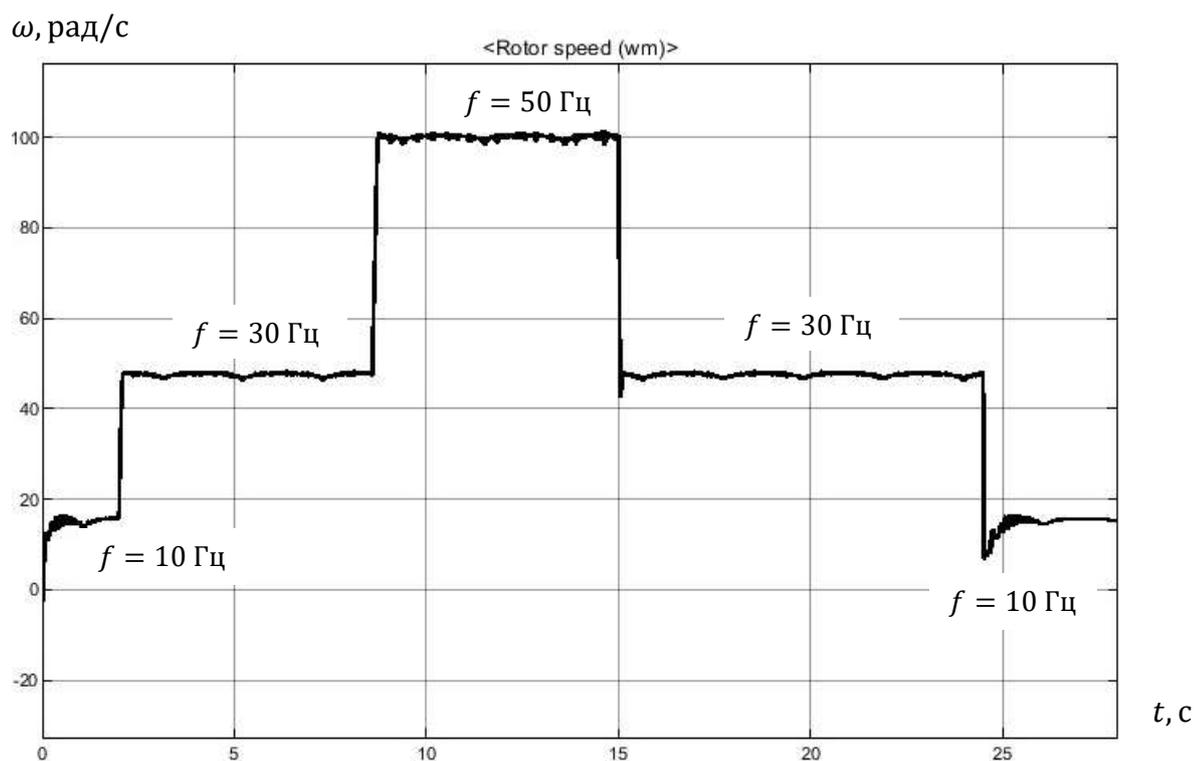


Рисунок 29 – Переходный процесс, отражающий плавно-ступенчатое изменение скорости

При построении требуемой тахограммы было применено допущение, по уменьшению времени третьего скоростного участка при 50 Гц. Причиной этого является ограниченные возможности персонального компьютера при построении динамической характеристики с заданным шагом дискретизации, а также в целях более лучшей визуализации ПП.

Для определения напряжения в звене постоянного тока примем, что АВН будет работать как трехфазный мостовой неуправляемый выпрямитель, тогда напряжение в ЗПТ:

$$U_{dc} = k_{cx} \cdot U_2 = 2,34 \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} = 513 \text{ В}$$

Построим семейство переходных процессов при различном значении частот в заданном диапазоне (рисунок 30).

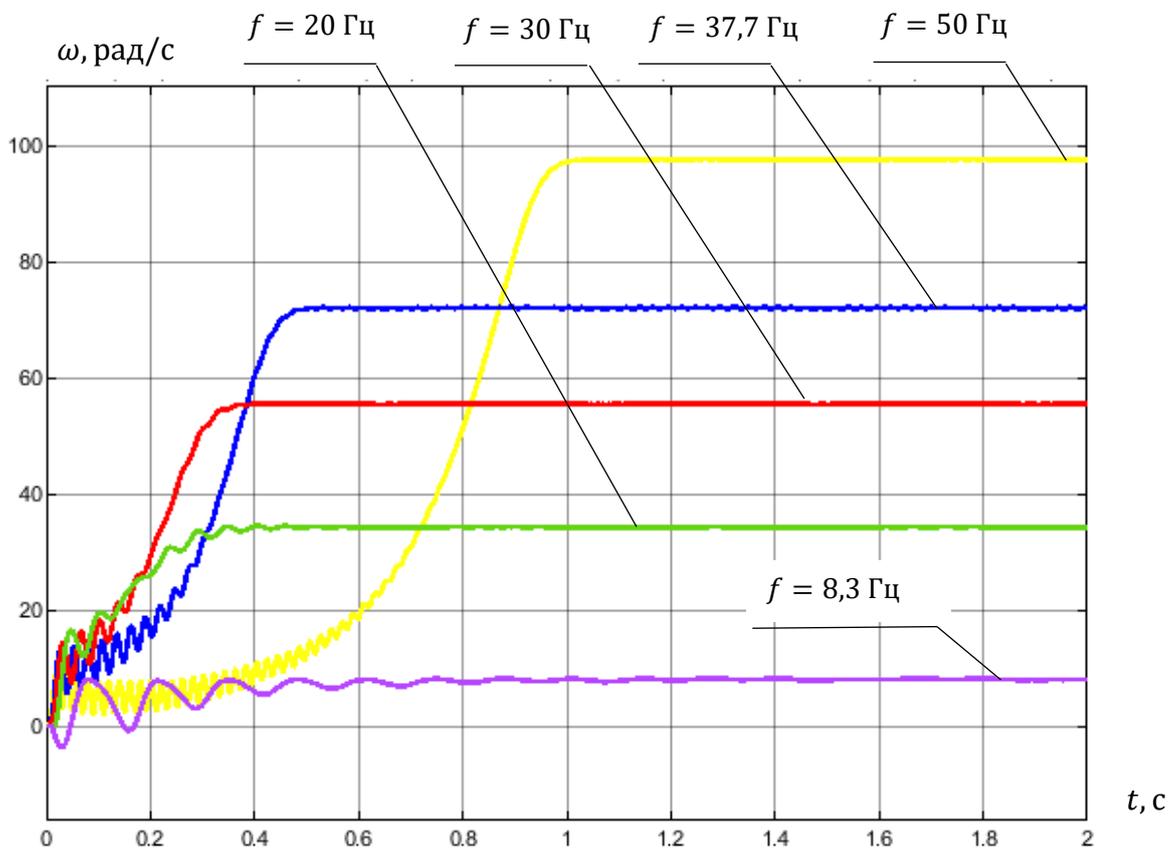


Рисунок 30 – Семейство переходных процессов при различном значении частот в заданном диапазоне

## 6. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Если рассматривать классическую схему ПЧ, то инвертор соединен через звено постоянного тока (ЗПТ) с мостовым двухполупериодным неуправляемым выпрямителем (рисунок 31) [7].

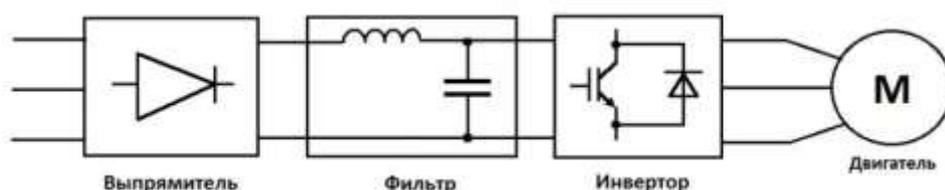


Рисунок 31 – Классическая схема преобразователя частоты

В данном случае для увеличения эффективности показателей качества полезного сигнала и энергосбережения, произведем замену неуправляемого выпрямителя на АВН, который состоит из шести полностью управляемы ключей транзисторов IGBT, причем подача сигналов на силовые ключи будет по векторному закону управлению. Силовая часть привода с АВН без инвертора и электродвигателя представлена на рисунке 32.

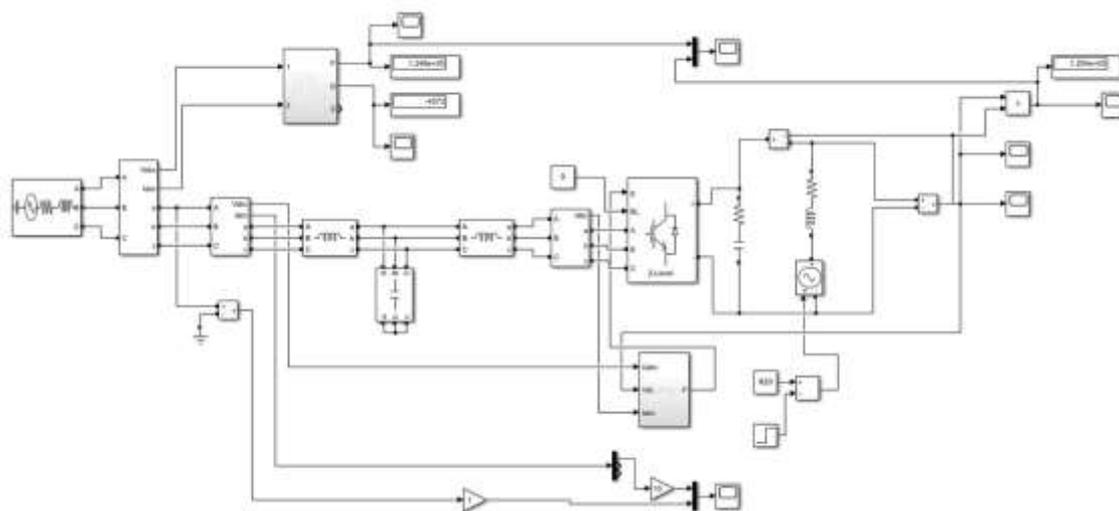


Рисунок 32 – Имитационная модель силовой части привода без инвертора и электродвигателя в программной среде MATLAB-Simulink

Основными компонентами вышеприведённой схемы являются:

- Трёхфазная питающая сеть;
- Дроссели, ограничившие ток в силовой части;
- Блок фильтрующих конденсаторов;
- Активный выпрямитель напряжения (АВН);
- Активное сопротивление в ЗПТ, имитирующее нагрузку.

Значения индуктивности дросселей, предназначенных для ограничения тока в силовой цепи и емкости конденсаторов, а также их внутренних сопротивлений, были выбраны из пособия Руководство по эксплуатации активного выпрямителя напряжения *Altivar AFE* в соответствии с мощностью активного выпрямителя [8].

Контур напряжения (внешний):

- Емкость конденсатора  $C = 100$  мкФ;
- Внутреннее сопротивление конденсатора  $R_C = 20$  мОм.

Контур тока (внутренний):

- Индуктивность катушки  $L = 500$  мкГн;
- Внутреннее сопротивление катушки  $R_L = 20$  мОм.

Схема управления будет состоять из двух контуров управления, а именно тока (внутренний) и напряжения (внешний). В контуре напряжения будет сравниваться выходное напряжение в ЗПТ с задающим, далее производится расчет значения ошибки, которая затем идет на ПИ-регулятор для формирования опорного тока  $i_d$  и тока  $i_q$ , который равен нулю, затем они сравниваются с фактическим током инвертора для получения ошибки, которая используется в ПИ-регуляторе для формирования напряжений  $u_d$  и  $u_q$ . Полученные напряжения преобразуются в трехфазную систему координат, а после сигнал отправляется в ШИМ генератор.

Определим значения пропорциональных и интегральных коэффициентов регуляторов тока и напряжения, согласно методическому пособию [9]. Постоянные времени реактивных элементов были выбраны экспериментально для получения

приемлемых переходных процессов.

- Постоянная времени  $T_C = 200$  мкс;
- Постоянная времени  $T_L = 150$  мкс.

Контур напряжения:

$$\text{Пропорциональный коэффициент } K_p = \frac{3 \cdot C}{T_C} = \frac{3 \cdot 100}{200} = 1,5$$

$$\text{Интегральный коэффициент } K_I = \frac{3 \cdot R_C}{T_C} = \frac{3 \cdot 20 \cdot 10^3}{200} = 300$$

Контур тока:

$$\text{Пропорциональный коэффициент } K_p = \frac{3 \cdot L}{T_L} = \frac{3 \cdot 500}{150} = 10$$

$$\text{Интегральный коэффициент } K_I = \frac{3 \cdot R_L}{T_L} = \frac{3 \cdot 20 \cdot 10^3}{150} = 400$$

Настройка коэффициентов ПИ-регулятора для определения угла поворота системы координат производилась экспериментально, в целях получения адекватных переходных процессов.

Схема управления представлена на рисунке 33 [10].

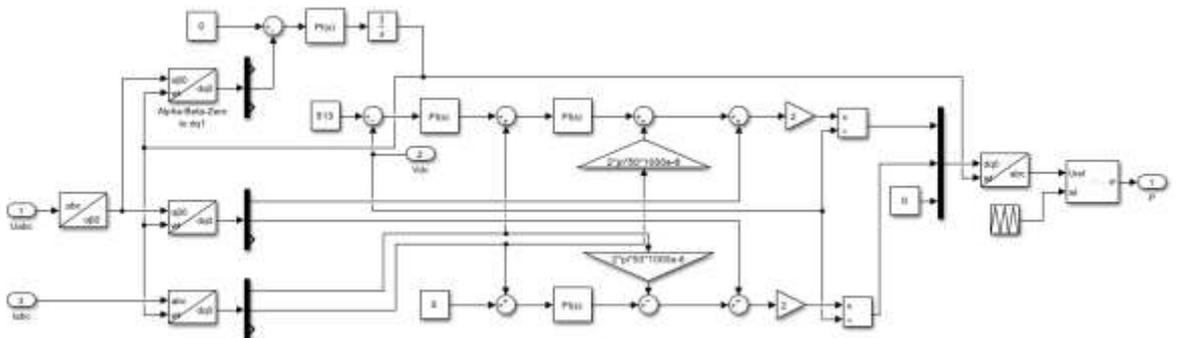


Рисунок 33 – Схема управления с двумя контурами управления

Для демонстрации работы привода при рекуперации мощности, то есть спуске груза, будем принимать значение источника ЭДС постоянного тока больше, чем заданное напряжения в ЗПТ на выходе АВН, по заявлениям компании *Schneider Electric*, выданная в сеть мощность может быть не более 60 % от номинальной.

Имитация режима рекуперации осуществлялась с помощью источника ЭДС, который имел определенную полярность и значение.

На рисунке 34 приведены графики переходного процесса при рекуперации энергии в сеть, а в момент времени 0,5 секунды режим потребления мощности на входе и выходе активного выпрямителя [11].

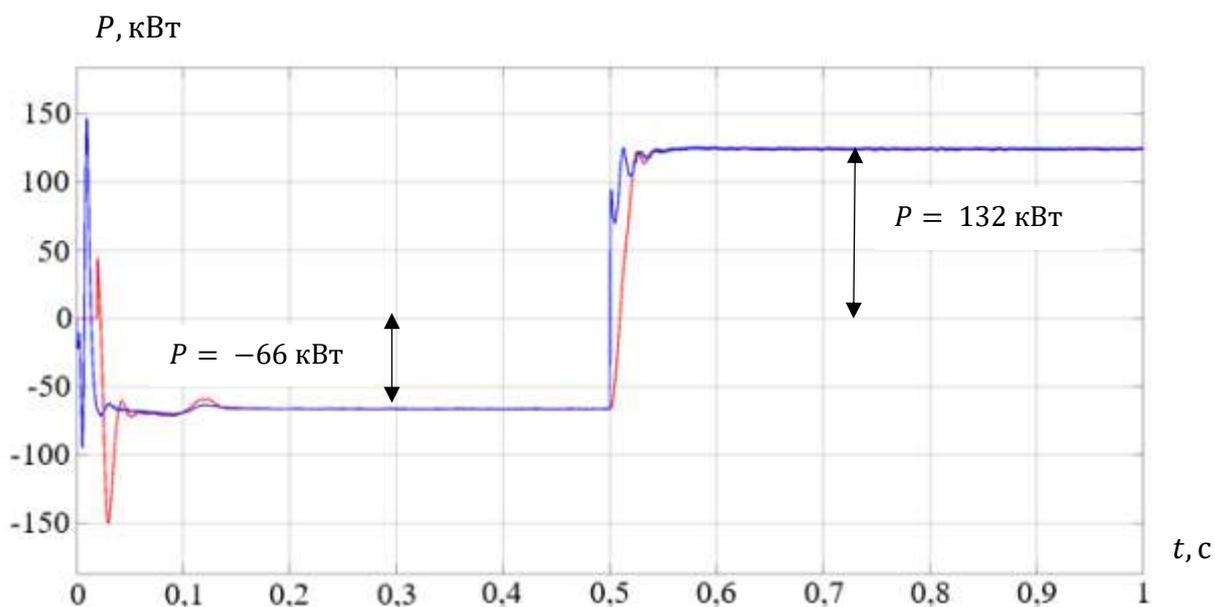
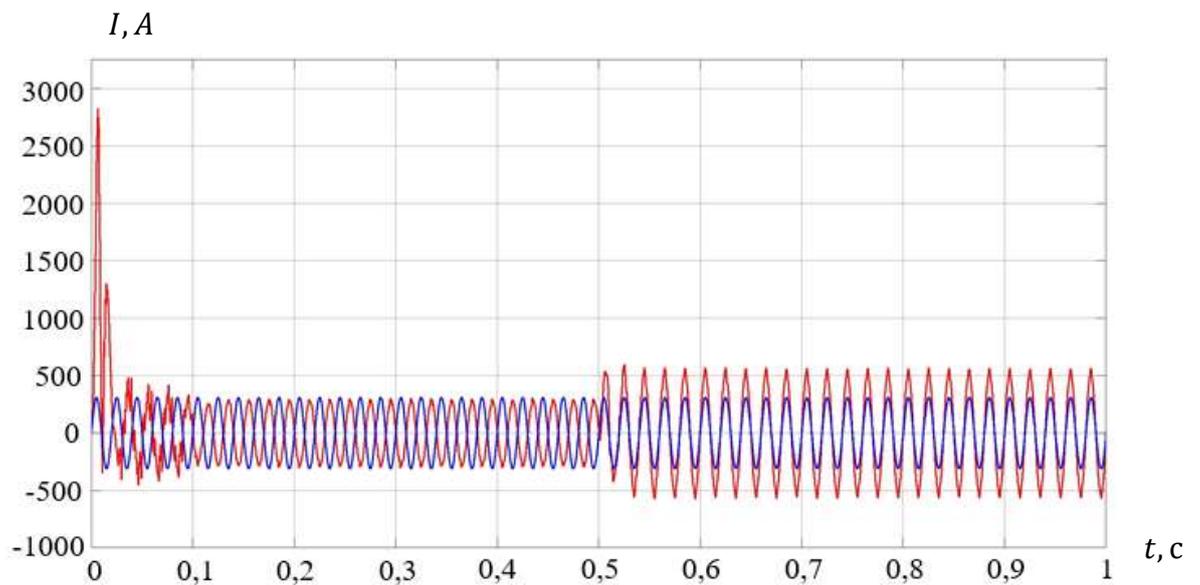


Рисунок 34 График переходного процесса при рекуперации и потреблении активной мощности

Также переход с режима отдачи в сеть мощности на режим потребления можно наблюдать на переходном процессе тока и напряжения фазы А, где в интервале времени (0; 0,5) гармонические сигналы тока и напряжения находятся в противофазе, а после 0,5 секунды практически синфазно (рисунок 35).



*Рисунок 35 График переходного процесса тока и напряжения фазы А при рекуперации и потреблении мощности*

Преимущества активного выпрямителя напряжения относительно классической схеме ПЧ-АД с тормозным резистором:

- Коэффициент нелинейных гармонических искажений <4%;
- Постоянное напряжение в ЗПТ поддерживается за счет векторного управления АВН;
- Коэффициент мощности близкий к 1, не зависящий от нагрузки;
- Энергосбережение.

## 7. КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА

### Введение

В наши дни компании, эксплуатирующие различное электротехническое оборудование на территории России, задумываются о экономии материальных ресурсов за счет новых устройств, но в тоже время не торопятся их приобретать из-за высоких первоначальных затрат.

До сегодняшнего момента предприятия, технологический процесс которых заключается в поднятии и спуске груза, использовали в своем производстве преобразователи частоты (ПЧ) с тормозным резистором. Это решение является простым и дешевым, но имеет существенный недостаток – отсутствие энергосбережения [3].

Вышеобозначенную проблему можно решить с помощью активного выпрямителя напряжения (АВН). При использовании АВН появляется возможность отдачи энергии в сеть при работе в режиме рекуперативного торможения, само устройство размещается между питающей сетью и ПЧ. Внешний вид корпусов ПЧ и АВН могут быть одинаковыми, но управление осуществляется по-разному. Причем к преимуществам АВН можно отнести не только рекуперацию энергии в сеть, но и улучшение таких показателей как: КПД, коэффициент нелинейных гармонических искажений и тд.

### 7.1. Проблема конечного потребителя

Представленные на рынке модели преобразователей частоты, имеют одинаковый принцип работы в независимости от компании производителя. В случае активного характера нагрузки, то есть использования подъемных механизмов и лебедки, сброс избыточной энергии осуществляется на тормозной резистор, где энергия рассеивается в виде тепла. С помощью АВН данную энергию

можно отправить обратно в сеть, тем самым обеспечить энергосбережение на предприятии.

Данной проблемой на территории РФ отечественные производители до недавнего времени не занимались, так как вариант с тормозным резистором является недорогим по стоимости и простым в реализации решением. В связи с изменением экономической ситуации в стране, вопросы энергосбережения для отечественных компаний становятся первоочередными т.к. увеличивается стоимость электроэнергии.

Вышеописанный недостаток можно устранить с помощью активного выпрямителя напряжения, который позволяет поставлять избыточную энергию обратно в питающую сеть, что существенно снижает затраты предприятия на оплату электроэнергии и позволяет реализовать концепцию замкнутого производственного цикла.

К свойствам АВН можно отнести:

- Коэффициент нелинейных гармонических искажений  $<4\%$ ;
- Постоянное напряжение в ЗПТ поддерживается за счет векторного управления АВН;
- Коэффициент мощности близкий к 1, не зависящий от нагрузки;
- Энергосбережение.

## 7.2. Защита интеллектуальной собственности

Защита интеллектуальной собственности на устройство АВН обеспечивается компанией производителем в рамках института коммерческой тайны.

Программа работы активного выпрямителя напряжения является секретом производства и не может быть скопирована или использоваться без подписания лицензионного договора.

### 7.3. Объем и емкость рынка

Рынок активных выпрямителей напряжения на территории РФ не получил широко распространения из-за больших первоначальных затрат. На сегодняшний день в России используются лишь около трех подобных устройств и все они иностранного производства, поэтому можно утверждать, что отечественного рынка АВН не существует.

По данным исследования агентства маркетинговых исследований *Tebiz Group*, предполагаемый объем отечественных производителей в год 8 млрд.руб. Ввиду того, что отечественное устройство будет иметь более низкую стоимость, чем иностранные аналоги, предварительный спрос может составлять порядка 93%. К потенциальным производителям можно отнести: Веспер, Лидер, Овен, ОптимЭлектро, Русэлком, ПолюсПлюс, Триол [12].

Таким образом, можно сформулировать гипотезу, что совокупный объем рынка активных выпрямителей в России составляет:

$$Q = \frac{8 \text{ млрд. руб.}}{(100 - 7)\%} = \frac{8 \text{ млрд}}{0,07} \approx 114,3 \text{ (млрд. руб.)}$$

### 7.4. Современное состояние и перспективы отрасли

Как уже было написано ранее во всех промышленных отраслях на территории РФ широко распространены преобразователи частоты с тормозным резистором для сброса избыточной энергии и последующем рассеиванием ее в тепло, а с помощью АВН можно этого избежать, сохранив тем самым эту энергию.

Ввиду того, что в различных сферах промышленности заинтересовываются в энергосбережении и повышении энергоэффективности, то активный выпрямитель напряжения будет пользоваться особым спросом. Так как в России данного рынка, по сути, не существует, а иностранные аналоги имеют слишком высокую стоимость, то разрабатываемый АВН имеет большие перспективы развития в

самые ближайшие годы.

Главная проблема в том, как убедить потребителя в покупке данного устройства, дополнительно к уже используемому ПЧ.

Расчет окупаемости активного выпрямителя напряжения будут производиться при мощности 132 кВт и одноставочного тарифа на электроэнергию 4,39 рублей, причем, АВН выпрямитель будет эксплуатироваться 24 часа в сутки, то есть постоянно, но так как будут остановки и простой, значит примем время работы в сутки 20 часов [13].

Сначала необходимо рассчитать потребляемую энергию за одни сутки:

$$W_c = P_H \cdot T_c = 132 \cdot 20 = 2640 \text{ кВт/ч}$$

Так как АВН будет использоваться в технологическом процессе, специализирующемся на спуске и поднятии чего-либо, а энергия в питающую сеть может возвращаться только при спуске, произведем расчет электроэнергии, сэкономленной при опускании груза. Причем по данным компании *Schneider Electric*, энергосбережение можно осуществить не более 60 % [4].

$$W_{сп} = P_H \cdot T_{сп} \cdot 0,6 = 132 \cdot 10 \cdot 0,6 = 792 \text{ кВт/ч}$$

Следующим шагом вычислим сумму денежных средств, которую возможно сэкономить за одни сутки:

$$S_c = W_{сп} \cdot 4,39 = 792 \cdot 4,39 = 3476,88 \text{ руб}$$

Далее произведем расчет срока окупаемости АВН, причем стоимость устройства составляет 700000 рублей [14]:

$$PP = \frac{700000}{S_c} = \frac{700000}{3476,88} = 202 \text{ дня}$$

Примечание, вышеизложенный расчет показывает минимальное количество времени окупаемости агрегата. В зависимости от технологического процесса, срок

окупаемости будет изменяться, причем в большую сторону.

### 7.5. Конкурентные преимущества разрабатываемого продукта

Анализ продукции конкурирующих производителей активных выпрямителей напряжения показал, что разрабатываемый агрегат обладает несколькими неоспоримыми преимуществами по сравнению с иностранными аналогами, в то же время ничем не будет уступать по техническим возможностям.

Конкурентные преимущества разрабатываемого АВН:

- Более низкая стоимость устройства относительно иностранных аналогов;
- Отечественное производство;
- Отсутствие конкурентов на российском рынке.

Меньшая цена отечественного активного выпрямителя связана с тем, что иностранные производители уже наладили каналы сбыта своей продукции, оптимизировали производство и сделали наценку на выпускаемые устройства, а отечественный АВН будет привлекать потребителей как раз за счет пониженной стоимости.

В сегодняшних условиях российский производитель считается наиболее предпочтительным, так как не будет перебоя с поставками и закупкой необходимого оборудования для предприятия.

### 7.6. Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта

Основные потребители активного выпрямителя напряжения по отраслям промышленности (модель B2B) [15]:

- Metallургическая отрасль, 127 предприятий и комбинатов по РФ;
- Пассажирские и грузовые лифты, 35 компаний в РФ;

– Различные квалификации кранов (мостовые, тросовые и консольные), 64 компании в РФ.

### 7.7. Планируемая стоимость продукта

АВН состоит из трех основных частей:

1. Модуль сетевого фильтра
2. Сетевой дроссель
3. Автономный инвертор напряжения

Основной составляющей себестоимости АВН является автономный инвертор напряжения. По данным ООО “НПК “Промышленные системы” средняя себестоимость активного выпрямителя мощностью 132 кВт составляет около 538 тыс. рублей.

Цена товара складывается из его себестоимости, маржи и ставки НДС = 20%. Итоговая цена одного продукта равняется 700000 рублей.

Себестоимость АВН в переводе на рубли и доллары представлена в таблице 7.

Таблица 7 Себестоимость АВН в переводе на рубли и доллары

|   |        |           |
|---|--------|-----------|
| По курсу марта 2023<br>(1\$ = 76 руб 1 евро = 82 руб)   | 700000 | 9210 дол. |
| По курсу апреля 2023<br>(1\$ = 82 руб, 1 евро = 89 руб) | 700000 | 8536 дол. |

### 7.8. Бизнес-модель проекта

Бизнес-модель — это концептуальная модель бизнеса, которая иллюстрирует логику создания добавленной стоимости. Данная модель отвечает на ключевые вопросы, связанные с реализацией продукта, описывая свойства потребителя, ресурсов и самого продукта с коммерческой точки зрения [16].

В данной работе приводится разработка бизнес-модели газоанализатора по шаблону А. Остервальдера и И. Пинье. Данная модель включает в себя девять

блоков с характеристиками: сегментов потребителя, ценностного предложения, каналов сбыта продукта, взаимоотношений с клиентами, потока доходов организации, ключевых ресурсов, видов деятельности организации, ключевых партнеров и поставщиков, а также структуры расходов предприятия [17].

Схема бизнес-модели газоанализатора по модели Остервальдера приведена в Приложении 1.

### 7.9. Производственный план и план продаж

При планировании производства важным является определение точки безубыточности. Точка безубыточности – это объём производства и реализации продукции, при котором расходы будут компенсированы доходами, а при производстве и реализации каждой последующей единицы продукции предприятие получает прибыль. Точку безубыточности измеряют в натуральном или денежном выражении.

Точка безубыточности в натуральном выражении рассчитывается по формуле:

$$BEP = \frac{TFC}{(p - AVC)},$$

где:

*BEP* – точка безубыточности

*TFC* – постоянные издержки

*AVC* – переменные издержки на единицу продукции

*p* – цена реализации товара покупателю

К постоянным расходам относится зарплата электромонтёра, осуществляющего сборку устройства (35000 рублей в месяц), зарплата инженера по пуско-наладочным работам (по 57000 рублей в месяц) и зарплата менеджера-управляющего (по 65000 рублей в месяц), различные инструменты для монтажа

(18000 рублей в 6 месяцев). Спецодежда, СИЗ и рабочие столы (20000 рублей в 6 месяцев), а также аренда производственного помещения (40000 рублей в месяц) [18].

К переменным издержкам относятся стоимость расходных материалов для производства одного прибора (395000 рублей) и оплата коммунальных услуг (в основном, электричества – 3000 рублей в месяц).

Расчет точки безубыточности:

$$BEP = \frac{TFC}{(p - AVC)} = \frac{57000 + 35000 + 40000 + 65000 + 18000 + 20000}{600000 - (395000 + 3000)} \approx 1$$

#### 7.10. Стратегия продвижения продукта на рынок

Жизненный цикл продукта соответствует методу водопада, или каскадному методу. Данная модель разработки заключается в последовательности жестко заданных стадий жизненного цикла разработки — с последовательным прохождением стадий анализа требований, проектирования, реализации, тестирования, интеграции и поддержки. Данная модель используется из-за технологической сложности разработки и производства продукта.

Исследуя каналы маркетинга продукта, можно выделить следующие эффективные пути продвижения на рынке:

1) Научно-технологические форумы и выставки. На таких мероприятиях одновременно присутствуют множество компаний – потенциальных потребителей продукта. Посредством установления личных коммуникаций и наглядной демонстрации работы устройства, реализуется наиболее эффективная реклама продукта. Примеры подобных мероприятий: Российский форум “Микроэлектроника”, международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления” [19].

2) Публикация статей в Интернет-журналах и на образовательно-технологических онлайн ресурсах. Данный канал маркетинга является наиболее

оптимальным для продвижения АВН, так как такой способ собирает большое количество потенциальных потребителей. Публикация статьи образовательно-технического характера в контексте предлагаемого продукта позволяет проводить практически бесплатную рекламную кампанию. Примеры подобных Интернет-ресурсов: “Хабр”, “Компэл”, “industry-hunter.com”, “element14”, “Компоненты и технологии”.

## 8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему законодательных актов и соответствующих им социально-экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Научно-исследовательская работа включает изучение технологии охлаждения раскаленного кокса в технологическом процессе металлургического производства. Объектом исследования является механизм электропривода подъема установки сухого тушения кокса (УСТК), который применяется для осуществления плавного спуска и подъема груза.

Рабочим местом является производственное помещение площадью 400 м<sup>2</sup>, к основному оборудованию рабочей зоны можно отнести: электродвигатели(4шт.), редукторы(2шт.), барабан(1шт.), активный выпрямитель напряжения (1шт.) и лебедка. В данном разделе проведена работа по технике безопасности, по охране окружающей среды, а также были приняты меры пожарной безопасности. Рассмотрены некоторые рекомендации по улучшению условий труда.

### 8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Правовые и организационные вопросы между работником и работодателем решаются с помощью Трудового кодекса Российской Федерации, который устанавливает права и обязанности работника и работодателя, регулирует вопросы охраны труда, правила оплаты и нормирования труда и другие вопросы [20].

Согласно 91 и 108 статей ТК РФ, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Общие требования к организации и оборудованию рабочих мест при выполнении работ стоя даны в ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место должно быть

организовано с учетом эргономических требований. Эргономические требования к планировке рабочего места должны соответствовать ГОСТ 22269-76 [21].

Согласно ГОСТ 22269-76 Система «Человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования:

Взаимное расположение элементов рабочего места должно способствовать оптимальному режиму труда и отдыха, снижению утомляемости персонала.

Для описания требований электробезопасности электроустановок производственного и бытового назначения на стадиях проектирования, изготовления, монтажа, наладки, испытаний и эксплуатации существует ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [22].

## 8.2. Производственная безопасность

В данном пункте производится анализ вредных и опасных факторов, возникающих при эксплуатации механизма электропривода подъема. Факторы приведены в таблице 8.

Таблица 8. Возможные опасные и вредные факторы

| Факторы ГОСТ 12.0.003-2015        | Нормативные документы   |
|-----------------------------------|---|
| Высокий уровень шума              | ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности [23].   |
| Вибрация выше установленной нормы | СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [24]. |

|   |   |
|---|---|
| Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны                              | СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23- 05-95* (с Изменениями N 1, 2) [25].         |
| Поражение электрическим током   | ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [26]. |
| Травмирование персонала вращающимися частями электродвигателей и механизмов | Приказ Минтруда РФ от 15.12.2020 N 903Н "Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок" [27].                   |

### 8.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов

#### 8.3.1. Высокий уровень шума

В результате гигиенических исследований установлено, что шум ухудшает условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека. Повышенный уровень шума на производстве создается из-за: электродвигателей, преобразователей частоты и механизмы. При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные явления:

- снижается острота зрения, слуха;
- повышается кровяное давление;
- снижается внимание.

Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

Нормативным документом, рассматривающим уровни шума для различных категорий рабочих мест, служебных помещений является ГОСТ 12.1.003-2014. Уровень шума не должен превышать 80 дБА [23].

Для уменьшения влияния шума на человека, могут применяться средства коллективной защиты: спецодежда и защитные средства органов слуха: наушники, беруши, а также изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов).

### 8.3.2. Вибрация выше установленной нормы

Вредным производственным фактором является вибрация - механические колебания твёрдых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечно-сосудистой и нервной системы, а также опорно-двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ВШВ-003, снабженным датчиком вибрации. К источникам вибрации относятся: электрические машины, электротехнические устройства, редукторы и барабан.

Вибрация может действовать локально (например, на руки), так и на весь организм. Но в любом случае она способна к распространению, отражаясь на нервной и опорно-двигательной системе. В таблице 9 приведены допустимые уровни вибрации для производственных помещений.

Таблица 9 Значения вибрации в производственных помещениях

| Амплитуда колебаний вибрации, мм | Частота вибрации, Гц | Скорость колебательных движений, см/с | Ускорение колебательных движений, см/с <sup>2</sup> |
|----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|---|
| 0,6-0,4                          | До 3                 | 1,12-0,76                             | 22-14   |
| 0,4-0,15                         | 3-5                  | 0,76-0,46                             | 14-15   |
| 0,15-0,05                        | 5-8                  | 0,46-0,25                             | 15-13   |
| 0,05-0,03                        | 8-15                 | 0,25-0,28                             | 13-27   |

|             |        |           |         |
|-------------|--------|-----------|---------|
| 0,03-0,009  | 15-30  | 0,28-0,17 | 27-32   |
| 0,009-0,007 | 30-50  | 0,17-0,22 | 32-70   |
| 0,007-0,005 | 50-75  | 0,22-0,23 | 70-112  |
| 0,005-0,003 | 75-100 | 0,23-0,19 | 112-120 |
| 1,5-2       | 45-55  | 1,5-2,5   | 25-50   |

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» предельно допустимый эквивалентный скорректированный уровень виброускорения на стационарных рабочих местах в направлении действия Z0 (вертикальная ось, перпендикулярная к опорной поверхности) составляет 100 дБ, а в направлении действия X0 (горизонтальная ось от спины к груди) и Y0 (горизонтальная ось от правого плеча к левому) составляет 97 дБ [24].

Для снижения воздействия вибрирующих машин и оборудования на организм человека применяются следующие меры и средства:

- виброгашение - установка вибрирующего оборудования на массивный бетонный фундамент;
- применение виброизоляции вибрирующих машин относительно основания (например, применение рессор, резиновых прокладок, пружин, амортизаторов);
- вибродемпфирование - нанесение на вибрирующую поверхность слоя упруго-вязких материалов (мастик).

### 8.3.3. Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны

Принципиальной задачей на производстве, считается создание лучших условий видимости. Данную задачу можно решить лишь осветительной системой. Согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»

рекомендуемая освещённость участков, содержащих необходимое оборудование, должна быть 200 лк [25].

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным производственным факторам, который может вызвать ослепленность или привести к быстрому утомлению и снижению работоспособности [28]. Источником возникновения данного фактора может служить отсутствие естественного освещения и недостаточное искусственное.

Так как в работе рассматривается технологический процесс с полностью автоматизированным электроприводом, следует предусматривать освещение для наблюдения за работой оборудования, а также дополнительно включаемые светильники общего и местного освещения для обеспечения необходимой (в соответствии с таблицей 10) освещенности при ремонтно-наладочных работах.

Таблица 10 Нормы освещенности на рабочих местах.

| Характеристика зрительной работы | Наименьший размер объекта, мм | Разряд зрительной работы | Контраст объекта с фоном | Характеристика фона | Искусственное освещение, лк | Естественное освещение КЕО, % | Совместное освещение КЕО, % |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Средней точности                 | Св.0,5 до 1,0                 | IVв                      | Средний                  | Средний             | 200                         | 4,0                           | 2,4                         |
| Малой точности                   | Св. 1,0 до 5,0                | Vв                       | Средний                  | Средний             | 200                         | 3,0                           | 1,8                         |

#### 8.3.4. Поражение электрическим током

Электрический ток относится к опасным факторам. При поражении электрическим током могут наблюдаться нарушения деятельности сердечно-сосудистой системы, дыхания, нервной системы, электроожоги. Источником электропоражения служит электрический ток, протекающий по кабелям и силовым частям электрических преобразователей. Исходя из ГОСТ 12.1.019-2017, в целях исключения поражением электрическим током, запрещается [26]:

- производить какие-либо ремонтно-восстановительные работы на электродвигателях или электротехнических устройствах при поданном напряжении;
- при работе около неограждённых токоведущих частей располагаться так, чтобы эти части находились сзади работника или по обеим сторонам от него;
- работать в одежде с короткими или засученными рукавами, а также использовать ножовки, напильники, металлические метры;
- на рабочем месте находится без диэлектрических перчаток и спецодежды;
- работы в неосвещенных местах;
- прикасаться без применения электрозащитных средств к изоляторам, изолирующим частям оборудования, находящегося под напряжением.

К организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность работ в электроустановках можно отнести инструктажи, которые проводятся для доведения до персонала содержания требований и организации безопасного труда и соблюдения правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок, а также оформление работ нарядом-допуском, распоряжением которые определяют категорию и характер работы, место, время квалификационный состав бригады, условия безопасности работы и ответственных руководителей.

К техническим мероприятиям, которые выполняются для подготовки рабочего места при работах со снятием напряжения относятся отключение коммутационной аппаратуры, вывешивание запрещающих плакатов и проверка отсутствия напряжения на токоведущих частях, на которые должно быть наложено заземления для защиты людей от поражения электротоком.

### 8.3.5. Травмирование персонала вращающимися частями электродвигателей и механизмов

Травмирование рабочего вращающимися частями электродвигателей и механизмов является опасным производственным фактором, которое может

привести к перелому костей или повреждению мягких тканей. К вращающимся частям можно отнести валы электродвигателей и редукторов, а также выпирающие части барабана.

Согласно Приказу Минтруда РФ от 15.12.2020 N 903Н "Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок", избежать подобных последствий можно выполняя следующие условия [27]:

- работать в защитной каске с использованием средств защиты лица и глаз, застегнутой спецодежде, остерегаясь захвата ее вращающимися частями машины;
- запрещено снимать ограждения или кожухи вращающихся частей работающих электродвигателя и механизма;
- работу на вращающемся электродвигателе без соприкосновения с вращающимися частями разрешается проводить по распоряжению.

#### 8.4. Экологическая безопасность

Электродвигатели и электротехнические устройства, такие как ПЧ и АВН содержат в своем составе токсичные вещества, представляющие угрозу, как для человека, так и для окружающей среды. К таким веществам относятся: медь, алюминий, свинец, ртуть, никель и цинк, щелочи.

Следовательно, для утилизации электротехнических устройств применяется комплекс специальных мероприятий, а именно:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специальной переработке.

При утилизации комплектующих частей ПЧ или АВН, люминесцентных ламп, макулатуры происходит негативное воздействие на литосферу. Продукты жизнедеятельности персонала неблагоприятно влияют на гидросферу. А воздействие на атмосферу происходит в случае выделения токсических веществ

при неправильной утилизации комплектующих.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28.12.2020 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп [29].

Утилизация электродвигателей осуществляется с помощью специальных станков для разборки электродвигателей. Станок позволяет выполнять такие операции как: разрушение корпусов электродвигателей, извлечение медной обмотки из статора.

Процесс состоит из трех этапов:

1. Разрушение корпуса статора;
2. Разделение статора на две части;
3. Извлечение медной обмотки из обеих частей статора.

#### 8.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для обеспечения безопасности и защите населения и территорий применяется ГОСТ Р 22.0.07-95 «Безопасность в ЧС. Источники техногенных ЧС. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров», ФЗ от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера».

Основными причинами аварий и чрезвычайных ситуаций на производстве являются:

- различные стихийные бедствия;
- не компетенция лиц, допущенных к установкам и раздающим указания;
- нарушения режимов технологических процессов;

- нарушение правил техники безопасности.

Для данного вида технологического процесса характерны следующие виды ЧС:

- Пожар;
- Обрушение зданий, конструкций;
- Землетрясение.

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией, при разработке электропривода, является пожар на рабочем месте. Так как электротехнические устройства и электродвигатели находятся под напряжением, то в случае возникновения пожара, он будет относиться к классу (Е).

В качестве противопожарных мер должны быть выполнены следующие пункты:

- Недопущение использования неисправного оборудования;
- Ознакомление сотрудников с правилами пожарной безопасности;
- Знание сотрудниками мест нахождения средств пожаротушения.

В качестве средств пожаротушения могут применяться: огнетушители ОП-5, ОП-2 - порошковые, предназначены для тушения загорания установок под напряжением до 1000В. Огнетушитель ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 - углекислотные, применяются для тушения электрооборудования под напряжением до 1000 В. и других предметов.

## Вывод

В ходе выполнения работы по разделу «Социальная ответственность» были выявлены опасные и вредные факторы, которые могут оказывать влияние на персонал обслуживающий электропривод подъема, а также был проведен анализ нормативной документации. Для исключения или уменьшения влияния опасных и вредных факторов на человека и окружающую среду были предложены необходимые меры. Согласно Федеральному закону "О специальной оценке

условий труда" условия труда являются допустимыми.

В разделе ВКР «Социальная ответственность», был произведён анализ рабочего места во время исследовательской работы, а также были рассмотрены:

- Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности;
- Возможные вредные и опасные факторы на рабочем месте;
- Анализ возможного вредного воздействия исследования на экологию и способы защиты атмосферы, гидросферы и литосферы;
- Возможные чрезвычайные ситуации, а также описаны действия работника при наиболее вероятной ЧС– пожар.

В соответствии с ПУЭ рабочее помещение относится к категории сухих [30].

Перед допуском к самостоятельной работе оперативному персоналу электропривода подъема необходимо пройти вводный инструктаж по охране труда, проверку знаний, в том числе по электробезопасности с присвоением не менее 3-й группы по электробезопасности.

Категория тяжести труда по СанПиН 1.2.3685-21 является Па, энерготраты которой составляют до 210 Дж/с [24].

Согласно СП 12.13130.2009 рабочая зона, где размещена система электропривода подъема относится к категории В и считается пожароопасным [31]. Такая классификация связана с наличием горючих и трудногорючих материалов и веществ, которые при контакте с воздухом горят без образования взрывоопасных смесей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы был описан электропривод, а также было приведено основное электротехническое оборудование в выбранном технологическом процессе.

При выполнении расчетов параметров схемы замещения АД были построены естественные (механическая и электромеханическая) характеристики. После определения рабочего диапазона частот, было построено семейство механических характеристик для доказательства работы двигателя в указанном диапазоне частот.

Проверка адекватности модели АД проводилась с помощью блока АД и модели в осях  $\alpha$  и  $\beta$ . По полученным графикам переходных процессов можно сделать вывод о адекватности смоделированных моделей.

Силовая схема привода была разделена на две части ввиду возможностей программы *MATLAB*. При рассмотрении имитационной модели ПЧ-АД, была получена требуемая тахограмма электропривода, а также семейство переходных процессов угловой частоты вращения при соответствующей частоте тока. В ходе выполнения моделирования активного выпрямителя напряжения был получен переходный процесс активной мощности, где было продемонстрировано потребление и рекуперация мощности, также это было подтверждено переходным процессом напряжения и тока, где при отдаче мощности ток имел противоположное направление, а при потреблении мощности ток и напряжение – синфазные. Причем АВН имеет векторное управление, что позволяет регулировать напряжение в ЗПТ, в то время как ПЧ- скалярное.

В разделе концепция стартап-проекта было показано энергоэффективность и энергосбережение за счет активного выпрямителя напряжения. Произведен расчет точки безубыточности, окупаемости и предполагаемого объема рынка. Описана стратегия продвижения продукта на рынок и конкурентные преимущества относительно иностранных аналогов.

Раздел социальная ответственность отражает информацию о опасных и вредных производственных факторов, которые могут негативно влиять на рабочих, эксплуатирующих электропривод подъема, а также произведен анализ вредного воздействия на окружающую среду и возможных ЧС. Все вышеизложенное подкреплено нормативной документацией.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Область деятельности ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК - <https://www.evraz.com/ru/> (Режим доступа свободный) (Дата обращения 5.04.2023)
2. Удут Л. С., Кояин Н. В., Мальцева О. П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 6. Механическая система электропривода постоянного тока: учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп.– Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 148 с.
3. Тормозные резисторы для силовых модулей PM330. Издательство: SIEMENS, 2017. — 24 с.
4. Руководство по выбору устройств рекуперации для ПЧ ATV61/71 мощностью от 120 до 860 кВт. Издательство: *Schneider Electric*, 2010. — 98 с.
5. Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Расчет характеристик электроприводов переменного тока. Ч. 1. Асинхронный электродвигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136с.
6. Удут Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд. перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
7. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
8. *Altivar 71*. Каталог 09. Издательство: *Schneider Electric*, 2010. — 94 с.
9. Е.А. Воротилкин. Моделирование системы векторного управления асинхронного двигателя с контуром потока. 2018. – 66 с.
10. Дьяконов В. П. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5*: Основы применения: Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

11. Терехин В.Б. Компьютерное регулирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учебное пособие / В.Б.Терехин, Ю.Н. Дементьев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 307 с.
12. *Tebiz Group* - Маркетинговые исследования и отчеты. Режим доступа: [https://tebiz.ru/company?\\_openstat=ZGlyZWN0LnIhbmRleC5ydTsyMzcyNTc3OTsxMTExMTk1MzU3](https://tebiz.ru/company?_openstat=ZGlyZWN0LnIhbmRleC5ydTsyMzcyNTc3OTsxMTExMTk1MzU3) , свободный (дата обращения: 01.05.23).
13. Тарифы на электроэнергию в Томске и Томской области. Режим доступа: [https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie/tarifynaeelektroenergiju/tomskaya\\_oblast/39310](https://energovopros.ru/spravochnik/elektrosnabzhenie/tarifynaeelektroenergiju/tomskaya_oblast/39310) , свободный (дата обращения: 05.05.23).
14. Расчет срока окупаемости проекта. Режим доступа: <https://www.business.ru/article/2763-kak-rasschitat-srok-okupaemosti-proekta-formula-primery> , свободный (дата обращения: 05.05.23).
15. Бизнес-справочник предприятий «Компании РФ». Режим доступа: <https://xn--80aqafkhejn4b.xn--p1ai/> , свободный (дата обращения: 05.05.23).
16. Бизнес-модель Остервальдера: что это такое? – *ProductStar*: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vc.ru/s/productstar/135102-biznes-model-ostervaldera-chto-eto-takoe>, свободный (дата обращения: 01.06.23).
17. Остервальдер А., Пинье И. Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора. — М.: Альпина Паблишер, 2016. — 288 с. (с. 20–43, 51–80).
18. *Head Hunter* – данные о заработной плате. Режим доступа: <https://tomsk.hh.ru/catalog> , свободный (дата обращения: 05.05.23).
19. Российский форум “Микроэлектроника”. Режим доступа: <https://microelectronica.pro>, свободный (дата обращения: 05.05.23).
20. Трудовой кодекс ТК РФ. [Электронный ресурс]: URL: <https://base.garant.ru/12125268/> (дата обращения 12.05.2023).

21. ГОСТ 22269-76 Система "Человек-машина". Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
22. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
23. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
24. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
25. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 (с Изменениями N 1, 2).
26. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
27. Приказ Минтруда РФ от 15.12.2020 N 903Н "Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок".
28. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
29. Постановление правительства РФ от 28.12.2020 г. Об утверждении правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде.
30. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК Седьмое издание Раздел 1 ОБЩИЕ ПРАВИЛА Глава 1.1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ.
31. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1).

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Бизнес-модели АВН А. Остервальдера и И. Пинье**

|  |   |   |  |  |
|--|---|---|--|--|
| <p><u>Ключевые партнеры</u></p> <p>Стратегическое сотрудничество с неконкурирующими компаниями: EVRAZ Group, Мослифт, Щербинский Лифтостроительный Завод</p> <p>Поставщики комплектующих: НМ-Тех, АО «Ангстрем», НИИМЭ и Микрон.</p> | <p><u>Ключевые виды деятельности</u></p> <p>Производство: создание устройств для промышленных отраслей</p> <p><u>Ключевые ресурсы</u></p> <p>Материальные ресурсы: комплектующие и сырье<br/>         Интеллектуальные ресурсы: программное обеспечение продукта, технология производства<br/>         Персонал: сборка и обслуживание устройств.</p> | <p><u>Ценностное предложение</u></p> <p>Новизна: уникальные технические характеристики продукта и повышение энергоэффективности;<br/>         Производительность: эффективность технологических процессов при использовании продукта;<br/>         Цена: продукткратно дешевле рыночных аналогов;<br/>         Доступность: сложное в производстве оборудование;<br/>         Удобство при использовании: специальное программное обеспечение упрощает пользование продуктом.</p> | <p><u>Взаимодействие с клиентом</u></p> <p>Персональная поддержка: обслуживание и техподдержка;<br/>         Самообслуживание: потребитель может самостоятельно производить калибровку работы и диагностику продукта;<br/>         Совместное создание: вариация комплектации продукта.</p> <p><u>Каналы сбыта</u></p> <p>Прямые: Продажи через Интернет-платформы.<br/>         Косвенные: Продажи через региональных представителей.</p> | <p><u>Потребительские сегменты</u></p> <p>Нишевой рынок B2B: металлургия, машиностроение и строительство</p> <p>Предприятия данных отраслей, которые занимаются поднятием и спуском производственных грузов.</p> |
| <p><u>Структура издержек</u></p> <p>Фиксированные издержки: зарплата и арендная плата за помещение<br/>         Переменные издержки: закупка комплектующих и запчастей при производстве и обслуживании.</p>                          |   | <p><u>Поток поступления доходов</u></p> <p><b><u>Доход от разовых сделок, регулярный доход от постпродажного обслуживания. Генерация дохода осуществляется через продажу активов.</u></b></p>   |  |  |