

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

---

Институт электронного обучения  
140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий организаций и учреждений»  
Кафедра Электропривода и электрооборудования

**ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА**

| Тема работы   |
|---|
| <b>Модернизация насосной станции 2-го водоподъема</b> |

УДК 621.314.26:62-541.42:62-83:628.132

Студент

| Группа | ФИО                        | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------|---------|------|
| 3-7401 | Пономарев Максим Сергеевич |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Кладиев С.Н. | К.Т.Н.                    |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Трофимова М. Н. |                           |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Сечин А. А. | К.Т.Н.                    |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Должность     | ФИО            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Зав. кафедрой | Дементьев Ю.Н. | Ph.D., К.Т.Н.             |         |      |

Томск – 2016 г.

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

---

Институт электронного обучения  
140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, органи-  
заций и учреждений»  
Кафедра Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Ю.Н. Дементьев

(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Дипломного проекта

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

Студенту:

| Группа | ФИО             |
|--------|-----------------|
| 3-7401 | Пономареву М.С. |

Тема работы:

Модернизация насосной станции 2-го водоподъема

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

26. 06. 2016 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Исходные данные к работе</b>   | Техническое задание на проектирование   |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов:</b>              | <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> |
| <b>Перечень графического материала</b>  |   |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br>(с указанием разделов) |   |
| <b>Раздел</b>   | <b>Консультант</b>  |
| Основной общий и специальный  | Руководитель дипломной работы Кладиев С.Н.  |

|  |   |
|--|---|
| <i>разделы ВКР</i>   |   |
| <i>Экономическая часть ВКР</i>   | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение |
| <i>Раздел экология и техника безопасности</i>  | Социальная ответственность                                      |
|  |   |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>                          |   |
| <i>Основная и специальная части, экономическая часть и раздел экология и техника безопасности – русский язык</i> |   |
| <i>Должно быть написано на русском и иностранном языке. Реферат – на русском и иностранном языке</i>             |   |

|   |                 |
|---|-----------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 26. 01. 2016 г. |
|---|-----------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность       | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф ЭПЭО | Кладиев С.Н. | к.т.н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО            | Подпись | Дата |
|--------|----------------|---------|------|
| 3-7401 | Пономарев М.С. |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                 |
| 3 - 7401      | Пономарев Максим Сергеевич |

|                            |                       |                                  |   |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|---|
| <b>Институт</b>            | Электронного обучения | <b>Кафедра</b>                   | ЭПЭО  |
| <b>Уровень образования</b> | Специалист            | <b>Направление/специальность</b> | 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

|   |   |
|---|---|
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Сравнение экономической эффективности привода |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>   | Расчет капиталовложений                       |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>                                  | Расчет затрат на проектирование               |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|   |  |
|---|--|
| 1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>                                     | Расчет годовых эксплуатационных затрат   |
| 2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР</i>                                      | Годовые затраты на обслуживание и ремонт |
| 3. <i>Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР</i>                            |  |
| 4. <i>Составление бюджета инженерного проекта (ИП)</i>  |  |
| 5. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков</i> |  |

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

1. *Гистограмма затрат.*

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

**Задание выдал консультант:**

|                  |                |                               |                |             |
|------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b>     | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент           | Трофимова М.Н. |                               |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                            |                |             |
|---------------|----------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                 | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 3-7401        | Пономарев Максим Сергеевич |                |             |

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

|  |  |
|--|--|
| Институт                               | Институт дистанционного образования  |
| Направление подготовки (специальность) | Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений |
| Уровень образования                    | Специалисты  |
| Кафедра                                | ЭПЭО   |
| Период выполнения                      | (весенний семестр 2015/2016 учебного года)                                   |

Студенту:

|               |                            |
|---------------|----------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                 |
| 3-7401        | Пономарев Максим Сергеевич |

Тема работы:

|  |  |
|--|--|
| Расчет защитного заземления электрической подстанции 2-го водозабора |  |
| Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)   |  |

Форма представления работы:

|   |
|---|
| <b><i>Дипломный проект (работа)</i></b><br>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация) |
|---|

### ЗАДАНИЕ

#### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»

- Описание рабочего места оператора на предмет возникновения:
  - вредных проявлений факторов производственной среды (Микроклимат, освещение, шумы)
  - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, электрической, пожарной и взрывной природы)
  - негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
- Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме.

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:

- физико – химическая природа фактора, его связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью;
- предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности

- механические опасности (источники, средства защиты)
- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты);
- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);

3. Охрана окружающей среды:

- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);
- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);
- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);

4. **Защита** в чрезвычайных ситуациях:

- перечень возможных ЧС на объекте;
- выбор наиболее типичной ЧС;
- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:

- специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

## Перечень расчётного и графического материала

- Расчет искусственного заземления
- Схема искусственного заземления
- Схема расположения электродов в ряд

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

| Должность | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Сечин А. А. | К.Т.Н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО            | Подпись | Дата |
|--------|----------------|---------|------|
| З-7401 | Пономарев М.С. |         |      |

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Выбор электрооборудования насосной станции 2-го водоподъема, исследование режимов работы насосного оборудования в составе группы с подробным рассмотрением системы управления.

Рассчитать электропривод насоса со следующими параметрами:

Технические требования и условия:

Производительность по водоподъему -  $488 \text{ м}^3/\text{час}$ ;

Высота подъема, давление или напор - 18 м

Режим работы – продолжительный, нагрузка реактивная;

Диапазон регулирования скорости насоса 1:5

Погрешность поддержания заданной частоты не более 5 % на нижней рабочей скорости.

Питающая сеть: 3 фазная 380/220 В, 50 Гц

Электродвигатель должен иметь закрытое исполнение со степенью защиты не ниже IP55.

Преобразователь должен быть предназначен для работы в закрытых стационарных помещениях при температуре окружающего воздуха от  $(+5...+45) \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности не более 80%.

Система управления электропривода должна обеспечивать надежную защиту от перегрузок и аварий, простоту управления и обслуживания.

Сеть трёхфазная,  $(380\pm 38)\text{В}$ ,  $(50\pm 1)\text{ Гц}$ .

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 100 страниц, 42 рисунка, 26 таблиц, 16 источников.

Объектом выпускной квалификационной работы является электропривод насоса Grundfos TP 150-390/4 A-F-A-BAQE. Цель работы – разработка и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода насоса Grundfos TP 150-390/4.

В выпускной квалификационной работе был выполнен выбор и расчет преобразователя частоты, приводного двигателя, а также определены параметры силовой цепи. Был обоснован выбор способа управления, рассчитаны электромеханические и механические характеристики. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы. Была разработана система автоматического регулирования давления в водозаборном узле.

В разделе экономики выполнен расчет сметы на пусконаладочные работы электропривода насоса Grundfos TP 150-390/4.

В разделе БЖД были рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Проанализированы вредные и опасные факторы производства.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016, в работе использованы программы Mathcad, Microsoft Visio 2016, Microsoft Power Point, Simulink (MatLAB 7).

## **Essay**

Final qualifying work contains 100 pages, 42 drawings, 26 tables, 16 sources.

The object of final qualifying work is an electron-troprivoda pump Grundfos TP 150-390 / 4 A-F-A-BAQE. Objective - Research and development of asynchronous frequency-controlled electron-troprivoda pump Grundfos TP 150-390 / 4.

In the final qualifying work was made the calculation and selection of the drive motor, frequency converter, as well as defined-dividing the main circuit parameters. The choice of the method of controlled-calculated mechanical and electromechanical characteristics. simulation method on a computer, re-investigated transient process in the main modes of operation. As a result of research, we have developed a system of automatic control of pressures-in water intake site.

In the economy produced the estimate calculation for commissioning Grundfos TP 150-390 / 4 electric pump.

In the safety and livelihoods of the issues of occupational health and safety. Analyzed the dangerous and harmful factors of production.

Final qualifying work carried out in Microsoft Word 2016-word processor, used in the Mathcad program, Microsoft Visio 2016, Microsoft Power Point, Simulink (MatLAB 7).

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| <b>Введение</b> .....  | 11 |
| <b>1 Описание системы управления</b> .....   | 13 |
| 1.1 Выбор системы водоснабжения .....  | 13 |
| 1.2 Требования, предъявляемые к электроприводу насосов .....   | 16 |
| 1.3 Выбор приводного двигателя и определение его расчётных параметров .....  | 19 |
| 1.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя .....   | 27 |
| 1.4.1 Расчет естественной механической характеристики .....  | 27 |
| 1.4.2 Расчет естественной электромеханической характеристики .....   | 28 |
| 1.4.3 Механическая характеристика насос .....  | 30 |
| <b>2 Обзор систем управления и способов регулирования электропривода</b> .....   | 32 |
| 2.1 Системы управления электроприводом .....   | 32 |
| 2.2 Выбор закона частотного регулирования.....   | 33 |
| 2.3 Выбор преобразователя частоты .....  | 34 |
| <b>3 Расчет статических характеристик системы ПЧ-АД при частотном регулировании</b> .....  | 37 |
| 3.1 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ .....        | 38 |
| 3.2 Электромеханические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ ..... | 40 |
| <b>4 Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением</b> .....  | 43 |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1 Функциональная схема системы скалярного частотного управления .....   | 46         |
| 4.2 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением.....                   | 51         |
| <b>5 Синтез регулятора давления..</b> .....   | <b>57</b>  |
| 5.1 Имитационная модель автоматической системы регулирования давления .....   | 61         |
| 5.2 Выбор оборудования для системы поддержания постоянного давления .....   | 63         |
| 5.3 Выбор первичного преобразователя давления.....  | 64         |
| <b>6 Экономическая часть</b> .....  | <b>66</b>  |
| 6.1 Выбор и обоснование структурной (принципиальной) схемы электропривода .....   | 66         |
| 6.2 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ).....   | 67         |
| 6.3 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта.....  | 73         |
| <b>7 Социальная ответственность</b> .....   | <b>77</b>  |
| 7.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....  | 78         |
| 7.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих..... | 79         |
| 7.3 Техника безопасности .....  | 86         |
| 7.4 Экологическая безопасность.....   | 93         |
| 7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....  | 94         |
| <b>Заключение</b> .....   | <b>100</b> |
| <b>Литература</b> .....   | <b>101</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

Водоснабжение на предприятии – сооружения, трубопроводы и оборудование, которое обеспечивает забор воды из натурального источника, очистку и обработку, подачу воды потребителям. Основным элементом всей этой системы – насосы. Если взять для сравнения два вида – циркуляционные и поршневые, то стоит отметить, что наиболее употребительны в настоящее время первые. Циркуляционные выигрывают в том плане, что могут соединяться непосредственно с электромотором, турбиной, что позволяет экономить площадь. Упрощает обслуживание такого оборудования также то, что в нем нет клапанов. Циркуляционные практически полностью вытеснили поршневые, поршневые используются только для подачи большого давления (нефтяные, судовые, гидропрессовые, для химических жидкостей). Большие города, комбинаты, промышленные объекты потребляют очень большое количество воды, и поршневому агрегату с этим трудно справиться: они не могут мгновенно поставить десятки кубометров влаги. Конкуренция в этом случае уже идет между разными типами циркуляционных: быстроходные и тихоходные, пропеллерные и центробежные. Каждый из агрегатов подбирается из расчета веса, необходимой производительности и дежельности, а также стоимости, разумеется. Преимущество среди такого оборудования за быстроходными насосами.

В качестве привода для центробежных насосов ввиду компактности конструкции, простоты соединений с турбомеханизмом, легкой автоматизации и относительно низких эксплуатационных затрат в массовое применение нашли электродвигатели переменного тока. Подбор электродвигателя осуществляется по рабочему положению (вертикальный, горизонтальный), мощности, частоте вращения, виду исполнения и напряжению. Асинхронные двигатели – компактны, просты, но загружают сеть намагнивающим током ( $\cos \phi < 1$ ). [1]

Объектом водоснабжения является город, который находится на берегу реки и предприятия, располагающиеся в черте городской застройки.

Город расположен на границе Западно-Сибирской равнины и отрогов Кузнецкого Алатау на правом берегу реки Томи.

Местность характеризуется перепадом отметок земли, которая достигает от 60 до 70 м. Площадь города примерно  $F = 294,6 \text{ км}^2$ , плотность населения  $P = 2008.7$  человека на  $1 \text{ км}^2$ .

Численность жителей - 557.2 тысячи человек. Жилая застройка города в большей части состоит из 9-этажных зданий, которые оборудованы канализацией, водопроводом.

Проектируемая система водоснабжения – I категории обеспеченности подачи воды.

Общая сумма оцененных эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения составляет 1170,6 тыс.  $\text{м}^3/\text{сутки}$ .

# 1 Описание системы управления

## 1.1 Выбор системы водоснабжения

Проектируемая система водоснабжения является первой категорией обеспеченности подачи воды при численности населения более 50 тысяч человек (в нашем случае 557.2 человек).

На основании анализа объемов потребления воды отдельными категориями потребителей в проекте принята объединенная хозяйственно-питьевая, противопожарная и производственная система подачи воды в город и промышленным предприятиям. Планируется большую часть производственного водопотребления предприятий обеспечить за счет использования оборотных систем водоснабжения.



Рисунок 1.1 Схема подъема и подачи питьевой воды в Томск

1. Из артезианских скважин погружными насосами вода подается на станцию обезжелезивания. Сегодня томский водозабор из подземных источников "питается" 198 скважинами. В режиме обычной нагрузки в работе находятся 95 скважин. 14 из них являются контрольными для забора проб на качество подаваемой воды.

2. Вода поступает в аэраторы, где содержащееся в воде двухвалентное железо окисляется до трехвалентного и осаждается.

3. Частично обезжелезенная вода самотеком поступает на так называемые скорые фильтры – их 24. Здесь происходит механическое задержание (очистка) частиц взвеси железа.

4. Очищенная вода накапливается в резервуарах чистой воды.
5. Из резервуаров вода перекачивается группой агрегатов насосной станции в дополнительные резервуары чистой воды, при этом происходит ее обеззараживание гипохлоритом натрия. На этом этапе вода проходит максимально жесткий контроль качества.
6. Вода накапливается в дополнительных резервуарах чистой воды.
7. Повысительными агрегатами насосных станций вода подается в сеть и приходит в дома, квартиры, офисы – к конечным потребителям.
8. Чтобы убедиться, что, попав в сеть вода не потеряла в качестве, в различных 25 конечных точках (водопроводных колонках) производится забор проб воды.

Подземные воды, находящиеся под напором, называют артезианскими. Воды, находящиеся между водонепроницаемыми пластами и заполняющие расположенную между ними водопроницаемую породу или циркулирующие по трещинам. Они надежно защищены от поверхностных стоков водонепроницаемыми породами. Запасы такой воды значительны и устойчивы, вода имеет одинаковую температуру, в ней содержатся минеральные примеси без признаков загрязнения. Пресные артезианские воды предпочтительны для целей централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. Естественный выход подземных вод (грунтовых или артезианских) на дневную поверхность называется ключом или родником. Если родники питаются за счет безнапорных вод, то поступление воды к ним является нисходящим, за счет напорных вод – восходящим. Запасы подземных вод делятся на эксплуатационные и естественные.

Вода с четырех одинаково оборудованных скважин поступает в резервуар, где накапливается, через насосную станцию поступает в городскую сеть. Скважины располагаются в отдельно стоящих помещениях, которые расположены на удаленном участке, от 20 до 150 м. от резервуара. В каждом помещении расположены шкаф с силовым оборудованием, блок управления двигателем насоса. Из резервуара, предназначенного для промежуточного накопителя и являющимся отстойником, вода подается на

насосную станцию 2-го подъема. Насосная станция имеет в своем составе три хозяйственно-питьевых насоса. Из насосной станции вода поступает в сеть городского водоснабжения.

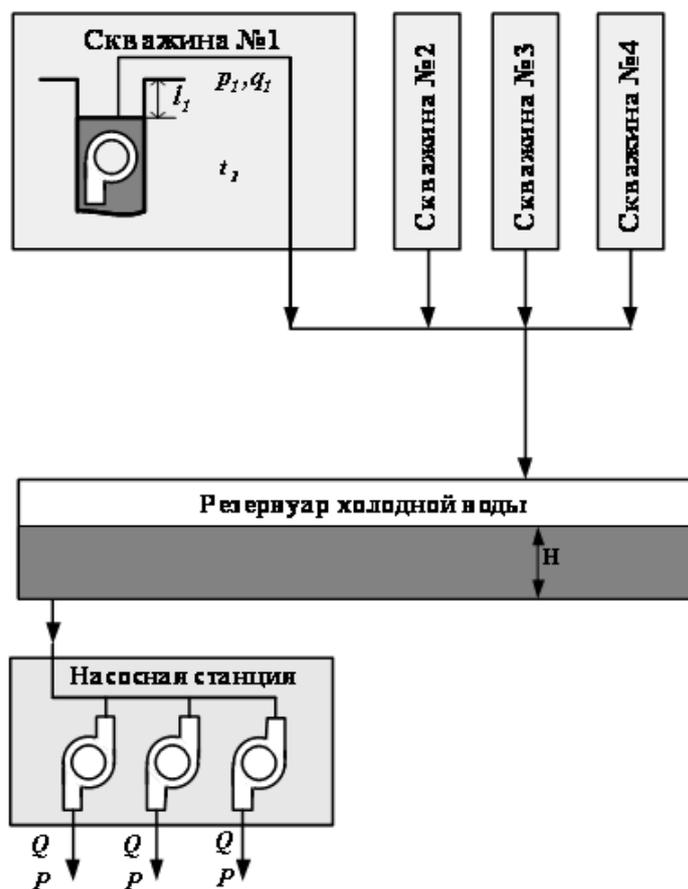


Рисунок 1.2 – Структурная схема водозаборного узла



Рисунок 1.3 - Электрощитовой зал насосной станции

В электрощитовом зале насосной станции 2-го подъема расположен шкаф с электрооборудованием, служащим для управления частотными регуляторами, так же для измерения давления воды на выходе насосной станции.

Для частотного управления двигателями хозяйственно-питьевых насосов применено 3 регулятора. Применяются регуляторы с интерфейсом RS-485. Управление ими осуществляется по сети RS-485.1.

Давление на каждом выходе насосной станции измеряется датчиками DMP-331i которые имеют выходной интерфейс RS-232.

Выходные сигналы с датчиков давления поступают на модули ADAM-4521. Контроллеры объединены в сеть RS-485.2.

## **1.2 Требования, предъявляемые к электроприводу насосов**

Насосы работают на сеть с противодавлением, статический напор в сети составляет примерно 20% полного напора. Исключением могут быть лишь циркуляционные насосы. Они работают на сеть, которая практически не имеет статического напора. Насосы являются механизмами с режимами длительной нагрузки с большим числом работы в год; нагрузка на валу приводного двигателя устойчивая, без перегрузок. Центробежные насосы являются быстроходными механизмами, номинальная частота вращения двигателя примерно 600 об/мин; максимальная частота вращения для насосов ограничена 3000 об/мин, в редких случаях нужна более высокая номинальная частота вращения; современным способом регулирования производительности насосов является изменение частоты вращения их двигателей, диапазон вращения не большой, глубокое регулирование нужно лишь в отдельных случаях.

Установки с центробежными насосами получили широкое распространение. В спиральном корпусе насоса расположено рабочее колесо с лопатками. При вращении этого колеса двигателем, жидкость, которая поступает к центру колеса из заборного резервуара через всасывающий трубопровод и открытую заслонку, центробежной силой выбрасывается по

лопаткам на периферию корпуса. В центре рабочего колеса образуется разрежение, жидкость засасывается в насос, снова выбрасывается и подается в напорный трубопровод. В системе при открытой заслонке образуется непрерывное течение, и центробежный насос имеет плавный и равномерный ход. Перед началом запуска центробежный насос необходимо заполнить жидкостью. Так же насос может находиться как выше уровня жидкости, так и ниже. Если центробежный насос находится выше уровня перекачиваемой жидкости, то для заливки требуется создать разрежение внутри корпуса с помощью специального вакуум-насоса, в качестве которых обычно применяют поршневые насосы. Если он расположен ниже уровня, то для его заливки нужно открыть вентиль заслонки. После заливки насоса может быть включен приводной двигатель. Применяют три способа пуска:

I. Запуск при открытой напорной заслонке удобен, если насос находится ниже уровня жидкости в заборном резервуаре и имеется обратный клапан, тогда время на открытие заслонки не тратится, и общее время агрегата меньше, хотя запуск двигателя более долог из-за увеличения  $M_{с.п.}$

II. Запуск при закрытой напорной заслонке, при котором плавно повышается давление в напорном трубопроводе и исключается запуск при закрытой напорной задвижке - исключается гидравлический удар в системе. От двигателя не требуется повышенный пусковой момент, так как пуск происходит практически вхолостую, но дополнительно тратится время на последующее открытие задвижки.

III. Запуск с одновременным включением привода открывания напорной заслонки насоса можно рассматривать как частные случаи первого и второго способов, в зависимости от соотношения времени открывания заслонки и запуска насоса.

Запуск насосов производится на закрытую заслонку, зависимость момента на валу от частоты вращения при запуске носит «вентиляторный» характер с максимальным моментом для насосов, лежащим в пределах 0,4 – 0,8 номинального.

На рисунке 1.4 приведен внешний вид насоса типа TP 150-390/4 A-F-A-BAQE



Рисунок 1.4 - Внешний вид насоса типа TP 150-390/4 A-F-A-BAQE

Насос типа TP 150-390/4 A-F-A-BAQE это одноступенчатый одинарный центробежный насос типа "ин-лайн": - кольца щелевого уплотнения из бронзы – катафорезная обработка проточной части - жёсткая втулочная муфта - конструкция, облегчающая техобслуживание - гидравлически оптимальная проточная часть - конструкция типа "ин-лайн" с противоположающимися всасывающим и напорным патрубками, позволяющая выполнить монтаж на трубе или на бетонном основании - необслуживаемое торцевое уплотнение из коррозионно-стойкого металла.

Характеристика насоса Grundfos 150-390/4 A-F-A-BAQE приведена на рисунке 1.5, а его технические характеристики изложены в таблице 1.1 [2].

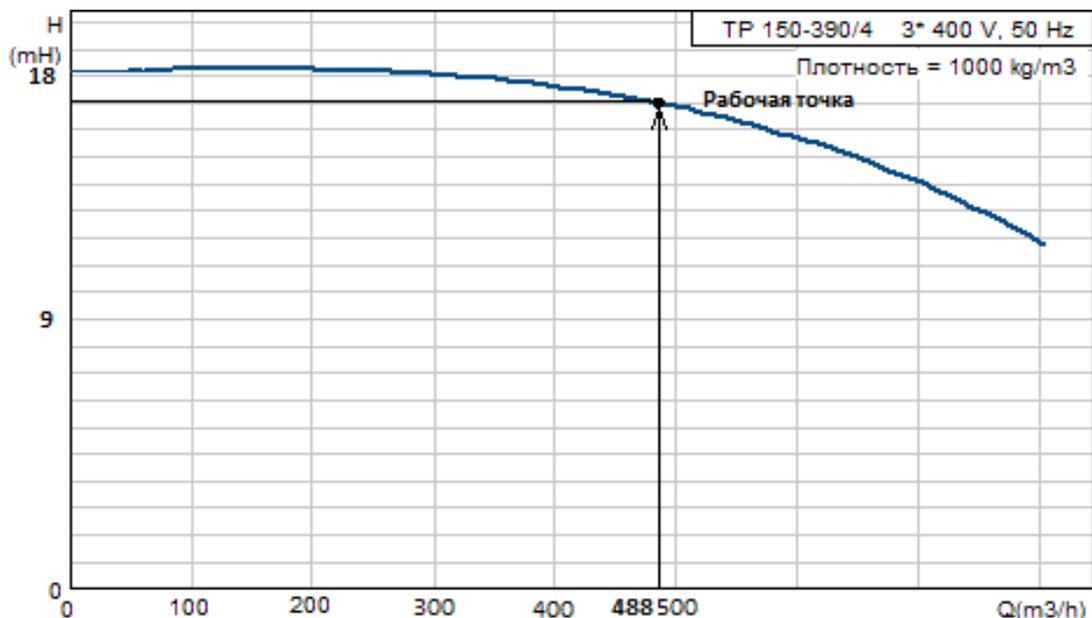


Рисунок 1.5 - Рабочая характеристика насоса типа TP 150-390/4 А-F-А-ВАQE

Таблица 1.1 – Технические характеристики насоса TP 150-390/4 А-F-А-ВАQE

| Параметр                            | Обозначение           | Значение | Ед. измерения       |
|-------------------------------------|-----------------------|----------|---------------------|
| Номинальная подача                  | Q                     | 488      | м <sup>3</sup> /час |
| Номинальный напор                   | H                     | 18       | м                   |
| Максимальная частота вращения       | n <sub>нас.макс</sub> | 2900     | об/мин              |
| Максимальный гидростатический напор |                       | 240      | дм                  |
| Масса насоса                        | m                     | 520      | кг                  |

### 1.3 Выбор приводного двигателя и определение его расчётных параметров

Мощность насоса определяется по выражению [3]

$$P_{нас} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_{нас}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,136 \cdot 18}{1000 \cdot 0,79} = 30,3 \text{ кВт},$$

где  $Q = \frac{488}{3600} = 0,136 \text{ м}^3/\text{с}$  – подача насоса;  $H = 18 \text{ м}$  напор воды;  $\rho = 1000$

$\text{кг}/\text{м}^3$  – плотность воды;

$\eta_{\text{нас}} = 0,79$  – КПД насоса.

Мощность приводного электродвигателя выбираем с учетом отклонения режима работы насоса от его ном. режима, т.е. мощность электродвигателя выбираем с запасом.

$$P_{\text{дв}} = \frac{k \cdot P_{\text{н}}}{\eta_{\text{п}}} = \frac{1,3 \cdot 27,7}{0,98} = 40,2 \text{ кВт},$$

где  $k$  – коэффициент запаса, выбираем  $k = 1,3$ , т. к. двигатель является приводом насоса, который работает при постоянной нагрузке в продолжительном режиме, и имеет редкие пуски при закрытой заслонке;  $\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи, при соединении валов двигателя и насоса муфтой принимаем  $\eta_{\text{п}} = 0,98$ .

Выбираем асинхронный двигатель типа АИР200S2, для которого выполняется условия:  $P_{\text{дв.н}} = 45 \text{ кВт} \geq P_{\text{дв}} = 40,2 \text{ кВт}$ , и

$$\eta_{\text{п}} = 2940 \text{ об/мин} \geq \eta_0 = 2900 \text{ об/мин}$$

$$\eta_{\text{п}} = 2940 \geq \eta_0$$

Технические характеристики электродвигателя АИР200S2 приведены в табл. 1.2. [4].

Таблица 1.2 – Технические данные электродвигателя

| Типо-размер   | $n_0$ ,<br>об/мин                                     | $U_{1\text{н}}$ , В                                  | $P_{\text{дв.н}}$ ,<br>кВт                                | При номинальной нагрузке |                           |                       | $J_{\text{дв}}$ ,<br>кг · м <sup>2</sup> |
|---|---|--|---|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--|
|   |   |  |   | $s_{\text{н}}$ , %       | $\cos \varphi_{\text{н}}$ | $\eta_{\text{н}}$ , % |  |
| АИР200S2  | 3000  | 380  | 45  | 2                        | 0,88                      | 92                    | 0,14                                     |
| $m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}}$ | $m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$ | $m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{н}}}$ | $k_{i \text{ дв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{н}}}$ |                          |                           |                       | Степень защиты                           |
| 1,8   | 2,8   | 1,6  | 7,5   |                          |                           |                       | IP44                                     |

### Расчетные параметры электродвигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ c}^{-1}.$$

Угловая скорость вращения двигателя и номинальная частота вращения

$$n_{\text{дв.н}} = 1 - s_{\text{н}} \cdot n_0 = 1 - 0,02 \cdot 3000 = 2940 \text{ об/мин};$$

$$\omega_{\text{дв.н}} = 1 - s_{\text{н}} \cdot \omega_0 = 1 - 0,02 \cdot 314 = 307,88 \text{ рад/с}.$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток (действующие значения) статора при схеме соединения обмоток звезда

$$U_{\text{1фн}} = \frac{U_{\text{1лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$I_{\text{1фн}} = I_{\text{1лн}} = I_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{двн}}}{3 \cdot U_{\text{1фн}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,92} = 84,2 \text{ А}.$$

Номинальное значение момента двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{45 \cdot 1000}{307,88} = 146,2 \text{ Нм}.$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{\text{1макс}} = I_{\text{1лн}} \cdot K_{i \text{ дв}} = 84,2 \cdot 7,5 = 631,5 \text{ А}.$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_k = m_k \cdot M_{\text{дв.н}} = 2,8 \cdot 18,4 = 40,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{\text{двпуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 2 \cdot 18,4 = 36,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 1.6 [6].

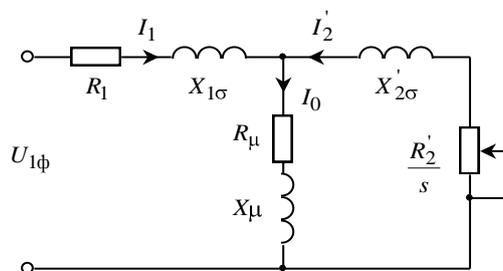


Рисунок 1.6 – Схема замещения асинхронного двигателя

На рисунке схемы замещения имеются следующие параметры:

- $U_{1\phi}$  – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;
- $I_1$  – ток обмотки статора;
- $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;
- $X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;
- $I_2'$  – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;
- $R_2'/s$  – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- $X_{2\sigma}'$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;
- $I_0$  – ток холостого хода (намагничивания);
- $X_m$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s = 0$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке 1.7.

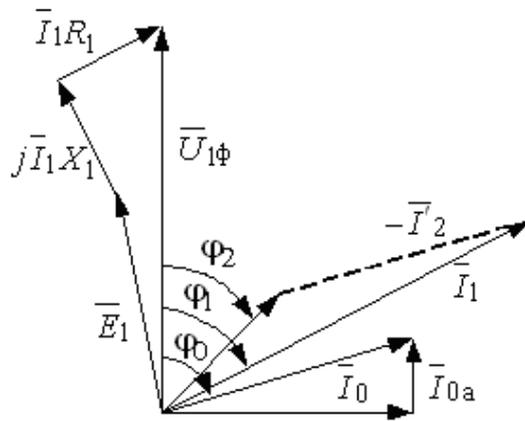


Рисунок 1.7 – Векторная диаграмма асинхронной машины

Определим дополнительные параметры асинхронного двигателя по каталожным данным.

Параметры схемы замещения определяем по методике, предложенной в [6].

Определяем предварительное значение тока холостого хода асинхронного двигателя по выражению

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[ p_* \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-s_n}{1-p_* \cdot s_n} \right]^2}{1 - \left[ p_* \cdot \frac{1-s_n}{1-p_* \cdot s_n} \right]^2}} = \sqrt{\frac{65,4^2 - \left[ 0,75 \cdot 84,2 \cdot \frac{1-0,02}{1-0,75 \cdot 0,02} \right]^2}{1 - \left[ 0,75 \cdot \frac{1-0,02}{1-0,75 \cdot 0,02} \right]^2}} = 27,16 \text{ A,}$$

где:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,92} = 65,4 \text{ A}$$

– ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$$p_* = \frac{P}{P_n} \text{ – коэффициент загрузки двигателя, принимаем } p_* = 0,75;$$

$\eta_{p_*} = 0,92$  – КПД двигателя при частичной нагрузке, в соответствии с табл.1 [2];

$\cos \varphi_{p_*} = 0,85$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке, в соответствии с табл. 2 [7].

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left( \beta + \frac{1}{s_k} \right)}, \text{ Ом}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1 - 0,02}{2 \cdot 2,8 \cdot 45 \cdot 1000 \cdot 1,022^2 \cdot \left( 1,45 + \frac{1}{0,122} \right)} = 0,056 \text{ Ом}$$

где  $\beta$  – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, значение которого находится в диапазоне  $0,6 \div 2,5$ , принимаем  $\beta = 1,45$ ;

– расчетный коэффициент  $C_1$ , характеризующий соотношение  $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_{i\text{дв}} \cdot I_{\text{дв.н}}} = 1 + \frac{27,16}{2 \cdot 7,5 \cdot 84,2} = 1,022;$$

– критическое скольжение двигателя

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot m_k - 1]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot m_k - 1} =$$

$$= 0,02 \cdot \frac{2,8 + \sqrt{2,8^2 - [1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,45 \cdot 2,8 - 1]}}{1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,45 \cdot 2,8 - 1} = 0,122$$

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,022 \cdot 0,056 \cdot 1,45 = 0,083 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме

$$X_{\text{кн}} = R_2' \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,056 \cdot 8,088 \cdot 1,022 = 0,462 \text{ Ом,}$$

где  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведенного активного сопротивления ротора.

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,122^2} - 1,45^2} = 8,088$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 0,462 = 0,194 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,194}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 6,18 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,462}{1,022} = 0,263 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_{2\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,263}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 8,36 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{206,38}{27,16} = 7,6 \text{ Ом,}$$

$$\begin{aligned} \text{где } E_1 &= \sqrt{U_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1H} \cdot R_1}^2 + U_{1H} \cdot \sin \varphi_H - I_{1H} \cdot X_{1\sigma H}}^2 = \\ &= \sqrt{220 \cdot 0,88 - 84,2 \cdot 0,083}^2 + 220 \cdot \sin(\arccos(0,88)) - 84,2 \cdot 0,194}^2 = 206,38 \text{ В} \end{aligned}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме.

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{7,6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,024 \text{ Гн.}$$

Полученные расчётные параметры Т-образной схемы замещения электродвигателя сведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3 - Параметры схемы замещения электродвигателя АИР200S2

| $R_1$ , Ом | $X_{1\delta}$ , Ом | $L_{1\delta}$ , Гн   | $X_{\mu}$ , Ом | $L_{\mu}$ , Гн | $R_2'$ , Ом | $X_{2\delta}'$ , Ом | $L_{2\delta}'$ , Гн  | $X_{кн}$ , Ом |
|------------|--------------------|----------------------|----------------|----------------|-------------|---------------------|----------------------|---------------|
| 0,083      | 0,194              | $6,18 \cdot 10^{-4}$ | 7,6            | 0,024          | 0,056       | 0,263               | $8,36 \cdot 10^{-4}$ | 0,462         |

### Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах производится расчет значения номинального электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{эм.н}}^*$  и  $M_{\text{эм.н}}^{**}$  [8]

$$M_{\text{эм.н}}(s_H) = M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[ (X_{кн})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}}\right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,056}{314,16 \cdot 0,02 \cdot \left[ 0,462^2 + \left(0,083 + \frac{0,056}{0,02}\right)^2 + \left(\frac{0,083 \cdot 0,056}{0,02 \cdot 7,6}\right)^2 \right]} = 151,83 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{(L_{\mu} + L_{2\delta}')}. \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{0,024}{(0,024 + 8,36 \cdot 10^{-4})} \cdot 0,929 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{84,2^2 - 27,16^2} = 151,86 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{где } \Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = \sqrt{2} \cdot 27,16 \cdot 0,024 = 0,929 \text{ Вб.}$$

Должны выполняться два условия [8]

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}};$$

$$146,2 < 151,83 \leq 1,1 \cdot 146,2 = 160,78;$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} \approx M_{\text{эм.н}}^*; 151,86 \approx 151,83.$$

По результатам расчета эти условия выполняются, что говорит об адекватности расчетных параметров двигателя.

## 1.4 Расчет естественных характеристик электродвигателя

Расчет естественных характеристик проводится с целью оценки степени совпадения параметров основных характерных точек расчетных естественных характеристик электродвигателя с параметрами двигателя определенными по справочным техническим данным выбранного электродвигателя [3].

### 1.4.1 Расчет естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика  $\omega(M)$  асинхронного электродвигателя рассчитывается для частоты  $f_{\text{и}}=f_{1\text{н}}=50$  Гц по выражению

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

Задаемся скольжением в пределах  $s = 0.01, 0.02, \dots, 0.5$  и рассчитываем по программе *Mathcad* естественную механическую характеристику  $\omega(M)$  (рисунок 1.8), где  $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ .

Также рассчитываем номинальное значение электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{эм.н}}$

$$\begin{aligned} M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} &= \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,056}{314,16 \cdot 0,02 \cdot \left[ 0,462^2 + \left( 0,083 + \frac{0,056}{0,02} \right)^2 + \left( \frac{0,083 \cdot 0,056}{0,02 \cdot 7,6} \right)^2 \right]} = 151,8 \text{ Нм;} \end{aligned}$$

критического скольжения

$$s_k = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2}{R_1^2 + X_{кн}^2}} = 0,056 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,083}{7,6}\right)^2}{0,083^2 + 0,462^2}} = 0,119$$

и электромагнитного критического момента

$$M_{эм.н}(s_k) = M_{эм.к} = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2}{\omega_0 \cdot 2 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_1}{X_\mu}\right)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{314,16 \cdot 2 \cdot \left[ 0,083 + \sqrt{(0,083^2 + 0,462^2) \cdot \left(1 + \frac{0,083}{7,6}\right)^2} \right]} = 420 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

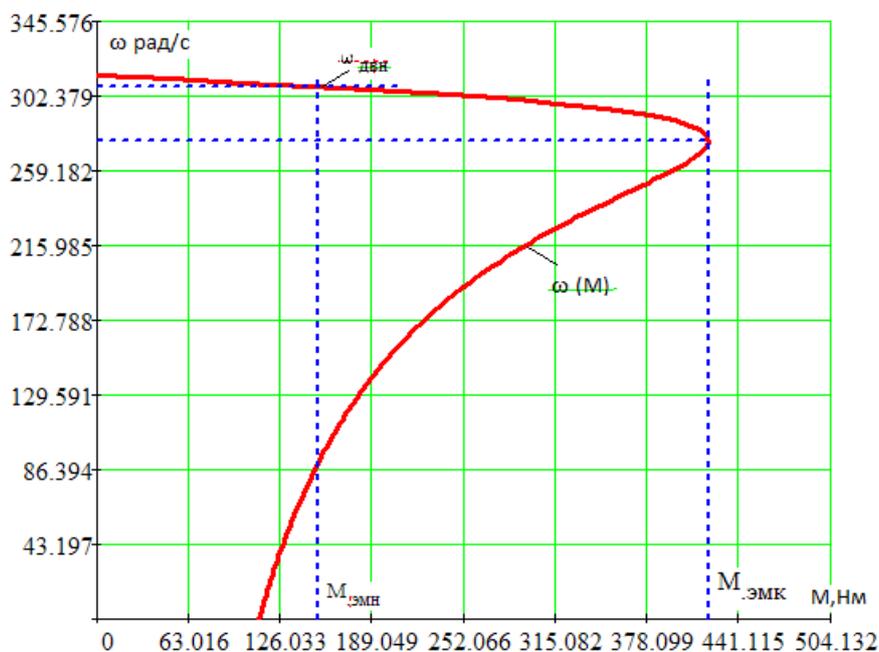


Рисунок 1.8 – Естественная механическая характеристика асинхронного электродвигателя

#### 1.4.2 Расчет естественной электромеханической характеристики

Естественная электромеханическая характеристика  $I_1(s)$  электродвигателя рассчитывается для значения частоты  $f_{и} = f_{1н} = 50$  Гц по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}, \quad (1.1)$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi_H}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{KH})^2 + (\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu})^2}}; \quad (1.2)$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{KH})^2}}. \quad (1.3)$$

По вышеприведенным выражениям для скольжений  $s = s_H$  и  $s \rightarrow 0$  рассчитываются значения тока статора  $I_1(s_H)$  и тока холостого хода  $I_0$

$$I_0 = \frac{U_{1\phi_H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\delta} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,083^2 + (0,194 + 7,6)^2}} = 28,2 \text{ А},$$

$$I_1(s_H) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s_H) \cdot \sin \varphi_2(s)} =$$

$$= \sqrt{28,2^2 + 75,3^2 + 2 \cdot 28,2 \cdot 75,3 \cdot 0,158} = 84,5 \text{ А},$$

где

$$I_2'(s_H) = \frac{U_{1\phi_H}}{\pm \sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s_H})^2 + (X_{KH})^2 + (\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_\mu})^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{(0,083 + \frac{0,056}{0,02})^2 + (0,462)^2 + (\frac{0,083 \cdot 0,056}{0,02 \cdot 7,6})^2}} = 75,3 \text{ А};$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s_H})^2 + (X_{KH})^2}} = \frac{0,462}{\sqrt{(0,083 + \frac{0,056}{0,02})^2 + (0,462)^2}} = 0,158;$$

По результатам расчета строим естественные электромеханические характеристики токов статора  $I_1 = f(\omega)$  и ротора  $I_2' = f(\omega)$ , приведенные на рисунке 1.9.

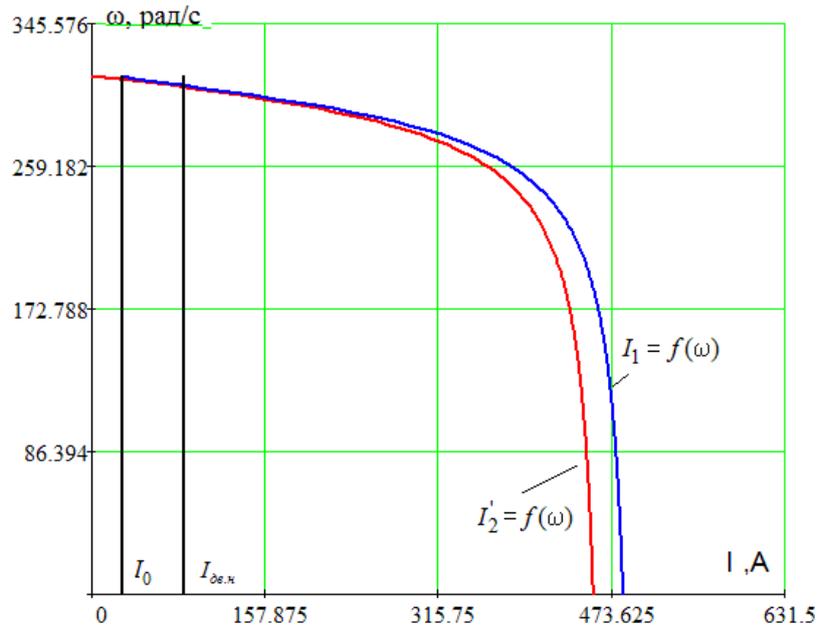


Рисунок 1.9 – Естественные электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

Сравнив значения расчетных параметров характерных точек естественных характеристик двигателя с его справочными данными приведенными в таблице 1.2 и рассчитанными ранее, можно сделать вывод об адекватности расчетных параметров схемы замещения двигателя.

### 1.4.3 Механическая характеристика насоса

Так как механическая характеристика двигателя рассчитана для электромагнитного момента, то нагрузка (полная) на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным

$$\Delta M_{с\ д\ в} = M_{э\ м\ н} - M_{д\ в\ н} = 151,8 - 114,2 = 5,6 \text{ Нм.} \quad (1.4)$$

Поскольку напор, развиваемый насосом, как показано в [9] пропорционален квадрату частоты вращения, то статический момент сопротивления на валу двигателя  $M_c(\omega)$  изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя в соответствии с выражением

$$M_c(\omega) = \Delta M_{c\text{ дв}} + (M_{c\text{ макс}} - \Delta M_{c\text{ дв}}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right)^3 =$$

$$= 5,6 + (151,8 - 5,6) \cdot \left( \frac{\omega}{307,88} \right)^3, \quad (2.5)$$

где  $M_{c\text{ макс}} = M_{\text{эм н}} = 151,8$  Нм - момент нагрузки при скорости вращения  $\omega_{\text{дв.н}} = 307,88$  рад/с, равный номинальному электромагнитному моменту двигателя.

Механические характеристик полного момента сопротивления на валу двигателя, соответствующих механическим характеристикам насоса, приведены на рисунок 1.10.

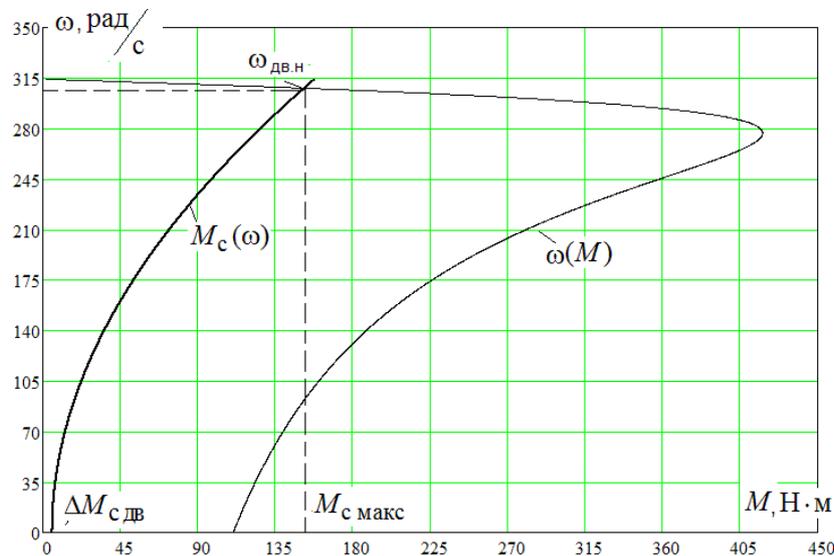


Рисунок 1.10 - Естественная механическая характеристика двигателя  $\omega(M)$  и характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя  $M_c(\omega)$

Из анализа приведённых на рисунке 1.10 характеристик следует, что электродвигатель АИР200S2 обеспечивает требуемое значение максимальной скорости насоса ТР 150-390/4 А-Ф-А-ВАQE  $\omega_{\text{дв.н}} = 307,88$  рад/с, длительную работу при максимальном моменте нагрузки и более чем двукратную перегрузку по моменту.

## **2 Обзор систем управления и способов регулирования электропривода**

### **2.1 Системы управления электроприводом**

Многие ведущие электротехнические фирмы мира сегодня выпускают регулируемые автоматизированные электроприводы (АЭП) комплектно с микропроцессорными средствами автоматизации в виде разнопрограммируемых систем, служащих для широкого использования. Поэтому актуальность проектирования АЭП насосного агрегата, выполненного в общепромышленном исполнении, состоит в решении задачи выбора системы управления электроприводом (СУЭП) для повышения эффективности работы и производительности технологического оборудования.

Исходя из требований к СУЭП, при проектировании предлагаются к рассмотрению две схемы управления: схема скалярного управления электроприводом насосной установки и векторного регулирования, выполненными по системе преобразователь частоты - короткозамкнутый асинхронный электродвигатель (ПЧ-АД).

Выбор одного из способов и принципа управления производится на основании требований к регулированию скорости и показателям качества регулирования: плавности, точности поддержания заданной скорости, диапазону регулирования. Учитываются динамические показатели качества процесса регулирования: перерегулирование, быстродействие и др. При выборе системы управления электроприводом обязателен учет характера нагрузки, создаваемой рабочим механизмом. Частотное управление электродвигателями производится двумя способами [8].

Векторный принцип управления базируется на принудительной взаимной ориентации векторов потокосцеплений и токов АД в полярной или декартовой системах координат в соответствии с заданным законом регулирования. За счет регулирования модулей переменных и углов между их векторами обеспечивается управление АД как в статике, так и в динамике, обеспечивая тем самым заметное улучшение качества переходных

процессов. Именно этот факт является определяющим при выборе системы с векторным управлением и находит применение в электроприводах со средней и высокой динамикой. Приводы таких механизмов как насосы занимают промежуточное положение между ними.

Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространенным в электроприводе. Свойственна техническая простота регулирования и измерения абсолютных значений переменных АД. Управление производится по функциональной характеристике, связывающей частоту и напряжение статора электродвигателя ( $U/f$ - характеристике), с применением модуля IR-компенсации для поддержания постоянства потока сцепления статора в соответствии с этой характеристикой. В статических режимах позволяет добиться за счет обратных связей желаемых свойств электропривода. Применяется для приводов, в которых отсутствуют высокие требования к динамике.

В приводах длительного режима работы с постоянной скоростью, диапазоном регулирования скорости не больше 1:5 и без особых требований к динамике целесообразно применение простейших структур и законов частотного управления [10]. Поэтому целесообразно скалярный принцип частотного управления применить при проектировании СУЭП по системе ПЧ-АД насосной установки [8].

## **2.2 Выбор закона частотного регулирования**

Закон частотного регулирования  $U_1/f_1$  при скалярном управлении выбирается в зависимости от характера нагрузки производственного механизма. Для механизмов с постоянной нагрузкой выбирается закон управления  $U_1/f_1 = \text{const}$ , для механизмов с «центробежной» нагрузкой целесообразно выбрать закон  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  [10].

Последний является более сложным в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Для повышения пускового момента на малых скоростях до

требуемых значений должна быть предусмотрена возможность настройки вольт-частотной характеристики. Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования.

### 2.3 Выбор преобразователя частоты

В соответствии с рекомендациями [5] для регулируемого асинхронного электропривода насоса целесообразно использовать преобразователи серии Altivar 212 фирмы Schneider Electric, который разработан специально для применения в области водоснабжения, отопления, вентиляции.

В соответствии с условием для номинального тока инвертора  $I_{ин}$  преобразователя частоты

$$I_{ин} \geq I_{1дн} = 85,2 \text{ А}$$

выбираем преобразователь частоты модели Altivar 212, параметры которого приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические параметры преобразователя частоты Altivar 212

| Модель      | Число фаз | Напряжение питания, В | Рекомендуемая Мощность двигателя, кВт | Номинальный ток, А | Максимальный ток, А | Степень защиты |
|-------------|-----------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| Altivar 212 | 3         | 380-500               | 45                                    | 110                | 176                 | IP55           |

Общие технические данные преобразователя частоты серии Altivar 212 представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики преобразователя частоты Altivar 212

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Напряжение питающей сети                                       | 3 фазы, 380-500 В ( $\pm 10\%$ ) |
| Частота сети, Гц   | 50                               |
| Коэффициент мощности (не менее)                                | 0.98                             |
| Максимальная выходная частота, Гц                              | 400                              |
| Перегрузка по току (в % от номинального тока в течение 1 мин.) | 160%                             |

|   |   |
|---|---|
| Способ управления   | Квадратичное $U/f^2$<br>Режим оптимизации энергопотребления   |
| Диапазон регулирования в разомкнутой системе                        | 1:10  |
| Вид регулятора для управления процессом с замкнутой обратной связью | ПИД   |
| Виды защит  | Низкое напряжение,<br>Перенапряжение,<br>Перегрузка по току,<br>Перегрузка по мощности,<br>Короткое замыкание,<br>Перегрев двигателя,<br>Перегрев преобразователя |
| Дискретные входы (параметрируемые)                                  | 6   |
| Фиксированные частоты вращения                                      | 8   |
| Релейные выходы   | 2, параметрируемые 230 В АС / 1.0 А   |
| Аналоговые входы  | 2 (0 В до 10 В, 2 В до 10 В, -10 В до +10 В,<br>0/4 до 20 мА)   |
| Аналоговые выходы (параметрируемые)                                 | 2 (0/4 до 20 мА)  |
| Последовательный интерфейс  | RS485   |
| Уровень защиты  | IP20, IP55  |
| Параметры окружающей среды  |   |
| температура окружающей среды  | От 0°C до +40°C   |
| температура хранения  | От -30°C до +70°C   |
| высота над уровнем моря   | 1000 м  |
| допустимая относительная влажность (без образования конденсата)     | 95  |

Внешний вид преобразователя частоты серии Altivar 212 показан на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Преобразователи частоты серии Altivar 212

Схема подключения преобразователя частоты приведена на рисунке 2.2.

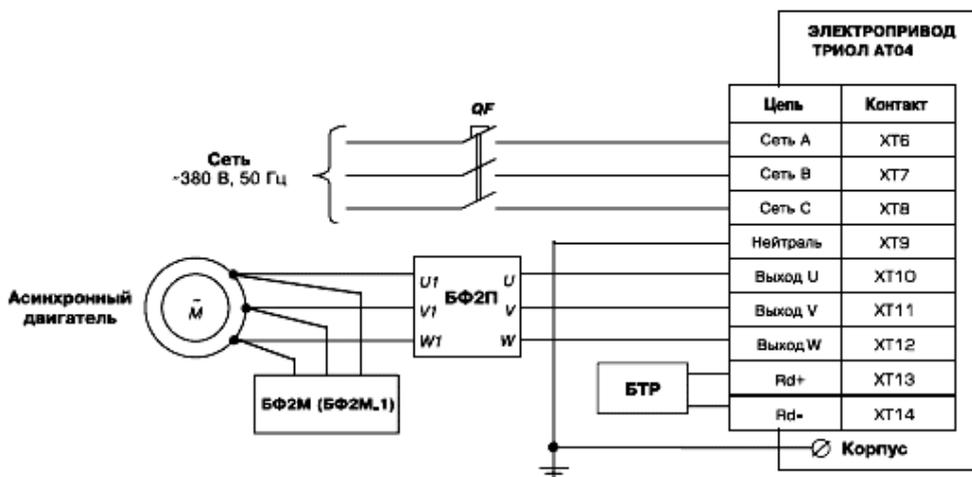


Рисунок 2.2 - Схема подключения преобразователя частоты

### 3 Расчет статических характеристик системы ПЧ-АД при частотном регулировании

Вольт-частотная характеристика преобразователя при законе регулирования  $U_1/f_1^3 = \text{const}$ , рассчитанная по выражению [7]

$$U_1/f_1^3 = U_{1\text{фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2, \quad (3.1)$$

приведена на рисунке 3.1 (характеристика 1).

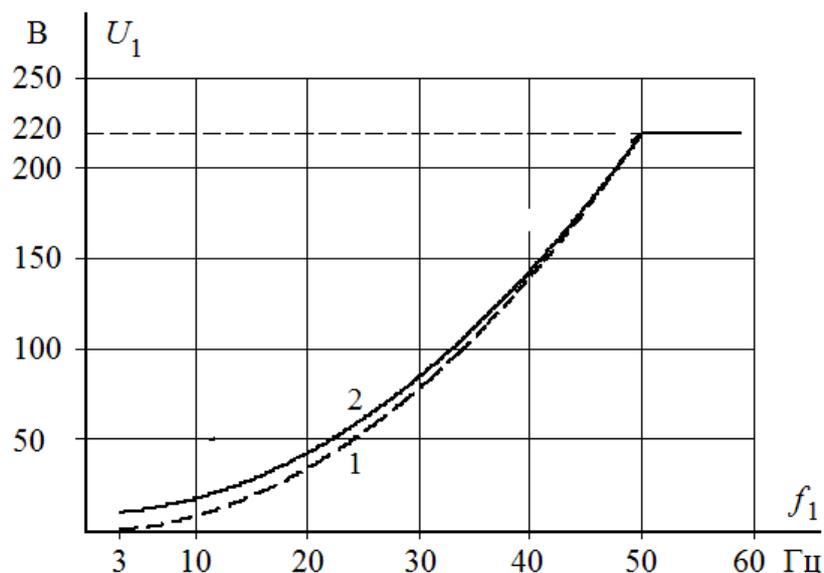


Рисунок 3.1 - Вольт-частотная характеристика преобразователя: 1 - при законе регулирования  $U_1/f_1^3 = \text{const}$  в соответствии с (3.1); 2 - при законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  в соответствии с (3.3)

Максимальную частоту инвертора, соответствующую номинальному режиму работы насоса определяем из условия обеспечения номинальной рабочей скорости двигателя  $\omega_{\text{дв.н}} = 307,88 \text{ рад/с}$ . Принимаем максимальное значение частоты инвертора  $f_{\text{и макс}} = f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$ . Для обеспечения пусковой характеристики двигателя исходя из требуемого диапазона регулирования скорости 1:5, принимаем минимальную частоту инвертора  $f_{\text{и мин}} = 5 \text{ Гц}$ .

### 3.1 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Механические характеристики  $\omega \left( M \right)_{\text{разомкнутой}}$  системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора:  $f_{1н1}=50$  Гц;  $f_{1н2}=30$  Гц ;  $f_{1н3}=15$  Гц;  $f_{1н4}=5$  Гц рассчитываются с помощью программы *Mathcad* по выражениям [10]:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot f_1 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \cdot s \cdot \left[ \left( X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}}} \right)^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot f_1 \cdot 0,056}{314,16 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left[ \left( 0,462 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left( 0,083 + \frac{0,056}{s} \right)^2 + \left( \frac{0,083 \cdot 0,056}{s \cdot 7,6 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]} \quad , (3.2)$$

где

$$U_1 \left( f_1 \right)_{\text{разомкнутой}} = U_{1фн} \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 = 220 \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^2 ;$$

$$\omega(s, f_1) = 314,16 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot (1-s) .$$

По результатам расчета на рисунке 3.2 построено семейство механических характеристик  $\omega \left( M \right)_{\text{разомкнутой}}$  системы преобразователь – двигатель при изменении частоты.

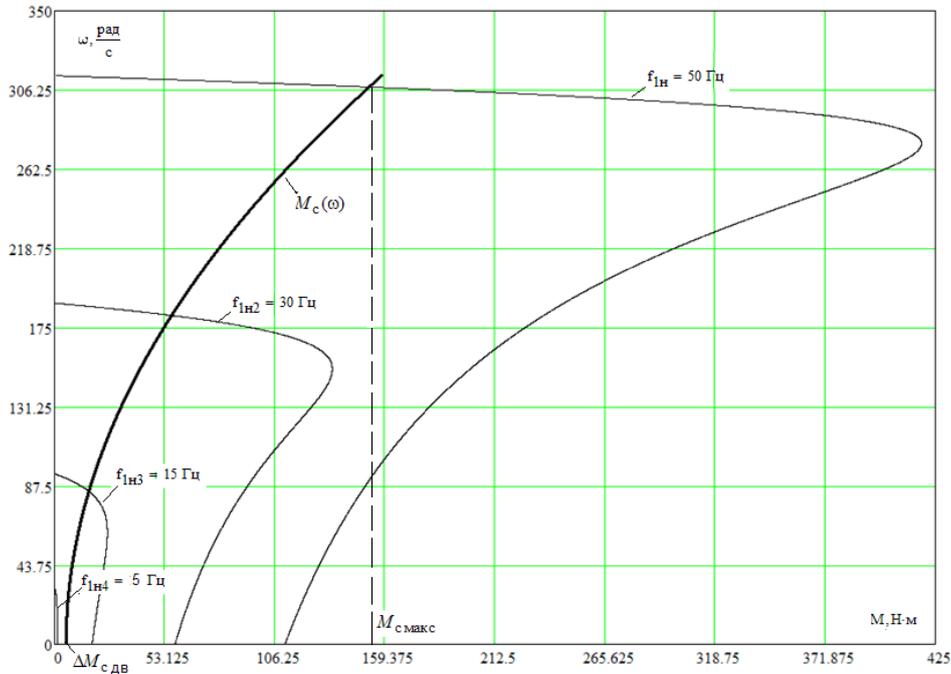


Рисунок 3.2 – Механические характеристики  $\omega \sim M$  системы ПЧ-АД при законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ :  $\Delta M_{с.дв} = 5,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{с.макс} = 151,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Анализ приведенных на рис. 3.2 механических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты инвертора  $f_{и.мин} = 5 \text{ Гц}$ .

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выполнен подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно выбраны для начального участка характеристики следующие параметры (рисунке 3.1):  $U_{1мин} = 5 \text{ В}$ ,  $f_{и.мин} = 5 \text{ Гц}$ .

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью

$$U_1 \cdot f_1 = U_{1мин} + U_{1фн} - U_{1мин} \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 = 5 + (220 - 5) \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^2 \quad (3.3)$$

и приведена на рисунке 3.1 (характеристика 2).

Механические характеристики системы преобразователь – двигатель, рассчитанные по выражениям (3.2) с учетом выбранной настройки вольт-частотной характеристики (3.3), приведены на рисунке 3.3.

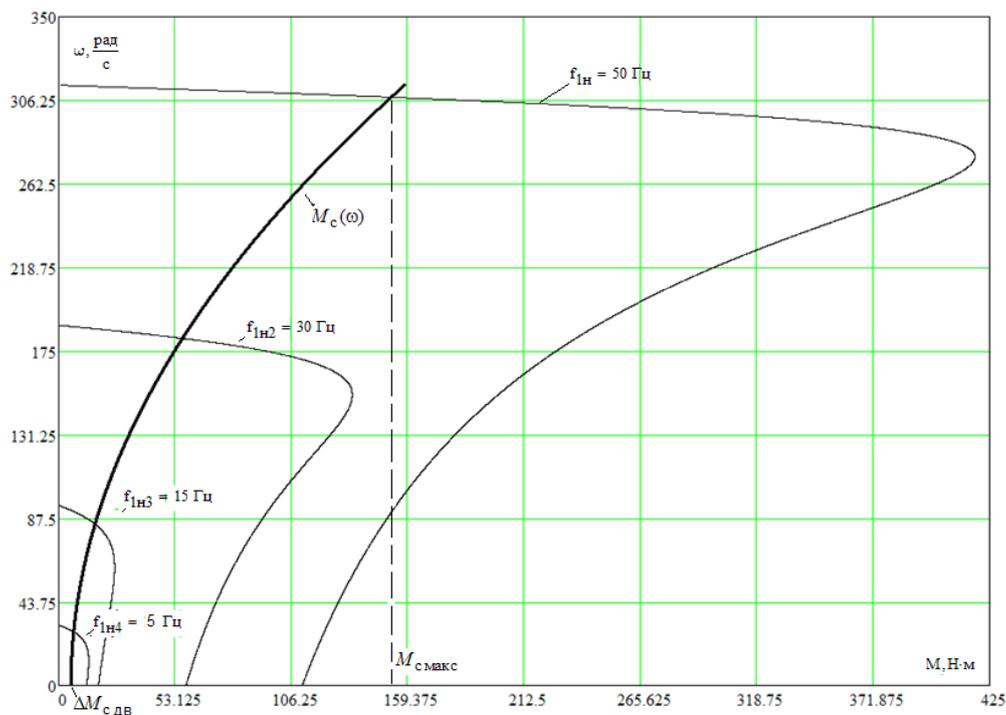


Рисунок 3.3- Механические характеристики  $\omega(M)$  системы преобразователь – двигатель при настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (3.3)

### 3.2 Электромеханические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Электромеханические характеристики  $\omega(I_1)$  разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель после настройки вольт-частотной характеристики преобразователя в соответствии с (3.3) рассчитываются для выбранных ранее значений частоты по выражениям [10]:

$$I_1(f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2^2(f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(f_1) \cdot \sin \varphi_2(f_1)}; \quad (3.4)$$

$$I_0 f_1 = \frac{U_1 f_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{1\sigma} + X_{\mu}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1 f_1}{\sqrt{0,083^2 + 0,194 + 7,6^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}; \quad (3.5)$$

$$I_2' s, f_1 = \frac{U_1 f_1}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}} =$$

$$(3.6)$$

$$= \frac{U_1 f_1}{\pm \sqrt{\left(0,083 + \frac{0,056}{s}\right)^2 + \left(0,462 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{0,083 \cdot 0,056}{s \cdot 7,6 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2 s, f_1 = \frac{X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{0,462 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(0,083 + \frac{0,056}{s}\right)^2 + \left(0,462 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}, \quad (3.7)$$

где

$$U_1 f_1 = U_{1\text{мин}} + U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 = 5 + (220 - 5) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2,$$

$$\omega s, f_1 = 314,16 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot 1 - s .$$

По результатам расчета на рисунке 3.4 построено семейство электромеханических характеристик  $\omega(I_1)$  системы преобразователь-двигатель.

На рисунке 3.3 приведена характеристика полного момента нагрузки  $M_c(\omega)$ , а на рисунке 3.4 соответствующая ей зависимость статического тока нагрузки  $I_{1c}(\omega)$ , рассчитанная по выражениям (3.4) – (3.7) в интервале частот  $f_1 = f_{1H1} \div f_{1H4}$  для значений скольжения  $s$ , найденных путем совместного численного решения уравнений для механических характеристик двигателя и нагрузки

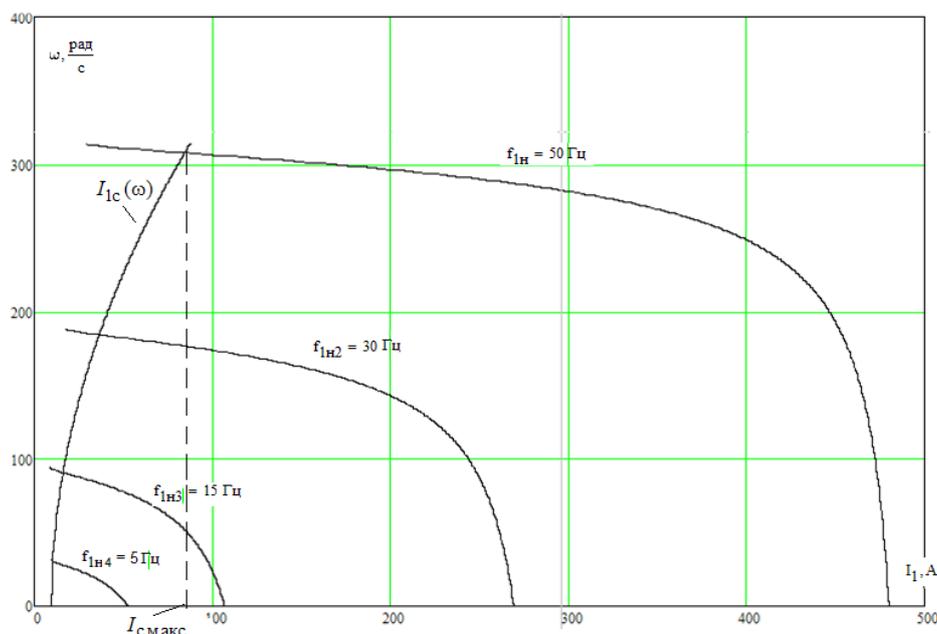


Рисунок 3.4 - Электромеханические характеристики электропривода  $\omega(I_1)$  при скалярном управлении после настройки вольт-частотной характеристики в соответствии с (3.3)

Анализ приведенных на рисунке 3.3 и 3.4 характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  и настройке вольт-частотной характеристики в соответствии с (3.3) асинхронный привод обеспечивает пуск насоса с начальной частоты инвертора  $f_{и.мин} = 5$  Гц, заданный диапазон регулирования скорости и не менее чем двукратную максимальную перегрузку во всём диапазоне регулирования скорости.

#### 4 Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением

В силовой канал привода входят:

- преобразователь частоты, который выполняет функцию электрического преобразователя;
- электродвигатель, он выполняет функцию электромеханического преобразователя;
- механическая система, выполняет функцию механического преобразователя.

При решении задач анализа и синтеза регулируемых асинхронных электроприводов применяют модели двигателя, которые составляют на базе обобщенной электрической машины и выполняют в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. На рисунке 4.1 представлена структурная схема силового канала непрерывной линеаризованной системы преобразователь - асинхронный электродвигатель в неподвижной системе координат. Выходной величиной является угловая скорость двигателя  $\omega$ , а входными координатами схемы являются составляющие напряжения управления преобразователя  $U_{yn.\alpha}$  и  $U_{yn.\beta}$ . Структурная схема (рисунок 5.1) характеризуется следующими промежуточными координатами:

$U_{1\alpha}, U_{1\beta}, I_{1\alpha}, I_{1\beta}, \Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$  – составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора в ортогональной системе координат  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$M_{дв.эм}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Математическое описание силового канала системы ПЧ-АД, в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ , ориентированной по вектору потокосцепления ротора.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_2 \cdot T_{2p+1} \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = R_2 \cdot T_{2p+1} \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2' \cdot L_\mu}{L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta} - \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ 0 = T_{2p+1} \cdot \Psi_{2\alpha} - L_\mu \cdot I_{1\alpha} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ 0 = T_{2p+1} \cdot \Psi_{2\beta} - L_\mu \cdot I_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{дв.эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_\mu}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}; \\ \omega = \frac{1}{J_p} \cdot (M_{\text{дв.эм}} - M_c \cdot \text{sign}(\omega)) \end{array} \right.$$

На основании этой системы уравнений составлена структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  и реактивной нагрузкой приведена на рисунке 4.1. Входными величинами на структурной схеме рисунке 4.1 являются напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток двухфазного АД:

$$U_{1\alpha} \left( \overleftarrow{\leftarrow} U_{1m} \cdot \cos \left( \leftarrow \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t \right) \right); \quad U_{1\beta} \left( \overleftarrow{\leftarrow} U_{1m} \cdot \sin \left( \leftarrow \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t \right) \right).$$

Параметры звеньев структурной схемы двигателя.

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\delta} + L_\mu = 6,18 \cdot 10^{-4} + 0,024 = 0,0246 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\delta} + L_\mu = 8,36 \cdot 10^{-4} + 0,024 = 0,0248 \text{ Гн}.$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0,024^2}{0,0246 \cdot 0,0248} = 0,056.$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_1^2}{L_2^2} = 0,083 + 0,056 \cdot \frac{0,024^2}{0,0248^2} = 0,135 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,056 \cdot 0,0246}{0,135} = 0,0102 \text{ с;} \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,0248}{0,056} = 0,443 \text{ с.}$$

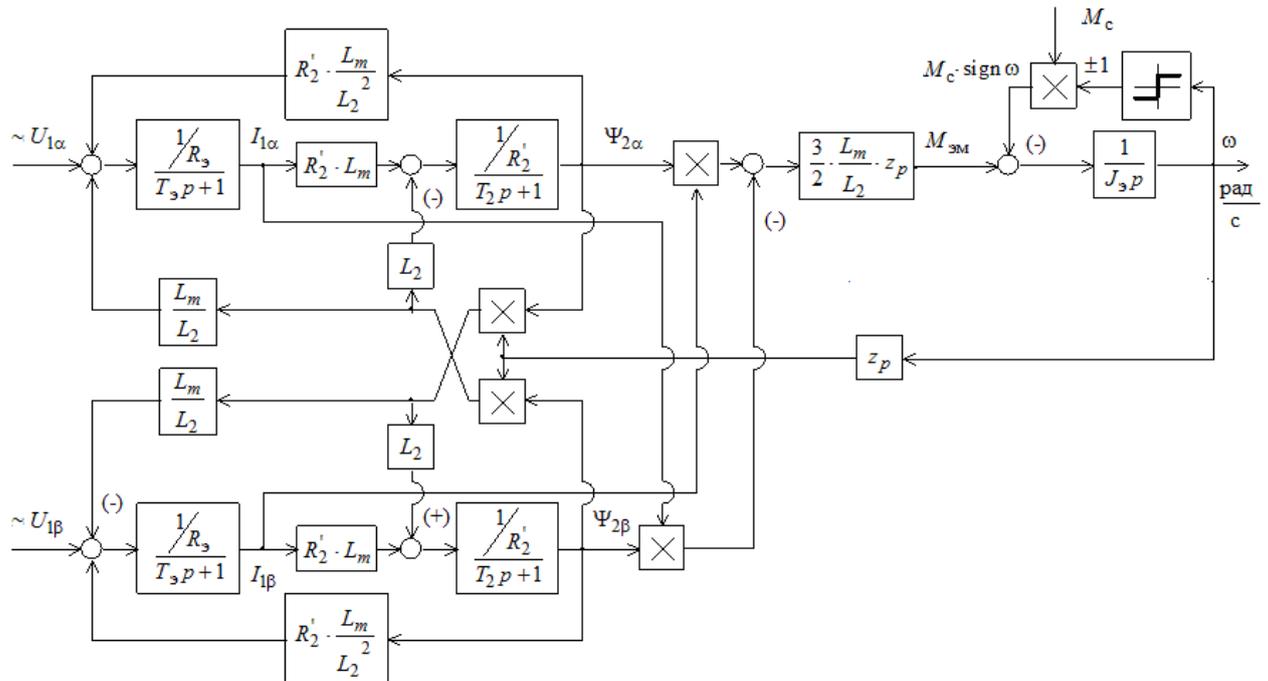


Рисунок 4.1 - Структурная схема силового канала системы ПЧ-АД в неподвижной двухфазной системе координат  $\alpha, \beta$

В пакете Simulink системы *MatLAB*на основе структурной схемы рисунка 4.1 разработана имитационная модель силового канала системы ПЧ- АД в неподвижной системе координат и приведена на рисунке 4.2 [10].

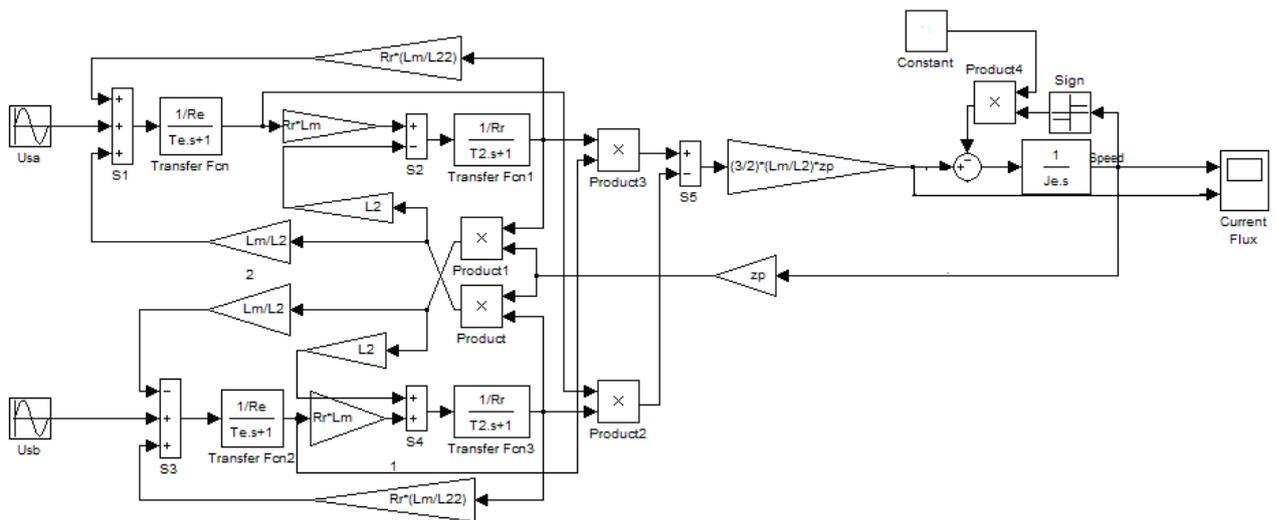


Рисунок 4.2 – Имитационная модель силового канала системы ПЧ-АД

#### 4.1 Функциональная схема системы скалярного частотного управления

В простейшем случае частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением реализуется по разомкнутой структуре.

Функциональная схема такого частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением, выполненная по разомкнутой структуре, приведена на рисунке 4.3. АД выполнен в виде двухфазной модели в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  [10]. На функциональной схеме символом \* обозначены сигналы задания и управления и приняты следующие обозначения:

- $\omega$  - фактическое значение угловой скорости вращения двигателя;
- ЗИС - задатчик интенсивности скорости с линейной характеристикой;
- ФНУ - формирователь напряжений управления двухфазным АД, который формирует два напряжения переменного тока  $U_{\alpha}^*$  и  $U_{\beta}^*$  при применении структурной схемы АД в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$ ;
- ФФН –формирователь фазных напряжений двухфазного двигателя.

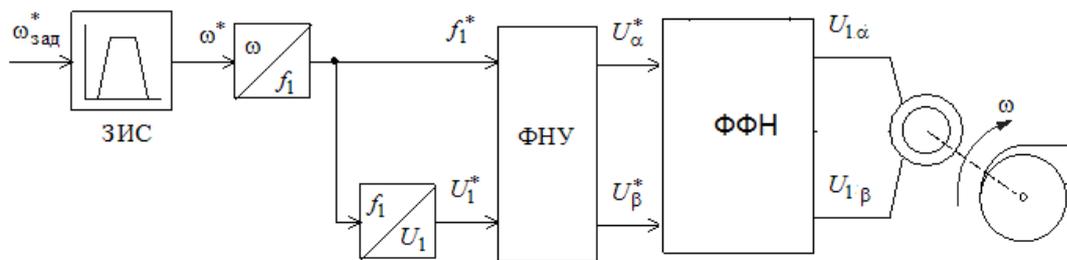


Рисунок 4.3 - Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

В разомкнутой системе электропривода со скалярным управлением при уменьшении частоты максимальный момент двигателя уменьшается. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. При законе регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ , как было показано выше, с целью обеспечения пускового момента на малых скоростях в преобразователе должна быть предусмотрена функция корректировки (повышение начального значения напряжения) вольт-частотной характеристики в области малых частот выходного напряжения инвертора. Либо, как показано в [9], можно применить так называемую *IR* – компенсацию (повышение фазного напряжения инвертора на величину падения напряжения на обмотке статора  $I_l \cdot R_l$ ) в области малых частот.

Для ограничения момента и тока АД в пуско-тормозных режимах электропривода механизмов, у которых по технологии невозможны механические перегрузки (к таким механизмам можно отнести привод насосов), достаточно применения задатчика интенсивности с линейной характеристикой, который устанавливается на входе электропривода в канале задания скорости.

В соответствии с функциональной схемой, представленной на рисунке 4.5, из библиотеки имитационных моделей систем ПЧ-АД, предложенных [11] в среде *Simulink* системы *MatLAB*, выбираем модель, показан-

ную на рисунке 4.4. Имитационные модели входящих в нее блоков представлены на рисунках 4.5 - 4.10.

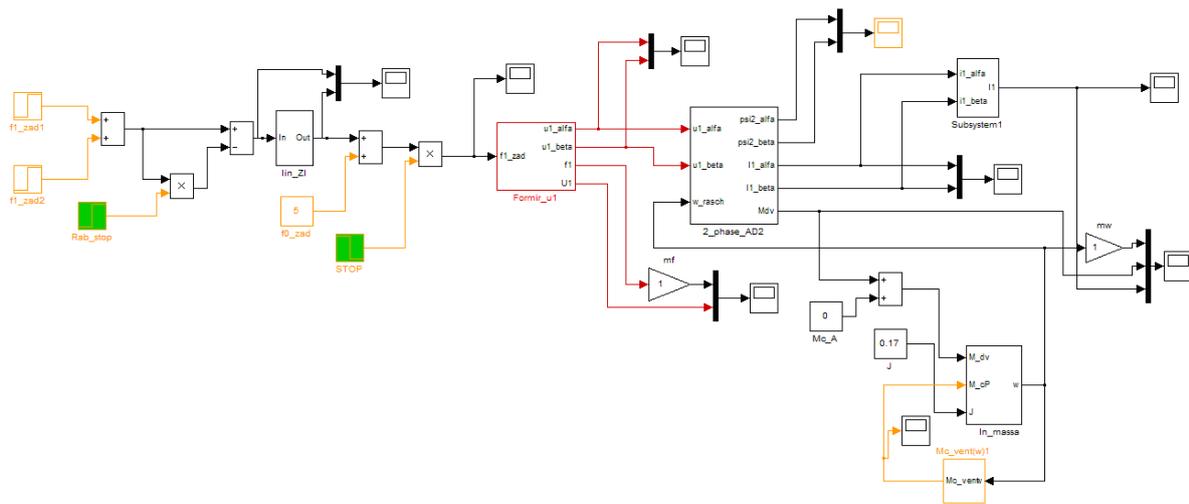


Рисунок 4.4 - Имитационная модель разомкнутой системы ПЧ-АД со скалярным управлением

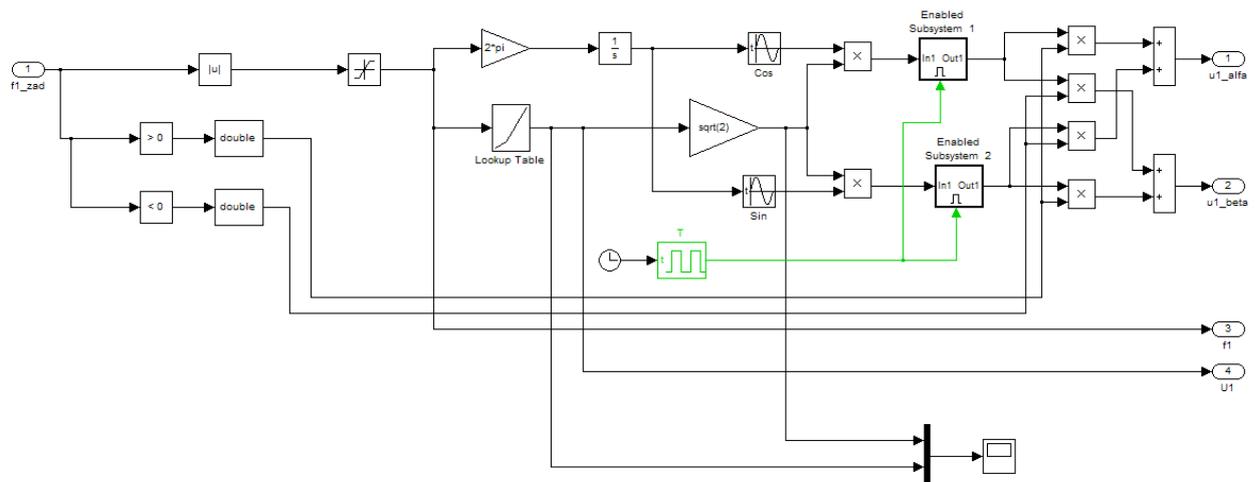


Рисунок 4.5 - Имитационная модель формирователя фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

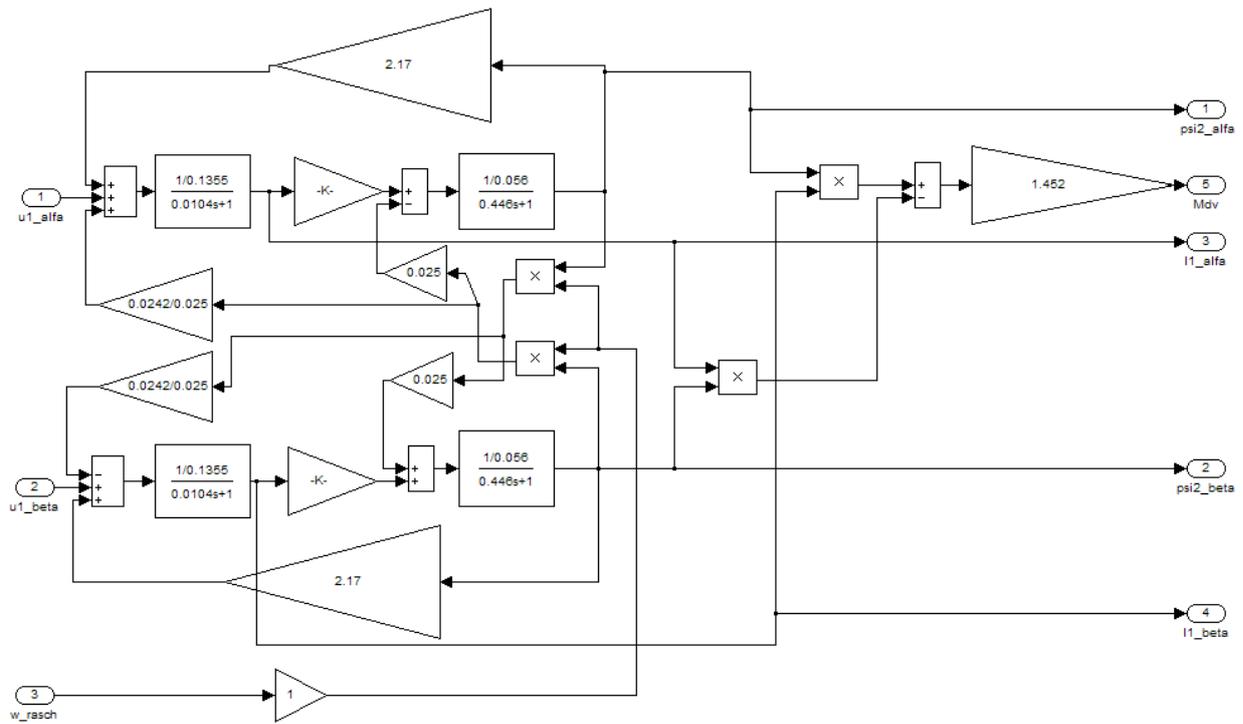


Рисунок 4.6 - Имитационная модель АД в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

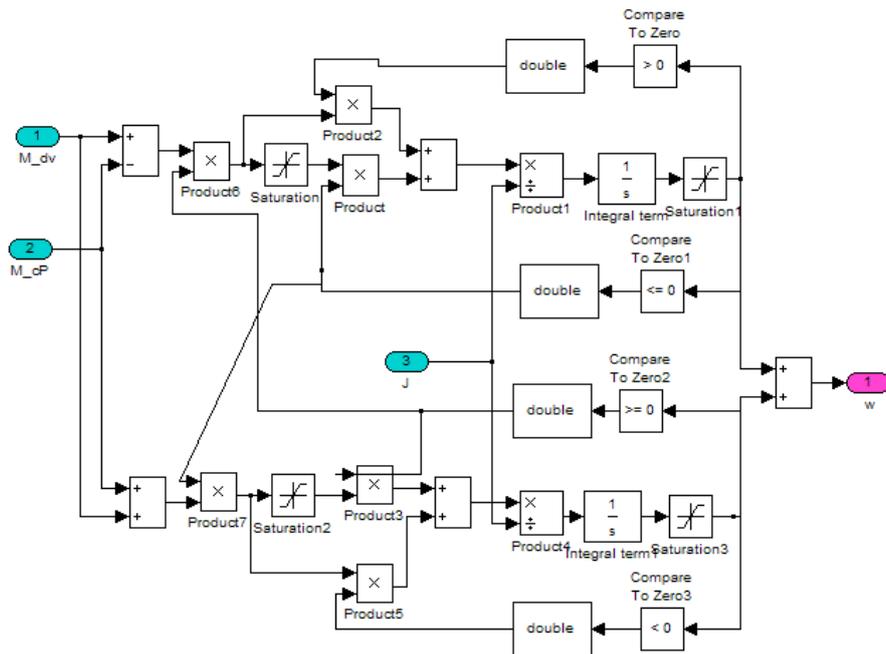


Рисунок 4.7 – Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

Имитационная модель, представляющая насосную нагрузку, согласно выражению (2.5)

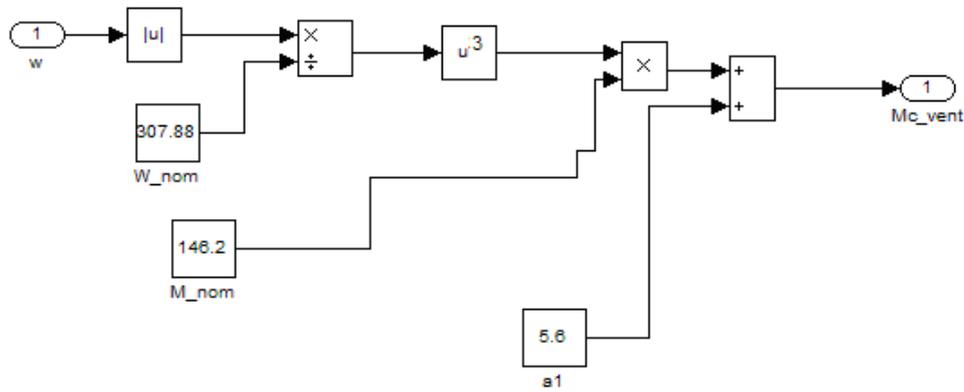


Рисунок 4.8 – Имитационная модель насосной нагрузки

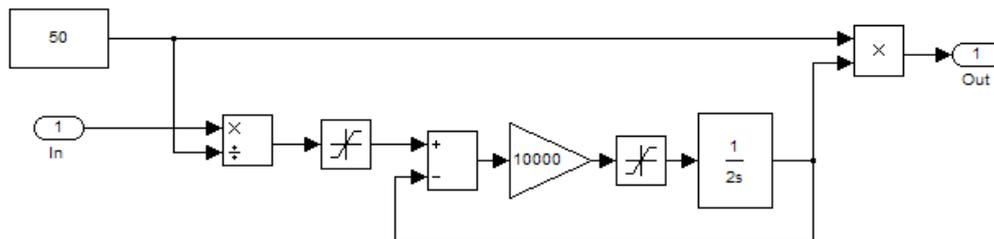


Рисунок 4.9 – Имитационная модель задатчика интенсивности с линейной выходной характеристикой

На рисунке 4.10 представлена математически рассчитанная и аппроксимированная ломаными линиями кривая зависимости  $U_1/f_1^2 = \text{const}$ .

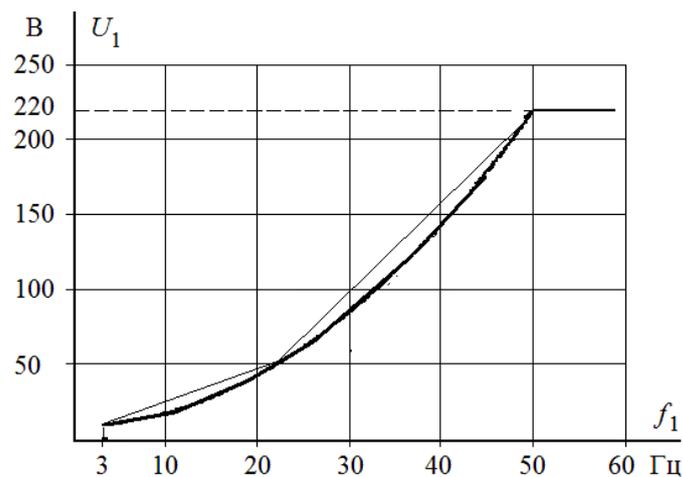


Рисунок 4.10 - Кривая зависимости  $U_1(f_1)$

Кривая зависимости  $U_1(f_1)$  аппроксимируется отрезками прямых представлена в таблице 4.1, и набрана в нелинейном блоке *Lookup Table* в имитационной модели формирователя фазных напряжений.

Таблица 4.1 - Параметры вольт-частотной характеристики преобразователя

|                  |   |    |     |
|------------------|---|----|-----|
| $f_1, \text{Гц}$ | 5 | 22 | 50  |
| $U_1, \text{В}$  | 5 | 50 | 220 |

Имитацию квантования по времени фазных напряжений на выходе автономного инвертора напряжения преобразователя частоты (рис. 5.9), происходящее в процессе его широтно-импульсной модуляции (ШИМ) производится с помощью стандартных блоков библиотеки *Simulink: Pulse Generator* и *Enabled Subsystem* [10].

Период квантования по времени напряжения инвертора ПЧ принимаем равным величине постоянной времени запаздывания при ШИМ

$$T_{\text{ин}} = \frac{1}{f_{\text{нч}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с,}$$

где  $f_{\text{нч}} = 10000 \text{Гц}$ - несущая частота инвертора.

## 4.2 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением

Имитационные исследования электропривода насоса проводятся с целью проверки его работоспособности в следующих основных технологических режимах: пуск на любую рабочую скорость насоса; переход с одной рабочей скорости насоса на другую и останов насоса в режиме электрического торможения. В процессе имитационных исследований рассмотрим следующие режимы работы системы электропривод – насос [10]:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- останов электропривода.

К электроприводу насоса не предъявляется жестких требований к динамическим показателям. Поэтому при выборе параметров настройки

здатчика интенсивности скорости прежде всего следует исходить из условия обеспечения мягкого пуска электропривода. В ходе имитационных экспериментов установлено, что для обеспечения мягкого пуска насоса достаточно принять постоянную времени задатчика  $T_{зи} = 5$  с.

В качестве примера рассмотрена отработка электроприводом насоса следующего цикла:

- пуск на минимальную частоту  $f_{и.мин} = 5$  Гц
- переход на максимальную рабочую скорость насоса  $f_{р.макс} = 50$  Гц
- переход на минимальную частоту  $f_{и.мин} = 5$  Гц.
- останов электропривода.

На рисунке 4.11 и 4.12 приведены временные характеристики отработки электроприводом насоса с законом регулирования  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  и настройкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (таблице 4.1) принятого цикла работы и линейной характеристики задатчика.

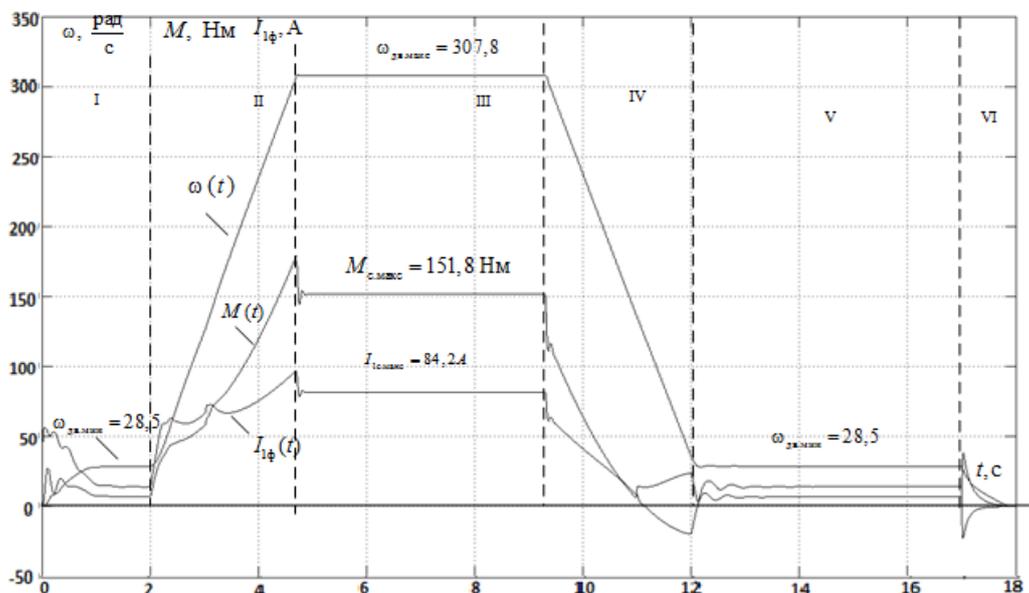


Рисунок 4.11 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом насоса заданного цикла с линейным ЗИ при времени  $T_{зи} = 3$  с; графики переходных процессов – скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_\phi(t)$

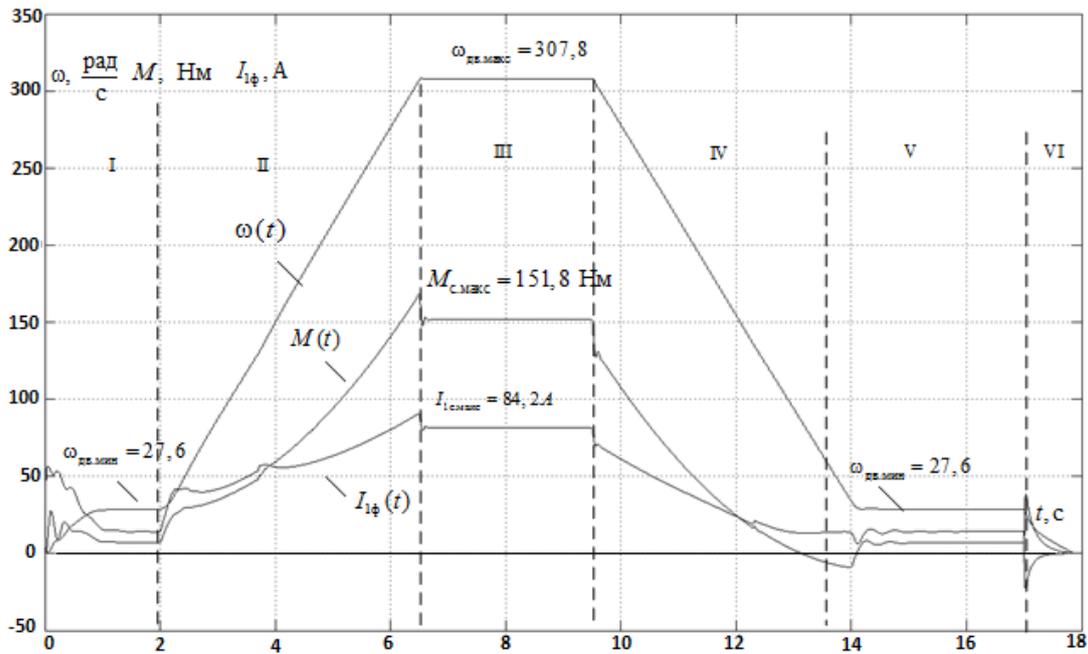


Рисунок 4.12 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом насоса заданного цикла с линейным ЗИ при времени  $T_{зи} = 5$  с; графики переходных процессов – скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_{\phi}(t)$

Для сравнения проведем исследование влияния на плавность изменения координат электропривода применение ЗИ с S-образной характеристикой, вид которой показан на рисунке 4.13 [7]

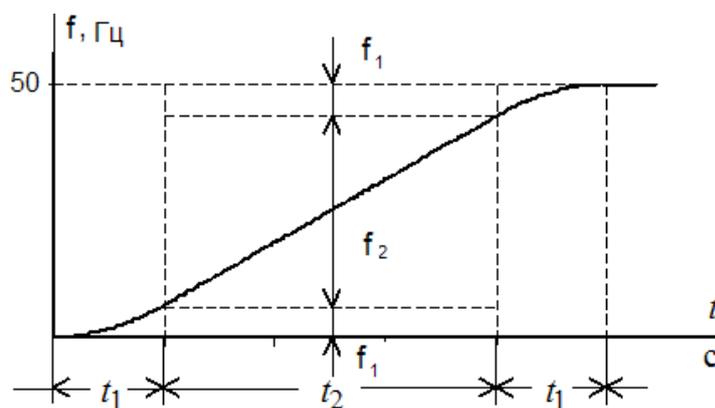


Рисунок 4.13 - Временная характеристика s-образного задатчика интенсивности

Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой представлена на рисунке 4.14.

Из графиков рисунка 4.15 видно, что применение задатчика интенсивности с S-образной характеристикой дополнительно повышает плав-

ность переходных процессов скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_{1\phi}(t)$ .

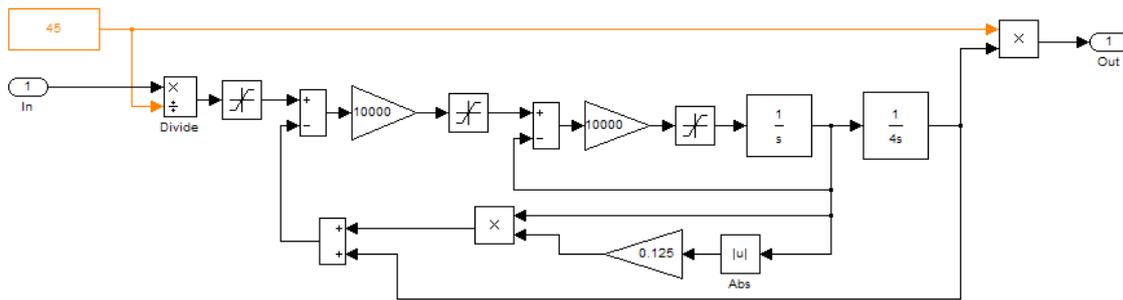


Рисунок 4.14 – Имитационная модель задатчика интенсивности с S образной характеристикой

На рисунке 4.15 приняты следующие параметры характеристики ЗИ  $f_{зад} t$   $t_1 = 1$  с,  $t_2 = 1$  с,  $T_{ЗИ} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2 \cdot 1 + 1 = 3$  с.

На рисунке 4.16 приняты следующие параметры характеристики ЗИ  $f_{зад} t$   $t_1 = 1$  с,  $t_2 = 3$  с,  $T_{ЗИ} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2 \cdot 1 + 3 = 5$  с.

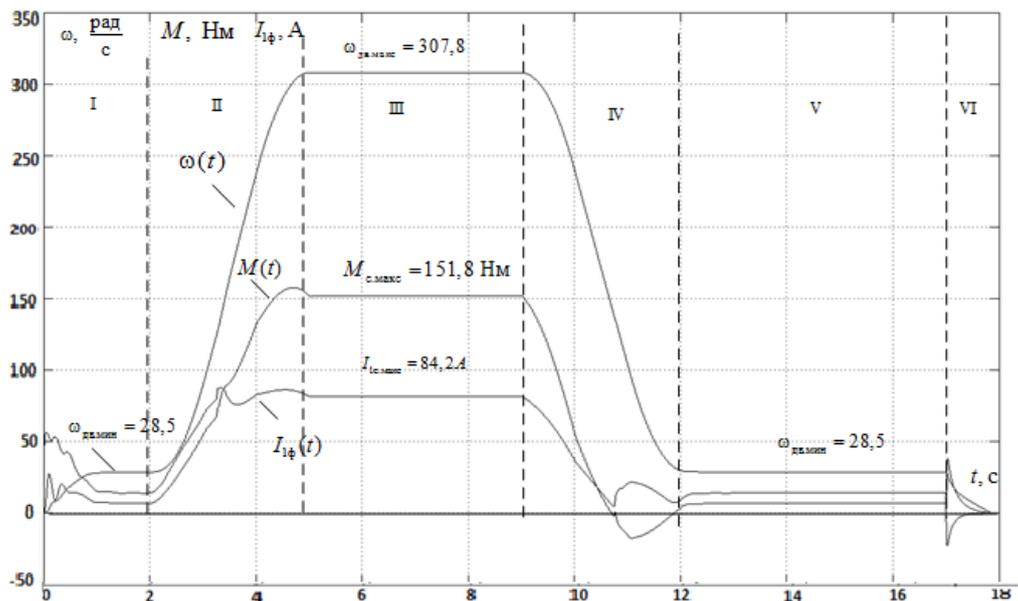


Рисунок 4.15 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом насоса заданного цикла с задатчиком интенсивности с S-образной характеристикой при времени  $T_{ЗИ} = 3$  с; графики переходных процессов – скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_{1\phi}(t)$

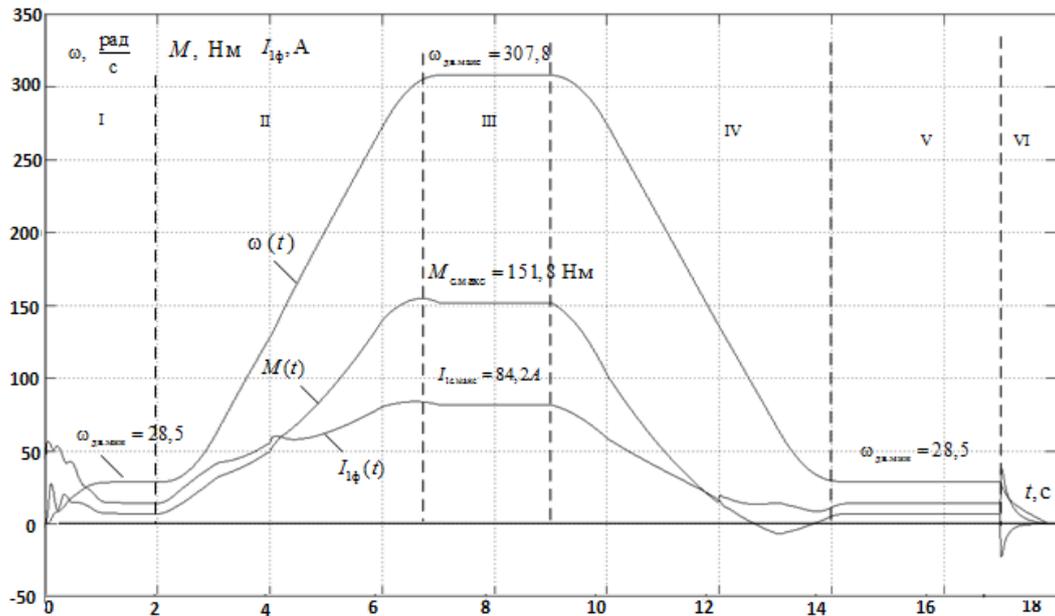


Рисунок 4.16 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом насоса заданного цикла с задатчиком интенсивности с S-образной характеристикой при времени  $T_{зи} = 5$  с; графики переходных процессов – скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_{1\phi}(t)$

Из графиков рисунков 4.15 и 4.16 видно, что применение ЗИ с S-образной характеристикой, по сравнению с ЗИ с линейной характеристикой дополнительно повышает плавность переходных процессов скорости  $\omega(t)$ , момента  $M(t)$ , фазного тока двигателя  $I_{1\phi}(t)$ .

**Выводы.** Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод насоса под «вентиляторной» нагрузкой при скалярном управлении с законом управления  $U_1/f_1^2 = \text{const}$  и корректировкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (4.3) обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты  $f_{и.мин} = 5$  Гц и требуемый диапазон регулирования скорости насоса. Переходные процессы в электроприводе особенно с задатчиком интенсивности с S-образной характеристикой протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя. Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путём выбора значения постоянной времени задатчика скорости.

Применение ЗИ с *S*-образной характеристикой при одинаковом времени  $T_{\text{ЗИ}}$  с линейным ЗИ позволяет повысить плавность изменения координат, что благоприятно сказывается на механической части электропривода насоса.

## 5 Синтез регулятора давления

Рассчитаем среднюю скорость течения воды в трубе

$$v_{cp} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{0,136}{3,14 \cdot \frac{0,6^2}{4}} = 0,86 \text{ м/с},$$

где  $Q = 0,136 \text{ м}^3/\text{с}$  - номинальная подача насоса;

$D$  - диаметр трубы, принимаем  $D = 0,6 \text{ м}$ .

Расчетное давление при движении воды в трубе

$$P = \frac{\rho \cdot v_{cp}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot H + p_{доп} = \frac{1000 \cdot 0,86^2}{2} + 1000 \cdot 9,81 \cdot 18 + 255317 = \\ = 608850 \text{ Па} = 6 \text{ атм},$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  - плотность воды;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения;

$p_{доп} = 255317 \text{ Па}$  – дополнительное статическое давление, Па;

$H = 18 \text{ м}$  - напор.

Простейшая модель насоса представляет собой динамическое звено, в котором преобразуется угловая скорость вращения двигателя в давление, представленное аperiodическим звеном на рисунке 5.1.

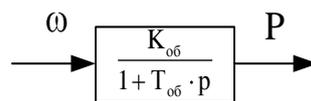


Рисунок 5.1 – Модель насоса

Параметры аperiodического звена модели насоса имеют следующие значения:

$T_{об} = 0,1 \text{ с}$  – постоянная времени аperiodического звена принимаем равным время разгона насоса;

$$K_{об} = \frac{P}{\omega_{дв.н}} = \frac{6}{307,88} = 0,0195 \frac{\text{атм} \cdot \text{с}}{\text{рад}} - \text{коэффициент передачи насоса},$$

где  $\omega_{дв.н} = 307,88 \text{ рад/с}$  - номинальная скорость двигателя насоса,

$P = 6 \text{ атм}$  - давление, при скорости  $\omega_{дв.н} = 307,88 \text{ рад/с}$ .

Инвертор напряжения преобразователя частоты представим апериодическим звеном. Его передаточная функция

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}}{T_{ин} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,0001p + 1},$$

где  $k_{ин} = 1$  - коэффициент передачи инвертора;

$T_{ин} = T_{\mu} = 0,0001$  с - эквивалентная постоянная времени инвертора преобразователя частоты.

Проведем синтез регулятора давления. Для этого составим структурную схему стабилизации давления на базе регулируемого асинхронного привода путем создания контура регулирования технологического параметра – давления на базе встроенного технологического регулятора преобразователя частоты [11].

На рисунке 5.2 представлена структурная схема контура давления.

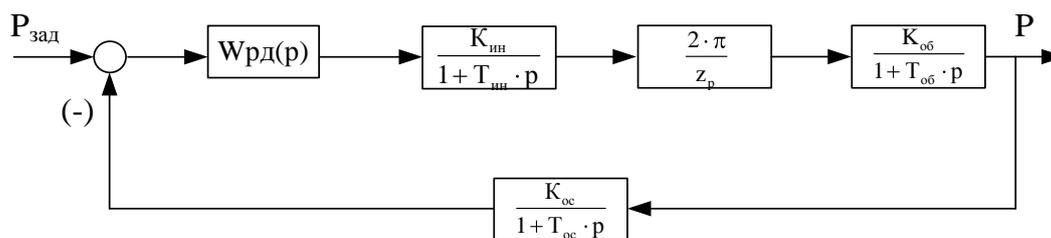


Рисунок 5.2 – Структурная схема контура давления

На рисунке 5.2 приняты следующие обозначения:

$W_{рд}(p)$  – передаточная функция регулятора веса;

$K_{ин}$  – коэффициент передачи инвертора;

$K_{об}$  – коэффициент передачи насоса;

$K_{ос}$  – коэффициент передачи обратной связи;

$T_{ин}$  – постоянная времени запаздывания автономного инвертора напряжения;

$T_{об}$  – постоянная времени время разгона насоса;

$T_{ос}$  – постоянная времени запаздывания обратной связи;

$z_p = 1$  - число пар полюсов асинхронного двигателя.

Проведем синтез контура давления на модульный оптимум [12].

Разомкнутый контур давления, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p (T_{\mu\kappa} p + 1)},$$

где  $T_{\mu\kappa}$  - малая постоянная времени контура давления.

Передаточная функция разомкнутого контура давления

$$W_{\text{раз}}(p) = W_{\text{рд}}(p) \cdot \frac{2\pi}{z_p} \cdot \frac{K_{\text{ин}}}{1 + T_{\text{ин}}p} \cdot \frac{K_{\text{об}}}{1 + T_{\text{об}}p} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{1 + T_{\text{ос}}p}. \quad (5.1)$$

Из выражения (5.1) получаем передаточную функцию регулятора давления

$$W_{\text{рд}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p \cdot (T_{\mu\kappa} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\text{ин}}p + 1)(T_{\text{ос}}p + 1)(T_{\text{об}}p + 1)}{k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi}.$$

При оптимизации, инерционность в канале обратной связи относится к «малым», и за малую некомпенсируемую постоянную времени всего контура принимаем

$$T_{\mu\kappa} = T_{\text{ин}} + T_{\text{ос}} = 0,0002 + 0,125 = 0,1252 \text{ с},$$

где  $T_{\text{ос}} = 0,125 \text{ с}$  - постоянная времени запаздывания цепи обратной связи измерения давления.

$$\begin{aligned} W_{\text{рд}}(p) &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p \cdot (T_{\mu\kappa} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu\kappa} p + 1)(T_{\text{об}}p + 1)}{k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\kappa} p} \cdot \frac{(T_{\text{об}}p + 1)}{k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_p}{2 \cdot \pi} \end{aligned}$$

После сокращения до множим и разделим полученное выражение на величину  $T_{\text{об}}$ , после чего приведём выражение к каноническому виду.

$$\begin{aligned} W_{\text{рд}}(p) &= \frac{T_{\text{об}} \cdot z_p}{2 \cdot T_{\mu\kappa} \cdot k_{\text{ин}} \cdot k_{\text{об}} \cdot k_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{(T_{\text{об}}p + 1)}{T_{\text{об}}p} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 1}{2 \cdot 0,1252 \cdot 1 \cdot 0,0195 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p} = 3,26 \cdot \frac{(0,1p + 1)}{0,1p}. \end{aligned}$$

Коэффициент усиления регулятора давления  $k_{\text{рд}} = 3,26$ .

Постоянная времени регулятора давления  $T_{\text{рд}} = 0,1 \text{ с}$ .

Ожидаемые показатели переходного процесса в контуре давления [12]

$$t_{py.1}^{(5)} = t_{py.2}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu k} = 4,1 \cdot 0,1252 = 0,513 c ; \sigma = 4,3\% .$$

Схема набора имитационной модели контура давления согласно структурной схемы рисунке 5.2, собранная в среде *MatLAB*, приведена на рисунке 5.3, а переходный процесс  $P(t)$  в контуре на скачок входного воздействия  $P_{зад} = 4$  атмосферы показан на рисунке 5.4.

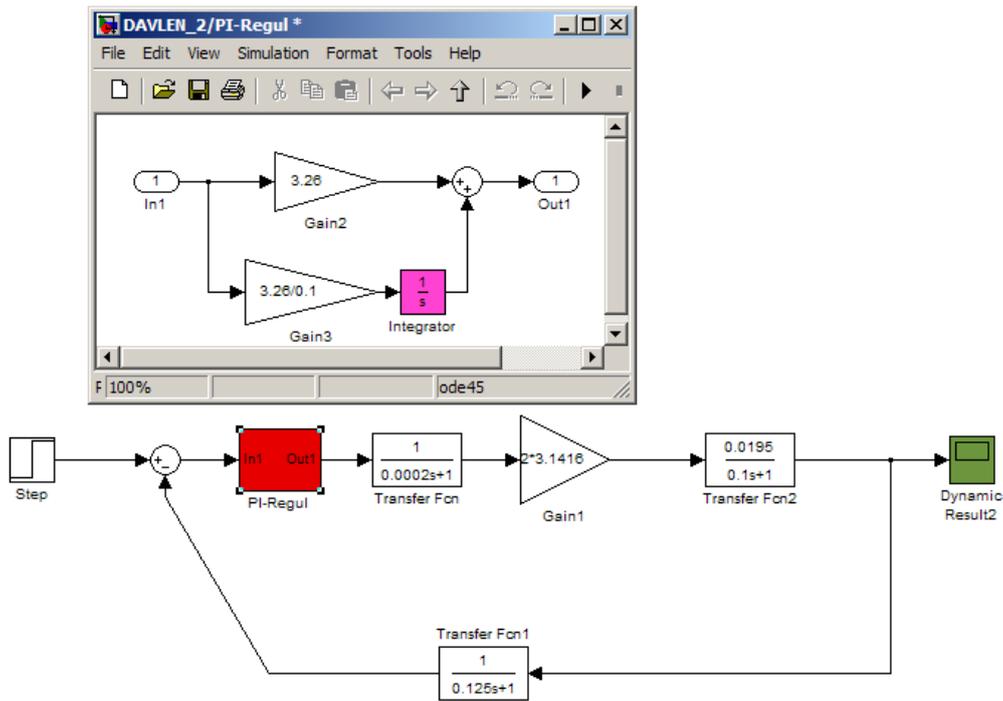


Рисунок 5.3 – Имитационная модель контура давления

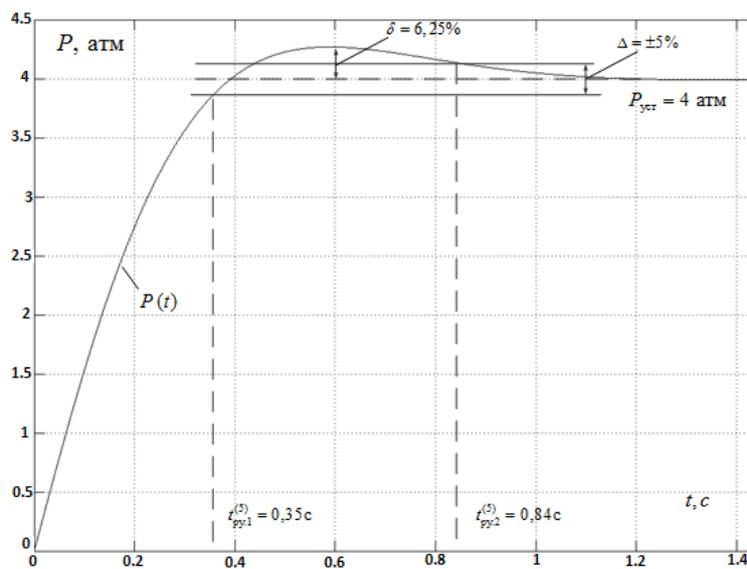


Рисунок 5.4 – Переходный процесс в контуре давления

Таблица 5.1 – Показатели качества работы контура давления

| $t_{PY1}^{(5)}, c$       | $t_{PY2}^{(5)}, c$ | $\sigma, \%$ | $\Delta P_{уст}, A$ |
|--------------------------|--------------------|--------------|---------------------|
| Ожидаемые показатели     |                    |              |                     |
| 0,513                    | 0,513              | 4,3%         | 0                   |
| Результаты моделирования |                    |              |                     |
| 0,35                     | 0,84               | 6,25%        | 0                   |

Сравнивая ожидаемые показатели качества работы контура давления с результатами моделирования можно сделать вывод о том, что синтезированный регулятор давления позволяет обеспечить показатели качества близкие к ожидаемым.

### 5.1 Имитационная модель автоматической системы регулирования давления

Имитационная модель автоматической системы регулирования давления рисунка 5.3, дополненная моделью электропривода, построенной по системе ПЧ-АД рисунка 4.5, приведена на рисунке 5.5.

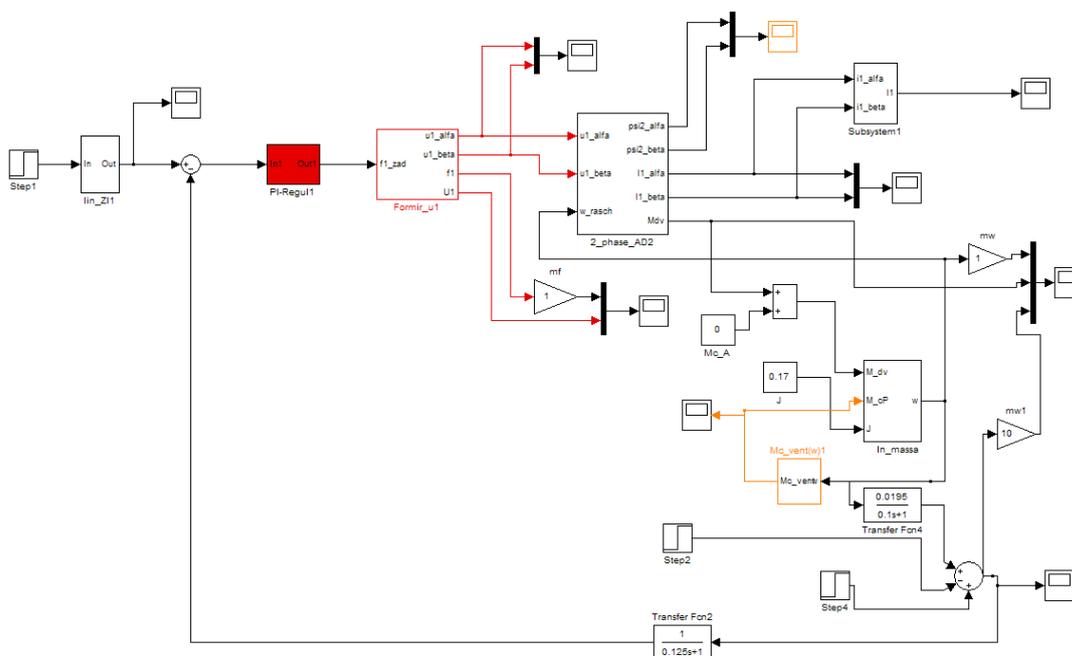


Рисунок 5.5 – Имитационная модель автоматической системы регулирования давления

На рисунке 5.6 приведены переходные процессы давления, скорости двигателя и электромагнитного момента АД, полученные при имитации открытия и закрытия клапана. Принимаем заданную величину давления в системе равным  $P_{зад} = 4 \text{ атм}$ , которое необходимо поддерживать при изменении величины расхода. Скачкообразное увеличение величины расхода воды в системе имитируется при резком открытии клапана. Давление в системе при этом падает на величину  $\Delta P = 2 \text{ атм}$ . Как видно из переходных процессов САР давления отрабатывает заданный перепад давления за время  $t_{ин} = 0,45 \text{ с}$ . При этом скорость двигателя возрастает от скорости  $\omega_{уст1} = 210 \text{ рад/с}$  до  $\omega_{уст2} = 307,5 \text{ рад/с}$  и момент двигателя возрастает от значения  $M_{с.1} = 72,3 \text{ Нм}$  до значения  $M_{с.макс} = 151,8 \text{ Нм}$ .

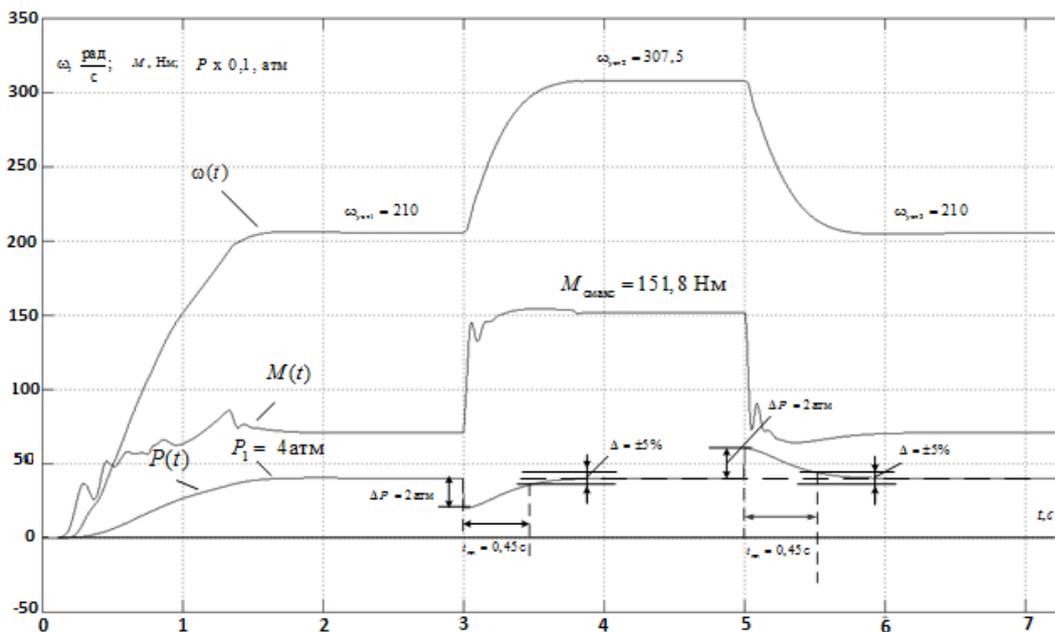


Рисунок 5.6 – Переходная характеристика давления  $P(t)$ , скорости двигателя  $\omega(t)$ , электромагнитного момента  $M(t)$  АД при пуске, открытии и закрытии клапана

При закрытии клапана моделируется повышение скачком давления на величину  $\Delta P = 2 \text{ атм}$ . САР давления отрабатывает данный перепад давления также за время  $t_{ин} = 0,45 \text{ с}$ . Скорость двигателя и электромагнитный момент соответственно уменьшаются.

Полученные результаты имитационных исследований подтверждают способность разработанной САР давления на базе частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса эффективно обеспечить стабилизацию величины давления в системе при изменении расхода согласно характеристике насоса, TP 150-390/4 A-F-A-BAQE данной в табл. 1.2.

## 5.2 Выбор оборудования для системы поддержания постоянного давления

Функциональная схема системы поддержания постоянного давления с использованием частотного преобразователя типа TP 150-390/4 A-F-A-BAQE изображена на рисунке 5.7.

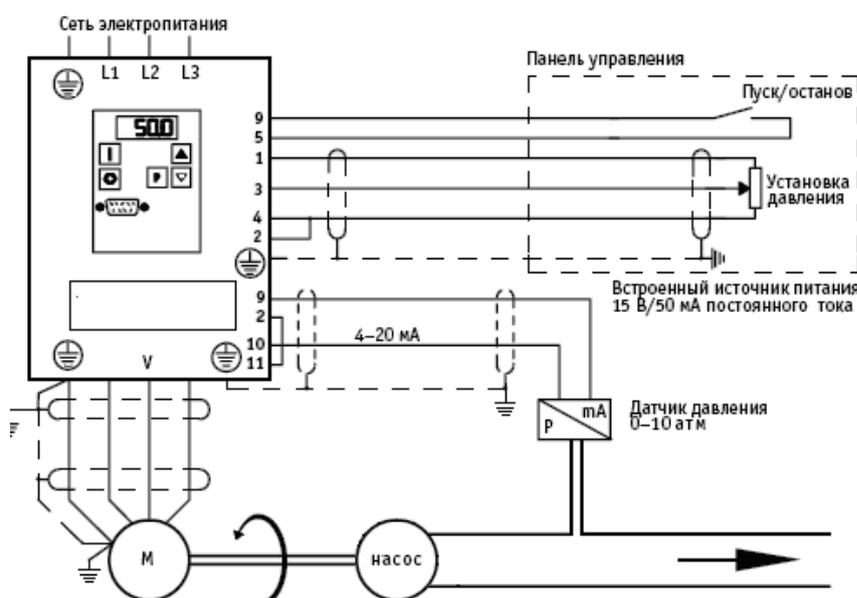


Рисунок 5.7– Функциональная схема системы поддержания постоянного давления

Необходимое значение давления задаётся через аналоговый вход №3 на внешнем разъеме ПЧ с помощью потенциометра. Датчик давления преобразует давление в трубопроводе в электрический стандартный токовый сигнал величиной 4-20 мА, поступающий на второй аналоговый вход: клеммы 9-10 в разъеме ПЧ. Для электропитания датчика давления предназначен второй встроенный источник питания с выходным напряжением 15 В и нагрузочной способностью 15 мА. Задание коэффициентов усиления пропорционального, интегрального звеньев технологического ПИ-

регулятора давления осуществляется через соответствующие параметры преобразователя.

### 5.3 Выбор преобразователя давления

В качестве первичного преобразователя выбираем измерительный преобразователь давления 7MF1562 фирмы Siemens, который предназначен для измерения относительного и абсолютного давления газов, жидкостей и пара в системах водоснабжения и т.д.



Рисунок 5.8 – Датчик давления 7MF1562

Основными компонентами измерительного преобразователя давления являются:

- корпус из латуни с кремниевой измерительной ячейкой и платой электроники;
- подключение к технологическому процессу;
- электрическое подключение;

Кремниевая измерительная ячейка оборудована тонкопленочным тензорезистором, который расположен на керамической мембране.

Технические характеристики датчика приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Технические характеристики датчика

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Диапазон измерения                       | От 0 до 10 атм.                |
| Выходной сигнал                          | 4...20 мА                      |
| Напряжение питания                       | от 10 до 36 постоянного тока   |
| Максимальная погрешность измерения       | не более 0,25% от полной шкалы |
| Диапазон рабочих температур              | От -25 до 85 °С                |
| Диапазон температур хранения             | От -50 до 100 °С               |
| Диапазон температур контролируемой среды | От -30 до 120 °С               |

## 6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Важнейшим фактором успешного функционирования любого промышленного предприятия, в рамках жесткой конкуренции с отечественными и иностранными производителями, является постоянное совершенствование технологии и продукции. Новые технологии и модернизация — это необходимый фактор для успешного продвижения продукции. Современный рынок требует от отечественного производителя коренной реконструкции и модернизации устаревшего технологического оборудования. Совершенствование технологий производства с целью повышения качества продукции, экономии затраченных средств, внедрение новых идей и соответственно появление новых видов продукции с новыми качествами - все это в условиях свободной конкуренции на рынке требует от товаропроизводителя совершенствоваться и внедрять новое технологическое оборудование.

Данный раздел выпускной квалификационной работы посвящен выбору наиболее выгодного варианта электропривода для рассматриваемого объекта автоматизации. В данном проекте рассматривается частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Преимуществами такого вида электропривода по сравнению с электроприводами постоянного тока являются:

1. более низкая стоимость;
2. минимальные затраты на обслуживание;
3. обеспечение требуемой степени защиты. Асинхронные короткозамкнутые машины имеют широкий ряд исполнений с разными степенями защиты. Это важно для рассматриваемого применения, так как оно связано с концентрацией взрывоопасных паров в окружающей среде и требует специальную степень защиты от взрыва электрических машин 1ExdПВТ4.

### **6.1 Выбор и обоснование структурной (принципиальной) схемы электропривода.**

Выбор структурной схемы сводится к сравнению нескольких возможных вариантов и выбору наиболее оптимальной.

I вариант: электропривод с двигателем постоянного тока;

II вариант: частотно-регулируемый электропривод с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

Таблица 6.1

|                                      | Варианты  |                                   | Примечания:<br>(преимущества,<br>недостатки) |
|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------|--|
|                                      | I         | II                                |  |
| 1. Общее количество составных частей | 4         | 4                                 |  |
| 2. Количество типов элементов        | 4         | 4                                 |  |
| 3. Количество оригинальных элементов | 2         | 2                                 |  |
| 4. Стоимость покупных комплектующих  |           | Стоимость в 2 раза меньше         | Простота конструкции                         |
| 5. Показатели надежности             |           | Надежность, простота обслуживания | Отсутствие щеточного аппарата                |
| 6. Питание:                          |           |                                   |  |
| а) вид                               | U=380 В   | U=380 В                           |  |
| б) мощность                          | P= 45 кВт | P= 45 кВт                         |  |
| 7. Габариты                          |           | Меньше в 2 раза                   | компактность                                 |
| 8. Масса                             |           | Легче в 2 раза                    | Экономия материала на изготовление           |

Для проведения оценки выбраны следующие показатели:

1. уровень капитальных вложений;
2. уровень надежности;
3. уровень обслуживания;
4. завышение мощности электропривода;
5. уровень затрат на эксплуатацию;
6. коэффициент мощности;
7. генерирование помех;

Таблица 6.2 Коэффициент весомости критериев

|                       |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Номер критерия        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| Коэффициент весомости | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |

По каждому частотному критерию устанавливаем оценку степени обеспечения цели:

|                                |               |                |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------|
| <i>Уровень цели</i>            | <i>низкий</i> | <i>средний</i> | <i>высокий</i> |
| <i>Оценка обеспечения цели</i> | <i>1.0</i>    | <i>0.5</i>     | <i>0</i>       |

Оценка обеспечения различными вариантами электроприводов выбранных качественных характеристик представлена в таблице 12.

Таблица 6.3

| Номер варианта | Групповой критерий |     |     |     |     |     |     | Общая оценка качества |
|----------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
|                | 1.0                | 0.8 | 0.6 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |                       |
| I              | 0,5                | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,15                  |
| II             | 1,0                | 0,5 | 1,0 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 2,25                  |

Из таблицы 12 видно, что выбранные качественные характеристики обеспечиваются в варианте II.

## 6.2 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности проекта необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot П_i ,$$

где

$k_i$  – весовой коэффициент  $i$  – го признака;

$П_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 6.4 – Весовые коэффициенты НТУ

| Признаки НТУ           | Весовой коэффициент |
|------------------------|---------------------|
| Уровень новизны        | 0.6                 |
| Теоретический уровень  | 0.4                 |
| Возможность реализации | 0.2                 |

Таблица 6.5 – Шкала оценки новизны

| Баллы      | Уровень                  |
|------------|--------------------------|
| 1-4        | Низкий НТУ               |
| <b>5-7</b> | Средний НТУ              |
| 8-10       | Сравнительно высокий НТУ |
| 11-14      | Высокий НТУ              |

Таблица 6.6 – Значимость теоретических уровней

| Характеристика значимости теоретических уровней   | Баллы |
|---|-------|
| Установка законов, разработка новой теории  | 10    |
| Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами                       | 8     |
| Разработка способа (алгоритм, вещество, устройство, программы)  | 6     |
| Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации) | 2     |
| Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)   | 0.5   |

Таблица 6.7 - Возможность реализации по времени и масштабам

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <u>Время реализации</u>        | Баллы |
| В течение первых лет           | 10    |
| От 5 до 10 лет                 | 4     |
| Свыше 10 лет                   | 2     |
| <u>Масштабы реализации</u>     | Баллы |
| Одно или несколько предприятий | 2     |
| Отрасль                        | 4     |
| Народное хозяйство             | 10    |

$$k_1 = 0.6, \Pi_1 = 6, k_2 = 0.4, \Pi_2 = 7, \\ k_3 = 0.2, \Pi_3 = 10, k_4 = 0.2, \Pi_4 = 4.$$

$$НТУ = 0.6 \cdot 6 + 0.4 \cdot 7 + 0.2 \cdot 10 + 0.2 \cdot 4 = 9.2$$

По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня можно сделать вывод, что данный проект имеет хорошие показатели новизны, значимость теоретического уровня, и при этом используется в широком спектре отраслей за сравнительно небольшое время реализации.

### **Планирование проектных работ**

Планирование проекта – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а также трудовых и материальных ресурсов.

Основные задачи:

1. Взаимная увязка работ проекта;
2. Согласование выполнения отдельных этапов работ во времени, определение их длительности и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
3. Определение общего объема работ и потребных для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов;
4. Распределение общего объема работ между исполнителями.

Графический метод планирования.

При графическом методе планирования на основе расчета трудоемкости и календарной продолжительности выполнения всех включенных в план работ с учетом их взаимосвязи и последовательности выполнения во временном масштабе (соответствующим производственному календарю планируемого года) строится графическая модель комплекса работ в виде линейной диаграммы, в которой положение и длина каждой линии характеризует дату начала (окончания) и продолжительность выполнения каждой работы. На основе линейного графика определяется общая продолжительность всего комплекса работ.

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой неопределенностью на основе вероятностных (экспертных) методов, широко используемых в СПУ.

Таблица 6.8 – Типовое содержание проектных работ

| Содержание работ  | Продолжительность работ, ожид/день |            |                 | Исполнители |
|---|------------------------------------|------------|-----------------|-------------|
|   | $t_{\min}$                         | $t_{\max}$ | $t_{\text{ож}}$ |             |
| 1. Разработка ТЗ на проектирование  | 3                                  | 5          | 3               | РП, И.      |
| 2. Разработка плана работ и технико-экономическое обоснование проекта         | 4                                  | 5          | 5               | РП, И.      |
| 3. Описание объекта автоматизации (модернизации)                              | 13                                 | 20         | 17              | РП, И.      |
| 4. Кинематическая схема механизма   | 5                                  | 10         | 8               | РП, И.      |
| 5. Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП                           | 12                                 | 15         | 14              | РП, И.      |
| 6. Расчет мощности и выбор электродвигателя                                   | 3                                  | 5          | 5               | РП, И.      |
| 7. Выбор способа регулирования скорости                                       | 7                                  | 10         | 9               | РП, И.      |
| 8. Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель» | 6                                  | 10         | 8               | РП, И.      |
| 9. Разработка математической модели системы АУ ЭП                             | 24                                 | 30         | 30              | РП, И.      |
| 10. Оптимизация САР электропривода  | 20                                 | 25         | 23              | РП, И.      |
| 11. Разработка программы имитационного моделирования                          | 10                                 | 15         | 12              | РП, И.      |
| 12. Вопросы безопасности и экологичности проекта                              | 6                                  | 10         | 10              | РП, И.      |
| 13. Технико-экономические расчеты   | 8                                  | 13         | 10              | РП, И.      |
| 14. Составление пояснительной записки   | 35                                 | 45         | 40              | РП, И.      |
| 15. Разработка графического сопровождения проекта                             | 20                                 | 25         | 25              | РП, И.      |

РП –руководитель проекта;  
И – инженер.

График выполнения работ по дням составлен на год с учетом всех выходных, предпраздничных и праздничных дней. Общее количество рабочих дней = 250, которые требуются на выполнение данного проектирования.

### Расчет сметы затрат на проектирование

Расчет сметы затрат на выполнение проекта, частью которого является ВКР, студента-дипломника, рекомендуется осуществлять методом сметных калькуляций по отдельным статьям расходов, всех видов необходимых ресурсов.

Таблица 6.9 - Смета затрат на проектирование

| Статьи расхода  | Сумма  |    | Примечания                                    |
|---|--------|----|---|
|   | руб    | %  |   |
| 1. Материалы, покупные п/ф и комплектующие изделия                    | 41000  |    |   |
| 2. Специальное оборудование   | 38000  |    | Стенды, приборы, установки, программы         |
| 3. Основная заработная плата научно-производственного персонала       | 160000 |    | Трудоемкость нормо-д, Стоимость 1-го нормо-д. |
| 4. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала | 16000  | 10 | 10÷15% от ст.3                                |
| 5. ЕСН  | 47529  | 27 | 27%( ст.3+ст.4)                               |
| 6. Расходы на научные и производственные командировки                 | 14080  | 8  | 5÷10% от(ст.3+ст.4)                           |
| 7. Расходы и услуги сторонних организаций                             | 32000  |    |   |
| 8. Накладные расходы  | 128000 | 80 | 60÷80% от ст.3                                |
| 9. Плановая прибыль   | 24607  | 7  | 6÷8% от (ст.3+4+5+8)                          |
| 10. Годовая сметная стоимость проекта                                 | 501216 |    |   |

По результатам расчетов строим круговую гистограмму:



Рисунок 6.1 Круговая гистограмма затрат на проектирование

### 6.3 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта

Капитальные вложения (инвестиции в реальные активы предприятия) включают:

- Затраты на предпроектные работы;
- Затраты на приобретение, доставку, установку и наладку оборудования;
- Сопряженные затраты
- Затраты на пополнение оборотных средств.
- Расчет капитальных вложений оформлен в виде таблицы 6.10:

Таблица 6.10 Бюджет инвестиций

|   | Кол-во | Цена, руб  | Общая стоимость, руб |
|---|--------|------------|----------------------|
| I. Оборудование:                                      |        |            |                      |
| Насос Grundfos TP 150-390/4 A-F-A-BAQE <sup>13</sup>  | 1      | 457 131,62 | 457 131,62           |
| Электродвигатель АИР 200S2, 45 кВт <sup>14</sup>      | 1      |            |                      |
| Преобразователь Altivar 212 <sup>15</sup>             | 1      | 50584      | 50584                |
| Датчик давления 7MF1562 <sup>16</sup>                 | 1      | 19 535     | 19 535               |
| II. Стоимость монтажных и пусконаладочных работ       |        | 17011,42   | 17011,42             |
| III. Транспортно-заготовительные расходы 2% (I+II)    |        | 31158      | 31158                |
| IV. Плановые накопления монтажной организации (6-15%) |        | 4778       | 4778                 |
| V. Сметная стоимость проектно-конструкторских работ   |        | 3739       | 3739                 |
|   |        | 501216     | 501216               |
| Всего затрат  |        |            | 1 085 153,04         |

Были рассчитаны капитальные вложения необходимые для реализации проекта с учетом цен май 2016 г.

## Расчет расходов при эксплуатации электропривода

Эксплуатационные расходы включают следующие статьи затрат:

- Расходы на электроэнергию
- Заработная плата обслуживающего персонала
- Амортизационные отчисления
- Затраты на ремонт
- Расходы на материалы, связанные с эксплуатацией

Расчеты отдельных статей эксплуатационных расходов ведутся по формулам:

- Расчет стоимости силовой электроэнергии

Силовая электроэнергия используется для питания приводов рабочих механизмов и рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{сил эн}} = \frac{P_{\text{уст}} \cdot F_{\text{д}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{з}}}{k_{\text{дв}} \cdot k_{\text{с}}},$$
$$W_{\text{сил.эн}} = \frac{37 \cdot 500 \cdot 0,65 \cdot 0,7 \cdot 0,8}{0,94 \cdot 0,93} = 7703 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

где

$P_{\text{уст}}$  – мощность установленного оборудования, кВт;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд времени работы оборудования, час;

$k_{\text{м}}$  – коэффициент одновременного использования электродвигателей (0.6–0.7);

$k_{\text{в}}$  – коэффициент использования оборудования по машинному времени (0.6–0.8);

$k_{\text{з}}$  – средний коэффициент загрузки оборудования (0.7–0.8);

$k_{\text{с}}$  – коэффициент, учитывающий потери в сети (0.92–0.95);

$k_{\text{дв}}$  – коэффициент, учитывающий потери в двигателях (0.9–0.93).

Затраты на силовую энергию в денежном выражении рассчитывается:

$$C_{\text{эл}} = W_{\text{сил эн}} \cdot C_{\text{э}},$$

где  $C_3$  – стоимость одного кВт·часа электроэнергии для промышленных предприятий.  $C_3$  - одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию для предприятия составляет 3,65 руб/кВт·ч для Томского района на 1.03.2016 г.

$$C_{эн} = 7703 \cdot 3,65 = 28115 \text{ руб}$$

Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления рассчитываются на основе норм амортизации

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100},$$

где

$K$  – капитальные вложения в электрооборудование;

$H_A$  – проценты отчислений на амортизацию.

– Электродвигатели – 9.6%

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 50584 \cdot 0.096 = 4856,064 \text{ руб}$$

– Преобразователи – 3.5%

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 19535 \cdot 0.035 = 683,725 \text{ руб}$$

– Электропривод – 9.6%

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 1085153,04 \cdot 0.096 = 104825,78 \text{ руб}$$

### **Издержки на ремонтно-эксплуатационное обслуживание электроприводов**

Оборудование электроприводов (электродвигатели, генераторы, трансформаторы и т.д.) является ремонтируемым. Оно подвергается плано-предупредительным ремонтам, периодичность и объем которых регламентируется системой ППР и сетей промышленной энергетики. [22 гл.IV, гл.XI]

Затраты на ППР электропривода

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{зар}} + C_{\text{м}} + C_{\text{опр}} + C_{\text{охр}},$$

где

$C_{\text{зар}}=96$  руб·час – заработная плата ремонтных рабочих;

$C_m = 84$  руб·час – стоимость материалов для ремонта (= основная зарплата без доплат);

$C_{опр} = 168$  руб·час – общепроизводственные расходы (= 200% от основной зарплаты);

$C_{охр} = 67,2$  руб·час – общехозяйственные расходы (= 80% от основной зарплаты).

$$C_{общ} = C_{зар} + C_m + C_{опр} + C_{охр} = 96 + 84 + 168 + 67,2 = 415,2 \text{ руб} \cdot \text{час}$$

Для определения составляющих затрат на ППР необходимо установить периодичность ремонтного цикла, межремонтного периода, и трудоемкость работ по ППР. По трудоемкости работ определяется зарплата энерго–персонала.

Таблица 6.11 – Нормы трудоемкости ремонта электропривода

| Мощность, кВт | Норма трудоемкости, чел-ч                  |                  |                           |
|---------------|--|------------------|---------------------------|
|               | Капитального ремонта без перемотки обмоток | Текущего ремонта | Технического обслуживания |
| 45            | 42   | 15               | 9                         |

Таблица 6.12 – Затраты на ППР электропривода

|  | Норма трудоемкости, чел-ч | Периодичность   | Затраты на ППР электропривода в час | Затраты на ППР электропривода |
|--|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Капитального ремонта без перемотки обмоток | 42                        | Раз в 2 года    | 415.2                               | 17438.4                       |
| Текущего ремонта                           | 15                        | Раз в 6 месяцев | 415.2                               | 6228                          |
| Технического обслуживания                  | 9                         | Раз в месяц     | 415.2                               | 3736.8                        |

В данной таблице рассчитаны затраты необходимые на планово–предупредительные работы, которые способствуют продлению эксплуатации данного электропривода.

Таблица 6.13 – Затраты на ППР электропривода в год

| Вид ППР                                    | Затраты на ППР электропривода в год |
|--|-------------------------------------|
| Капитального ремонта без перемотки обмоток | 8719.2                              |
| Текущего ремонта                           | 12456                               |
| Технического обслуживания                  | 44841.6                             |
| Итого                                      | 66016.8                             |

В данной таблице рассчитаны затраты на планово-предупредительные работы, которые были произведены, исходя из расчетов ППР электропривода в год.

В данной части ВКР был экономически обоснован выбор электропривода с асинхронным двигателем, был проведен расчет коэффициента научно-технического уровня, который оказался довольно высоким, что указывает на высокий потенциал данного проекта. Так же было выполнено планирование проектных работ, расчет сметы затрат на проектирование, расчет капитальных вложений на реализацию и расчет расходов при эксплуатации данного электропривода. Были рассчитаны издержки на ремонтно-эксплуатационное обслуживание электроприводов, т.е. затраты на планово-предупредительные работы.

## **7 Социальная ответственность**

Охрана труда - система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия». В нашей стране данные мероприятия выливаются в основные направления государственной политики в области охраны труда, которые отражены в статье 210 Трудового кодекса РФ. На обеспечение сохранения жизни и здоровья работников выделяются деньги, и проводятся профилактические мероприятия.

В данном разделе дипломной работы рассмотрены и проанализированы условия труда с точки зрения наличия и проявления вредных и опасных факторов, их воздействия на работника предприятия. Разработаны мероприятия по технике безопасности и производственной санитарии, а также мероприятия по противопожарной профилактике на рабочем месте мастера по обслуживанию насосной станции.

### 7.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Опасные и вредные производственные факторы подразделяются по природе действия на следующие группы:

- физические;
- химические;
- биологические;
- психофизиологические.

Вредный производственный фактор - производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор - производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме.

В процессе обслуживания насосной станции на мастера по обслуживанию насосной станции могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы, относящиеся к физической группе (таблица 1).

Таблица 7.1 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | Ф а к т о р ы<br>(ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ)  |         | Нормативные документы |
|--|---|---------|-----------------------|
|  | Вредные                                   | Опасные |                       |
| 1  | 2   | 3       | 4                     |
| Обслуживание насосной станции                                    | повышенная или пониженная температура по- | -       | СанПиН 2.2.4.548-96   |

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
|  | верхностей оборудования, материалов                        |   |   |
|  | повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны | -   | СанПиН 2.2.4.548-96<br>ГОСТ 12.1.005-88<br>ССБТ |
|  | влажность воздуха  | -   | СанПиН 2.2.4.548-96                             |
|  | скорость движения воздуха                                  | -   | СанПиН 2.2.4.548-96                             |
|  | тепловое излучение   | -   | ГОСТ 12.4.011-89<br>ССБТ                        |
|  | отсутствие или недостаток естественного света              | -   | СНиП П-4-79<br>СанПиН<br>2.2.1/2.1.1.1278-03    |
|  | недостаточная освещенность рабочей зоны                    | -   | СП52.13330.2011                                 |
|  | повышенный уровень шума на рабочем месте                   | -   | ГОСТ 12.1.003-83<br>ССБТ<br>СНиП П-12-77        |
|  | -  | движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования | ГОСТ 12.2.062-81<br>ССБТ                        |
|  | -  | возможность поражения электрическим током                                     | ГОСТ 12.2.007-75<br>ГОСТ 21130-75               |

## **7.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих**

### **Состояние воздушной среды (микроклимат)**

Один из основных факторов, влияющих на работоспособность и здоровье человека - это состояние воздушной среды рабочего места и производственного помещения. Микроклимат производственного помещения

– это климат внутренней среды этого помещения, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей. Таким образом, микроклимат данного производственного помещения, в котором установлен компрессор, характеризуется следующими параметрами:

- температурой воздуха  $t$ , °С
- относительной влажностью  $\phi$ , %;
- скоростью движения воздуха  $v$ , м/с;
- интенсивность теплового излучения  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Оптимальные микроклиматические условия при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального функционирования и теплового состояния организма без проявления напряжений реакций терморегуляции, т.е. создают ощущение теплового комфорта и являются предпосылкой высокого уровня работоспособности. Для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне.

Движение воздуха является важным фактором, влияющим на самочувствие человека. Минимальная скорость движения воздуха, ощущаемая человеком, составляет 0,1-0,2 м/с.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования не должна превышать 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников: 21°С – при категории работ Iб. Время пребывания людей при данных параметрах микроклимата может составлять 8 часов.

Мероприятия по созданию условий для нормальной терморегуляции организма:

- устройство систем вентиляции;
- кондиционирование воздуха и отопление.

Допустимые микроклиматические условия (таблица 2) при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызвать проходящие и быстро нормализующиеся отклонения в функциональном и тепловом состоянии организма и напряжение реакций терморегуляции, не выходящие за пределы физиологически приспособленных возможностей.

Таблица 7.2 – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

| Сезон года | Категория тяжести выполняемых работ | Температура, С <sup>0</sup> | Относительная влажность, % | Скорость движения воздуха, м/сек | Температура поверхностей, С <sup>0</sup> |
|------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|--|
|            |                                     | Допустим. Значение          | Допустим. Значение         | Допустим. Значение               | Допустим. Значение                       |
| 1          | 2                                   | 3                           | 4                          | 5                                | 6  |
| холодный   | Средней тяжести Пб                  | 15,0-22,0                   | 15-75                      | 0,2                              | 14,0 – 23,0                              |
| теплый     | Средней тяжести Пб                  | 16,0-27,0                   | 15-75                      | 0,2                              | 15,0 - 28,0                              |

При этом не возникает нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться дискомфортные теплоощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

Достигнуть оптимальных микроклиматических условий невозможно, т.к. производственное оборудование (компрессор) должен находиться в прохладном помещении, чтобы он не перегревался.

Мероприятия для создания благоприятных микроклиматических условий:

- надежная работа систем отопления в холодный период;
- кондиционирование и вентиляция воздуха в течение всего года, т.к. и переохлаждение, и перегрев организма человека ведет к нарушению жизненных функций;
- перед входом в производственное помещение, в котором установлен компрессор, оборудован тамбур, имеющий воздушную тепловую завесу от проникновения больших масс холодного воздуха через место открывания дверей и ворот в большом производственном помещении;
- снабжение мастера средствами индивидуальной защиты (по сезону).

Целью отопления помещения является поддержание в них в холодное время года заданной температуры воздуха. В зависимости от теплоносителя системы отопления бывают водяные, паровые, воздушные и комбинированные. В санитарно-гигиеническом отношении система водяного отопления наиболее эффективна.

Задачей вентиляции является обеспечение чистоты воздуха и заданных метеорологических условий в производственных помещениях. Вентиляция достигается удалением загрязнённого или нагретого воздуха из помещения и подачей в него свежего воздуха.

Задачей кондиционирования является обобщенное действие: либо подачи тепла, либо подачи воздуха.

### **Освещенность**

Глаз человека лучше всего приспособлен к естественному освещению. При недостаточном естественном освещении применяют искусственное освещение. Производственное освещение – это система, включающая в себя оба вида освещения, позволяющая осуществлять нормальный технологический процесс.

К современному производственному освещению предъявляют высокие требования гигиенического и технико-экономического характера. Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высо-

кий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое воздействие на рабочих, содействует повышению производительности труда.

Нормирование освещенности производится в соответствии со СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение».

Освещение в производственных условиях определяется следующими основными параметрами:

- световой поток  $\Phi$ , лм;
- сила света  $I$ , лд;
- освещенность  $E$ , лк,
- яркость  $L$ , кд/м\*.

В зависимости от природы источника света, освещение различают: естественное, искусственное, совмещенное. При недостатке естественного освещения используют совмещенное освещение. Последнее представляет собой освещение, при котором в светлое время суток одновременно светят естественное и искусственное освещение. В данном производственном помещении используется совмещенное освещение: естественное боковое одностороннее дополняется искусственным общим освещением, т.к. в структуре компрессора есть мелкие детали (таблица 3).

Таблица 7.3 - Параметры систем естественного и искусственного освещения на рабочих местах

| Наименование рабочего места | Тип светильника и источника света | Коэффициент естественной освещенности, КЕО, % | Освещенность при совмещенной системе, лк |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|--|
|                             |                                   | Норм. значение                                | Норм. значение                           |
| 1                           | 2                                 | 3   | 4  |
| Производственное помещение  | Люминесцентные лампы              | 0,5   | 200                                      |

Основная задача освещения - создание наилучших условий для видения. Эту задачу возможно решить только осветительной системой, отвечающей следующим требованиям:

1. Освещенность на рабочем месте должна соответствовать характеру зрительных работ;
2. Необходимо обеспечить достаточно равномерное распределение яркости на рабочей поверхности и в пределах окружающего пространства;
3. На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени;
4. В поле зрения должна отсутствовать прямая и отраженная бликоность - повышенная яркость светящихся поверхностей;
5. Величина освещенности должна быть постоянной во времени;
6. Следует выбирать необходимый спектральный состав света;
7. Следует выбирать оптимальную направленность светового потока;
8. Все элементы осветительных установок должны быть достаточно долговечны, электробезопасны, а также не должны быть причиной возникновения пожара или взрыва;
9. Установка должна быть удобной и простой в эксплуатации, отвечать требованиям эстетики.

## **Шум**

Шум наносит большой ущерб, вредно действует на организм человека и снижает производительность труда. Утомление рабочих из-за сильного шума увеличивает число ошибок при работе, способствует возникновению травм.

Сильный шум вредно отражается на здоровье и работоспособности людей. Продолжительность действия сильного шума вызывает общее утомление, может привести к ухудшению слуха, а иногда и к глухоте. Сильный шум в условиях производства может способствовать возникновению травматизма, т.к. на фоне этого шума не слышно сигналов транс-

порта, автопогрузчиков и других механизмов. Таким образом, шум вызывает нежелательную реакцию всего организма человека.

При нормировании шума используют два метода:

- нормирование по предельному спектру шума,
- нормирование уровня звука в дБ (таблица 4).

Таблица 7.4 - Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука (ГОСТ 12.1.003–83 с изм. 1999 г.)

| Рабочие места   | Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      | уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА |
|---|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--|
|   | 31,5   | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |  |
| Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях и на территории предприятий | 107  | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   | 80   |
| Помещение для насоса (по факту)   | 110  | 99 | 92  | 86  | 82  | 79   | 77   | 74   | 71   | 86   |

Таким образом, шум на рабочих местах не должен превышать допустимых уровней. Предельно допустимые значения, характеризующие шум и вибрацию, регламентируются ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности» и СН 2.2.4/2.1.8562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». На данном рабочем месте допустимый уровень звука 80 дБА, а по факту - 86 дБА, что превышает нормативный уровень. Вредный фактор поступает через шум от работы компрессора.

Бесшумных производств практически не бывает. Борьба с шумом – комплексная задача. Мероприятия по борьбе с шумом:

- уменьшение уровня шума в источнике его возникновения (износ подшипников, неточная сборка деталей при ремонтах и т.п.): повышение качества балансировки вращающихся деталей;
- совершенствование смазки трущихся поверхностей;
- звукопоглощение и звукоизоляция;
- использование оптимальных режимов работы компрессора;
- установка глушителей шума;
- рациональное размещение оборудования;
- применение специальных средств индивидуальной защиты: противошумные наушники, шлемы, вкладыши.

### **7.3 Техника безопасности**

#### **Механический фактор**

Безопасные условия работы обеспечиваются правильной организацией работ, соблюдением мастером техники безопасности. При работе движущихся механизмов и подвижных частей производственного оборудования необходимо соблюдать правила техники безопасности во избежание механических травм. Меры для защиты от случайного прикосновения вращающихся частей механизмов обслуживаемого оборудования: специальные кожухи.

#### **Электробезопасность**

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Требования электробезопасности отражены в «Правилах устройства электроустановок», «Межотраслевых правил безопасности при эксплуатации электроустановок» и различных ГОСТах: ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты», ГОСТ 12.1.030-81 «ССБТ. Защитное заземление, зануление», ГОСТ 12.1.038-82

ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».

Степень опасности обслуживания электрических установок определяют условия эксплуатации и характер окружающей среды. По степени опасности поражения электрическим током все помещения делятся на три категории. Рабочее место мастера находится в отдельном помещении со следующими данными:

- сухое, т.к. относительная влажность воздуха не превышает 60%,
- переменное напряжение питающей сети 380/220 В, частотой 50 Гц;
- с возможностью одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землёй металлоконструкциям зданий, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой. Помещение с данными условия является помещением с повышенной опасностью.

При нормальном режиме работы оборудования опасность поражения током невелика. Однако, возможны режимы, называемые аварийными, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящихся под напряжением с заземленными конструкциями.

Основные факторы, определяющие опасность поражения электрическим током:

- электрическое сопротивление тела человека;
- величина напряжения и тока;
- продолжительность воздействия электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- род и частота электрического тока;
- условия внешней среды и состояние человека.

Таблица 7.5 - Зависимость длительности протекания тока через тело человека от его величины

|                               |       |    |    |     |     |     |
|-------------------------------|-------|----|----|-----|-----|-----|
| Длительность воздействия, с   | ...30 | 30 | 1  | 0,7 | 0,5 | 0,2 |
| Допустимый безопасный ток, мА | 1     | 6  | 50 | 70  | 100 | 250 |

Основными мерами защиты от поражения током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей, находящихся под напряжением от случайного прикосновения;
- электрическое разделение сети;
- устранение опасности поражения при появлении напряжения на корпусах, кожухах и других частях электрического оборудования, что достигается применением малых напряжений, использованием двойной изоляции, выравниванием потенциала, защитным заземлением, занулением, защитным отключением и др.;
- применение специальных защитных средств переносных приборов и приспособлений;
- организация безопасной эксплуатации электроустановок;
- применение индивидуальных средств защиты: изолирующие электрозащитные средства (штанги изолирующие, диэлектрические перчатки, боты, галоши, коврики, изолирующие подставки), ограждающие средства защиты, предназначенные для временного ограждения токоведущих частей, для временного заземления, предохранительные средства защиты, предназначенные для индивидуальной защиты от световых, тепловых и механических повреждений.

Исправность средств защиты должна проверяться осмотром перед каждым применением, а также периодически через 6-12 месяцев.

Все работы, связанные с обслуживанием компрессорной установки, выполняются лицами, прошедшими специальное обучение по эксплуатации компрессора, и, получившие допуск к работе. Персонал обучен основным приемам работ и правилам техники безопасности.

Контроль за безопасностью работ предусматривает ежедневную проверку мастером:

- исправности заземления электроустройств и электропроводки;
- проверка защитных и блокировочных устройств;
- отсутствие посторонних предметов на рабочем месте;
- наличия ограждения вращающихся и перемещающихся деталей;
- исправность запоров электрошкафов, ключ от которых должен храниться у лица, имеющего право допуска;
- наличие медикаментов для оказания первой помощи и средств пожаротушения.

### **Расчёт защитного заземления. Теория расчёта заземления**

Защитное заземление является одной из наиболее часто встречающихся мер защиты людей от поражения электрическим током и предназначено для снижения до малых величин шагового напряжения и напряжения прикосновения.

Главным параметром защитного заземления является допустимая величина сопротивления заземляющего устройства, то есть того сопротивления, которое оказывает тогу замыкания на землю грунт, находящийся в зоне растекания.

Заземлители могут быть искусственными и естественными. Под естественными понимаются такие металлические предметы, которые имеют хорошую связь с землёй и могут быть использованы в качестве заземлителей. Это водопроводные трубы, свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле, металлические конструкции зданий и сооружений, имеющих надёжное соединение с землёй и т.п. В целях экономии затрат следует использовать в первую очередь естественные заземлители. Если сопротивление естественного заземлителя не соответствует допустимому по нормам, то параллельно к нему подсоединяется искусственное заземление. Допускаемое сопротивление в данном случае будет определяться по формуле:

$$r_3' = \frac{r_3 \cdot r_{e.з.}}{r_3 + r_{e.з.}},$$

где  $r_{e.з.}$  – сопротивление естественного заземлителя;

$r_3$  – допускаемое сопротивление искусственного заземления при отсутствии естественного;

$r_3'$  – допускаемое сопротивление искусственного заземления при наличии естественного.

В случаях использования в качестве естественных заземлителей свинцовых оболочек кабелей, водопроводных труб либо других трубопроводов, сопротивление таких заземлителей можно определить по формуле:

$$r_{e.з.} = \frac{0,366 \cdot \rho \cdot \kappa_2}{l_{e.з.}} \cdot \lg \frac{l_{e.з.}^2}{d_{e.з.} \cdot h_{e.з.}}, \text{ либо}$$

$$r_{e.з.} = \frac{\rho \cdot \kappa_2}{2\pi \cdot l_{e.з.}} \cdot \ln \frac{l_{e.з.}^2}{d_{e.з.} \cdot h_{e.з.}},$$

где  $l_{e.з.}$  – длина естественного заземлителя, см;

$d_{e.з.}$  – диаметр естественного заземлителя, см;

$h_{e.з.}$  – глубина заложения (расстояние от поверхности земли до заземлителя), см;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом см;

$\kappa_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счёт промерзания или просыхания грунта для горизонтально проложенных заземлителей.

## Расчёт искусственного заземления

Искусственное заземляющее устройство состоит из вертикальных электродов и горизонтально расположенной соединительной полосы.

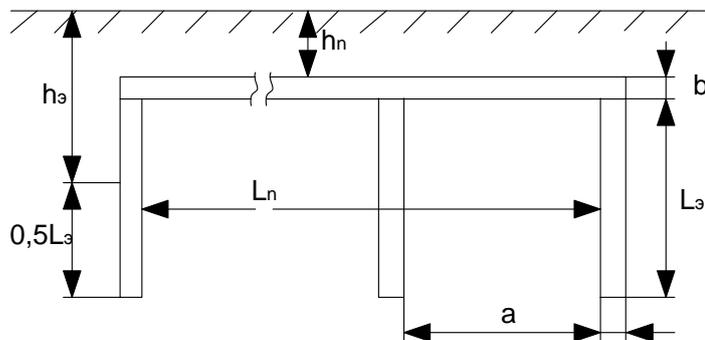


Рисунок 7.1 - Схема искусственного заземления

$l_{э}$  – длина электрода, см;

$d_{э}$  – диаметр электрода, см;

$h_{э.з.}$  – глубина заложения электрода, см;

$a$  – расстояние между электродами, см;

$b$  – ширина соединительной полосы, см;

$h_n$  – глубина заложения соединительной полосы, см;

$l_n$  – длина соединительной полосы, см;

Длина соединительной полосы определяется по формулам:

$$l_n = a \cdot n, \text{ если электроды расположены в ряд;}$$

$$l_n = a \cdot (n - 1), \text{ если электроды расположены по контуру;}$$

где  $a$  – количество электродов

Таким образом, расчёт защитного заземления сводится к определению необходимого количества электродов, чтобы общее сопротивление не превышало допустимого по нормам.

$R=4(\text{Ом})$ , т.к. сопротивление для электроустановок напряжением до 1000В с глухим заземлением нейтрали трансформаторов должно быть не более 4 Ом. Согласно ПУЭ.

Для цеховой ТП применимо контурное заземление.

1. Определяем сопротивление одного электрода

$$r_{э} = \frac{0,366 \cdot \rho \cdot \kappa_{в}}{l_{э}} \cdot \left( \lg \frac{2 \cdot l_{э}}{d_{э}} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot h_{э} + l_{э}}{4 \cdot h_{э} - l_{э}} \right),$$

Материал электрода – уголковая сталь, ширина полки которой 5 см. Принимаем:

- $d_{\text{э}} = 0,95 \cdot 5 = 4,75$  см;
- тип грунта – суглинок;
- климатическая зона

$$r_{\text{э}} = \frac{0,366 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 1,3}{150} \cdot \left( \lg \frac{2 \cdot 150}{4,75} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 150 + 150}{4 \cdot 150 - 150} \right) = 60,63 \text{ Ом},$$

2. Определяем предварительное количество электродов

$$n' = \frac{r_{\text{э}}}{r_3} = \frac{60,63}{4} = 16,$$

3. Зная положение электродов (в ряд), отношение расстояния между электродами к их длине и предварительное количество электродов  $n'$ , определим коэффициент использования электродов –  $\eta_s$

$$\eta_s = 0,77$$

4. Определяем окончательное потребное количество электродов  $n$

$$n = \frac{r_{\text{э}}}{r_3 \cdot \eta_s} = \frac{60,63}{4 \cdot 0,77} = 21,$$

5. Определяем длину соединительной полосы  $l_n$

Так как расположение электродов было выбрано в ряд, длина соединительной полосы определяется по формуле:

$$l_s = a \cdot (n - 1) = 150 \cdot (21 - 1) = 3000,$$

6. Определяем сопротивление соединительной полосы

$$r_{\text{п}} = \frac{0,366 \cdot \rho \cdot \kappa_{\Gamma}}{l_{\text{п}}} \cdot \lg \frac{2 \cdot l_{\text{п}}^2}{h_{\text{п}} \cdot b},$$

$$r_{\text{п}} = \frac{0,366 \cdot 10^4 \cdot 1,7}{3000} \cdot \lg \frac{2 \cdot 3000^2}{75 \cdot 5} = 9,7$$

7. Определяем общее сопротивление контура защитного заземления

$$r_{\Sigma} = \frac{r_{\text{э}} \cdot r_{\text{п}}}{r_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{п}} + r_{\text{п}} \cdot \eta_s \cdot n},$$

$$r_{\Sigma} = \frac{60,63 \cdot 9,7}{60,63 \cdot 0,35 + 9,7 \cdot 0,77 \cdot 21} = 3,4,$$

8. Производим проверку выполнения условия

$$r_{\Sigma} \leq r_3,$$

$$3,4 < 4$$

Полученный результат удовлетворяет требованиям и, следовательно, защитное заземление выбрано, верно.

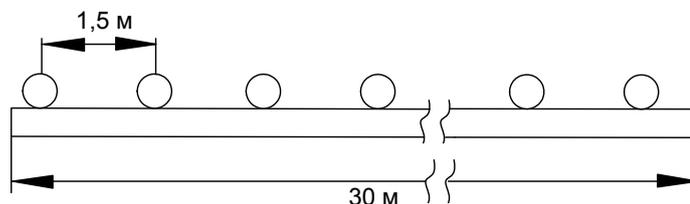


Рисунок 7.2 - Схема расположения электродов в ряд

#### 7.4 Экологическая безопасность

Мероприятия по охране природы регламентируются ГОСТ 17.1.3.06-82 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод» [34], ГОСТ 17.2.1.03-84 «Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения» [35] и ГОСТ 17.1.3.13-86 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения» [36].

Любая промышленность остается потенциально опасной по загрязнению окружающей среды и отдельных ее объектов. Это воздействие на основные ее компоненты: воздух, почву, воду, растительный и животный мир, человека.

Для исключения загрязнения атмосферы, воздух, удаляемый из производственных помещений, пропускается через специальные очистительные фильтрующие и обезвреживающие устройства. После очистки он попадает в атмосферу.

Следует помнить, что отработанное масло, конденсат и компрессорные фильтры являются загрязняющими материалами, вредными для окружающей среды – литосферы. Поэтому предприятие заключило договора с организациями, занимающимися утилизацией данных видов отходов, которые обеспечивают своевременный вывоз отходов.

Бытовые и технические воды выводятся в канализацию, по которой воды попадают на очистные сооружения, где проходят очистку и обезвреживание.

## 7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

### Пожарная и взрывная безопасность

На промышленных предприятиях в больших объемах применяются смазочные вещества, взрывоопасные и горючие газы и жидкости. Как правило, основной причине пожара и взрыва предшествует стадия накопления ошибок в объемно-планировочных решениях, недостатков технологических процессов, дефектов оборудования и нарушения режимов его работы, недостаточного контроля за организацией труда и действиями персонала и других причин.

Чтобы избежать этого, на этапе проектирования необходимо правильно классифицировать производство, помещения по пожаро- и взрывоопасности. Применительно к нашей работе установим следующее: помещение выполнено из железобетонных конструкций, не имеет деревянных и других быстровоспламеняющихся материалов. Исходя из НПБ 105-03, выбираем категорию «Д».

К основным причинам возникновения пожара относятся:

- электрический характер (короткое замыкание, ненадежность контактной системы, перегрев проводов).

Для устранения вышеуказанных причин осуществляют следующие мероприятия:

- для предотвращения коротких замыканий проводят: измерения сопротивления изоляции (условие  $R_{из} > 0,5 \text{ МОм}$ ), защиту от механических повреждений (прокладка проводов и кабелей в трубах), использование коммутирующей аппаратуры для быстрого отключения места повреждения.

Противопожарная безопасность на примере рассматриваемого помещения обеспечивается мероприятиями противопожарной профилактики и активной пожарной защиты.

Основы противопожарной защиты определены ГОСТ 12.1.004-91.

Мероприятия по противопожарной профилактике подразделяется на:

*1. Организационные мероприятия:*

- эксплуатация оборудования в соответствии с ПУЭ и ПТБ;
- соблюдение правил противопожарной безопасности по содержанию порядка в помещении;
- инструктаж рабочего персонала, направленный на соблюдение правил противопожарной безопасности;

*2. Технические мероприятия:*

- рациональное размещение оборудования (с проходами между компрессорами);
- соблюдение правил противопожарной безопасности, ПУЭ при устройстве оборудования, отопления, вентиляции.

*3. Режимные мероприятия:*

- запрет курения в неустановленных местах;
- строгое соблюдение ТБ во время работы;

*4. Эксплуатационные мероприятия:*

- ремонт вышедшего из строя оборудования;
- периодические испытания оборудования.

При проектировании помещения для установки компрессора был предусмотрен безопасный эвакуационный путь персонала на случай возникновения пожара, во время которого персонал покинет здание в течение минимального времени в соответствии с планом эвакуации.

### **Средства пожаротушения**

Для тушения пожара широко применяются различные химические средства, выбрасываемые в очаг пожара с помощью огнетушителей.

Например, углекислотные огнетушители типов ОУ-2А, ОУ-5, ОУ-8 и др., предназначенные для тушения возгорания различных материалов и электроустановок. В помещениях оборудуются специальные щиты и посты со следующим инвентарем:

- ручные углекислотные огнетушители ОУ-2, ОУ-5 (или другого типа);
- ящик с песком 3 м<sup>3</sup> - 1 шт;
- асбест 2х1,5 м - 1 шт;
- ведро – 2 шт;
- лопата – 2 шт;
- багор.

### **Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и социального характера**

Основные причины возникновения чрезвычайных ситуаций:

- результат стихийных бедствий;
- воздействие внешних природных факторов, приводящие к старению материалов;
- технико-производственные дефекты сооружений;
- нарушение правил эксплуатации сооружений и технологических процессов;
- нарушение правил техники безопасности при ведении работ и во время технологических процессов.

Под устойчивостью работы предприятия в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени понимается его способность производить в этих условиях запланированную продукцию в установленном объёме.

Надежная работа предприятия в условиях военного времени неразрывно связана с защитой рабочих, служащих и членов их семей от оружия массового поражения, для обеспечения которой в мирное время производятся следующие основные мероприятия:

- а) поддержание в постоянной готовности системы оповещения;
- б) обеспечение фонда убежищ на объекте для работающей, и противорадиационных укрытий в загородной зоне для отдыхающих смен и членов семей рабочих и служащих;

- в) планирование и выполнение подготовительных работ по строительству на объекте быстро возводимых убежищ и ПРУ в загородной зоне;
- г) поддержание в готовности защитных сооружений и организация обслуживания убежищ и укрытий;
- д) планирование и подготовка к рассредоточению и эвакуации в загородную зону производственного персонала и членов их семей;
- е) накопление, хранение и поддержание готовности средств индивидуальной защиты;
- ж) обучение рабочих и служащих способам защиты от ОМП и действиям по сигналам оповещения ГО.

От устойчивости зданий и сооружений к ударной волне зависит в основном устойчивость всего объекта. Целесообразным пределом повышения устойчивости зданий и сооружений к такому воздействию считается такой, при котором полученные предприятием разрушения дают возможность его оправданного восстановления. Вместе с тем, стремиться повышать устойчивость всех зданий и сооружений не следует, так как это связано с большими материальными затратами, которые не всегда оправдываются. Главным образом следует повышать прочность наиболее важных элементов производства, от которых зависит работа всего предприятия, но устойчивость которых ниже общего предела устойчивости.

Повышение устойчивости зданий и сооружений достигается устройством каркасов, рам, подносов, контрфорсов и опор для уменьшения пролета несущих конструкций, а также применением более плотных материалов.

Надежно защитить всё технологическое оборудования от воздействия ударной волны практически невозможно, так как доводить прочность зданий цехов до защитных свойств убежищ экономически нецелесообразно. Защита оборудования необходима, если: защищаемое оборудование способно при разрушении остальной части предприятия выпускать особо важную продукцию; защищаемое оборудование трудно восстанавли-

ливается, а при поражении данного объекта предусматривается использования этого оборудования на других предприятиях; защищаемое оборудование уникально, и его необходимо сохранить для дальнейшего использования.

## Заключение

В результате выполнения ВКР разработана система автоматического регулирования давления насосной станции.

Проанализирован и выбран наиболее подходящий, для рассмотренного технологического процесса закон регулирования – скалярное управление  $U/f^2$ . Данный вид управления позволяет получить искусственные механические характеристики с требуемой жесткостью, ему свойственна техническая простота измерения и регулирования абсолютных значений переменных АД.

Проведена оптимизация на модульный оптимум конура давления и синтез регулятора давления.

Методом моделирования в среде MATLAB установлено, что система поддерживает заданное давление и отрабатывает перепады давления при открытии и закрытии клапана на стороне потребителя, с требуемыми показателями качества.

Составлена функциональная схема системы поддержания постоянного давления на основе преобразователя частоты фирмы Schneider Electric серии Altivar 212. Выбрана элементная база системы: датчика давления с цифровым выходом давления 7MF1562.

В разделе производственной и экологической безопасности проведен анализ вредных факторов, рассмотрена техника безопасности, пожарная безопасность технологического процесса, производственная санитария.

В организационно-экономической части выполнено планирование проектных работ, расчет капитальных вложений на реализацию и расчет расходов при эксплуатации данного электропривода, так же выполнен расчет сметы затрат на проектирование. Выполнен расчет издержки на ремонтно-эксплуатационное обслуживание электроприводов, то есть. затраты на планово-предупредительные работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. [http://studopedia.ru/13\\_68771\\_vibor-osnovnih-nasosov-dvigately-i-ih-komponovka.html](http://studopedia.ru/13_68771_vibor-osnovnih-nasosov-dvigately-i-ih-komponovka.html) /20.02.2016/
2. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о центробежных насосах - Режим доступа: <http://www.rimos.ru/catalog/pump/11356> /25.02.2016/
3. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о расчете мощности насоса - Режим доступа: [http://www.gusta.ru/?doc=raschet\\_mowel](http://www.gusta.ru/?doc=raschet_mowel) /28.02.2016/
4. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учеб. пособие для вузов. -2-е изд., доп. – М.: Высш.шк.2000. – 255с., ил.
5. Электронный каталог [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о частотных преобразователях фирмы Schneider Electric - Режим доступа: <http://chastotniki.ru/products.php?id=302> /5.03.2016/
6. Электрический привод: учебно-методическое пособие / А.Ю. Чернышев, С.И. Качин, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет, – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 156с.
7. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.
8. А.Ю. Чернышев. Электропривод переменного тока: учебное пособие/ А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 218с.
9. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. - М.: Энергоатомиздат, 1983. -616 с. ил.
10. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие / О. П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 476 с.

11. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удут; Имитационные модели в среде моделирования MATLAB–Simulink, Методика настройки систем управления электропривода. Исследование электропривода посредством компьютерного моделирования, Томск, 2014г.- 149с.

12. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электропривод. Часть 1. - Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования.: Учеб. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1999. – 144 с.

13 <http://www.rimos.ru/catalog/pump/23846> /26.03.2016/

14 <http://electronpo.ru/price> /26.03.2016/

15

[http://1uts.ru/avtomatizatsiya/preobrazovatel\\_schneider\\_electric\\_ATV212.php](http://1uts.ru/avtomatizatsiya/preobrazovatel_schneider_electric_ATV212.php)  
/26.03.2016/

16 [http://www.tender.pro/show\\_report.shtml?nid=1365151](http://www.tender.pro/show_report.shtml?nid=1365151) /26.03.2016/