

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

---

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы  |
|--|
| <b>Асинхронный электропривод насоса прямой подачи подкачивающей насосной станции</b> |

УДК 62-83-523:621.65

Студент

| Группа  | ФИО                           | Подпись | Дата |
|---------|-------------------------------|---------|------|
| 3-5ГЗА1 | Михеев Владислав Владимирович |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|------------------------|---------|------|
| Профессор | Дементьев Ю.Н. | Ph.D, доцент           |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Попова С.Н. | к.э.н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент | Мезенцева И.Л. |                        |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель Отделения | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------|----------------|------------------------|---------|------|
| Профессор              | Дементьев Ю.Н. | Ph.D, доцент           |         |      |

Томск – 2018 г.

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

---

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. отделением

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      Ю.Н. Дементьев  
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

| Группа  | ФИО                              |
|---------|----------------------------------|
| 3-5ГЗА1 | Михееву Владиславу Владимировичу |

Тема работы:

**Асинхронный электропривод насоса прямой подачи подкачивающей  
насосной станции**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 856/с от 08.02.2018г

Срок сдачи студентом выполненной работы:

01.06.2018г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Исходные данные к работе</b>   | Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.   |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик; безопасность и экологичность проекта; экономическая часть; заключение. |

|   |  |
|---|--|
| <b>Перечень графического материала</b>  | Функциональная схема и имитационная модель электропривода<br>Динамические характеристики электропривода<br>Статические характеристики электродвигателя и электропривода<br>Технико-экономические показатели. |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>                       |  |
| <b>Раздел</b>   | <b>Консультант</b>   |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                         | Попова Светлана Николаевна   |
| Социальная ответственность  | Мезенцева Ирина Леонидовна   |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> |  |
| Заключение  |  |

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 05.04.2018г. |
|---|--------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата         |
|-----------|----------------|------------------------|---------|--------------|
| Профессор | Дементьев Ю.Н. | Ph.D, доцент           |         | 05.04.2018г. |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа  | ФИО                           | Подпись | Дата         |
|---------|-------------------------------|---------|--------------|
| 3-5ГЗА1 | Михеев Владислав Владимирович |         | 05.04.2018г. |

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Разработать регулируемый электропривод насоса прямой подачи подкачивающей насосной станции типа 300Д90, удовлетворяющий следующим техническим требованиям и характеристикам.

1. Режим работы – продолжительный, нагрузка реактивная.
2. Электропривод неререверсивный, диапазон регулирования  $D = 3:1$ .
3. Погрешность поддержания заданной частоты не более 10 % на нижней рабочей скорости.
4. Управление электроприводом - ручное, с пульта управления обслуживающим персоналом, в автоматизированном режиме поддержания давления с перспективой интеграции в систему управления более высокого уровня.
5. Электродвигатель должен быть предназначен для работы в условиях повышенной температуры, иметь закрытое исполнение со степенью защиты не ниже IP54.
6. Преобразователь должен быть предназначен для работы в закрытых стационарных помещениях при температуре окружающего воздуха от  $5^{\circ}$  до  $45^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности не более 80% .
7. Система управления электроприводом должна обеспечивать надежную защиту от перегрузок и аварий, простоту управления и обслуживания.
8. Сеть трёхфазная,  $6000 \pm 10\% \text{ В}$ ,  $50 \pm 1 \text{ Гц}$ .

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 103 страниц, 37 рисунков, 27 таблицы, 40 используемых источников.

Объектом модернизации является электропривод насоса марки 300Д90.

Цель работы - разработка частотно регулируемого электропривода в соответствии с требованиями технического задания и исследование его работы методом моделирования на ЭВМ.

В ходе работы был разработан электропривод, обеспечивающий следующие показатели качества:

- диапазон регулирования скорости 3:1;
- погрешность поддержания скорости  $\delta \leq 3\%$  при изменении нагрузки  $0,2M_{двн}$ ;
- время переходного процесса  $t \leq 2c$ .

ВКР выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010, графическом редакторе Visio 2010, статическом редакторе Microsoft Excel 2010. Расчёты производились с помощью пакета прикладных программ MathCAD 2014 Professional Rus. Имитационное моделирование электропривода выполнено с помощью пакета программ MatLab 7.1.

|  |    |
|--|----|
| <b>Содержание</b>  |    |
| ВВЕДЕНИЕ   | 8  |
| 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОДКАЧИВАЮЩЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ   | 10 |
| 1.1 Технический процесс подачи тепловой энергии  | 10 |
| 1.2 Основное и вспомогательное оборудование  | 11 |
| 1.3 Описание насоса и его характеристики   | 15 |
| 2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПЧ-АД  | 18 |
| 2.1 Расчет параметров и характеристик асинхронного электродвигателя  | 18 |
| 2.1.1 Паспортные данные электродвигателя   | 18 |
| 2.1.2 Расчет параметров электродвигателя   | 20 |
| 2.1.3 Определение параметров схемы замещения электродвигателя по каталожным данным                             | 21 |
| 2.2 Расчёт естественных характеристик электродвигателя   | 25 |
| 2.3 Расчет механических и электромеханических характеристик электропривода                                     | 28 |
| 2.4 Определение возможных вариантов и обоснование выбора вида преобразователя электрической энергии            | 31 |
| 2.5 Выбор преобразователя частоты  | 32 |
| 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ                                     | 38 |
| 3.1 Разработка имитационных моделей электропривода со скалярным управлением                                    | 38 |
| 3.1.1 Одномассовая механическая система с реактивной нагрузкой   | 43 |
| 3.1.2 Имитационная модель задатчика интенсивности с S-образной характеристикой                                 | 44 |
| 3.2 Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении            | 46 |
| 3.2.1 Программа исследований электропривода  | 46 |
| 3.3 Параметры элементов силового канала электропривода насоса  | 47 |
| 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ                                     | 53 |
| 4.1 Разработка имитационной модели регулируемого электропривода с векторным управлением                        | 53 |
| 4.1.1 Структурные схемы блоков преобразования координат двигателя  | 58 |
| 4.1.2 Структурные схемы ПИ-регуляторов   | 59 |
| 4.2 Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода вращающихся насоса с векторным управлением | 65 |
| 4.2.1 Программа исследований электропривода  | 65 |
| 4.2.2 Расчет параметров моделей асинхронного электропривода насоса с частотным векторным управлением           | 66 |
| ВЫВОД  | 74 |
| 5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ  | 77 |
| 5.1 Выбор и обоснование структурной (принципиальной) схемы   |    |

|   |     |
|---|-----|
| электропривода.   | 77  |
| 5.2 Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)    | 79  |
| 5.4 Расчет сметы затрат на проектирование.                      | 84  |
| 5.5 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта.          | 85  |
| 5.6 Расчет расходов при эксплуатации электропривода             | 86  |
| ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»                | 91  |
| 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ                                    | 92  |
| 6.1 Производственная безопасность                               | 92  |
| 6.2 Экологическая безопасность                                  | 96  |
| 6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях                       | 97  |
| 6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 98  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ  | 99  |
| CONCLUSION  | 100 |
| Список использованных источников                                | 101 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Рациональное использование водных и топливно-энергетических ресурсов, а также охрана окружающей среды определили направление развития систем водо и теплоснабжения. При проектировании новых и реконструкции существующих систем водоснабжения все чаще предусматривается создание систем бессточного водопользования на базе замкнутых циклов. Основными энергетическими звеньями систем водоснабжения, обеспечивающими перемещение различных жидких сред по водопроводам, являются насосные станции.

Задачей выпускной квалификационной работы является проектирование автоматизированного электропривода насосной установки системы горячего водоснабжения, т.е. насосной станции горячего водоснабжения (теплового пункта).

Значительная экономия топливно-энергетических ресурсов достигается при централизации теплоснабжения жилых, промышленных и общественных зданий в городах и других населенных пунктах. Рациональная концентрация и централизация производства горячей воды и пара для отопительных и технологических нужд, постепенная ликвидация нерентабельных мелких котельных, строительство ТЭЦ и крупных районных котельных - основные пути развития централизованного теплоснабжения. С этим развитием связано строительство протяженных и широко разветвленных тепловых сетей с многочисленными тепловыми пунктами разнородных потребителей жилого и промышленного секторов.

Теплоснабжение народного хозяйства и населения является одной из основных подсистем энергетики страны. Назначение системы теплоснабжения состоит в обеспечении потребителей необходимым количеством теплоты в виде пара и горячей воды требуемых параметров.

В системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) осуществляются следующие технологические процессы: производство и отпуск теплоты, транспортирование и использование теплоносителя.



Производство и отпуск теплоты осуществляются в тепло подготовительных установках источников теплоты - ТЭЦ и городских или промышленных котельных. В источниках теплоты используют органическое или ядерное топливо. Основное назначение источников теплоты - обеспечение экономичных режимов отпуска теплоты в тепловую сеть, надежная, бесперебойная и экономичная работа их агрегатов.

Транспортирование теплоносителя производится по тепловым сетям, соединяющим источник теплоты с потребителями. К тепловым сетям относят теплопроводы и сооружения на них - сетевые станции (подкачивающие, смесительные, дроссельные). СЦТ городов являются, как правило, водяными системами, где в качестве теплоносителя применяется вода.

Водяные системы теплоснабжения могут быть закрытыми и открытыми. В закрытых системах циркулирующая в тепловой сети вода используется только как теплоноситель, из сети для потребления она не отбирается; в открытых системах теплоноситель (вода) разбирается у потребителей для нужд горячего водоснабжения.

Для теплоснабжения городов от источников теплоты до данной группы потребителей, как правило, используются двухтрубные тепловые сети.

Назначение тепловых сетей - надежная, бесперебойная транспортировка теплоносителя при минимальных потерях теплоты и воды.

Использование теплоносителя (отпуск теплоты) осуществляется в теплоприемниках потребителей: в системах отопления, вентиляции, горячего водоснабжения. При отпуске теплоты потребителям осуществляется поддержание по заданному закону параметров нагреваемой среды.

В связи с возрастающей стоимостью электроэнергии тема данного проекта является актуальной.

## **1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПОДКАЧИВАЮЩЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ**

При описании технологической установки используются некоторые термины, являющиеся специфическими для данного типа установок:

Насос - гидравлическая машина, создающая напорное перемещение жидкости при сообщении ей энергии.

Насосный агрегат (НА) - совокупность насоса, электропривода и передаточного механизма (муфта, редуктор, шкив).

Насосная установка (НУ) - комплекс оборудования обеспечивающий требуемый режим работы насосов одного или нескольких насосных агрегатов.

НУ состоит из одного или нескольких насосных агрегатов, трубопроводов, запорной и регулирующей арматуры, контрольно-измерительной аппаратуры, а также аппаратуры управления и защиты.

Насосная станция (НС) - сооружение, включающее в себя одну или несколько насосных установок, а также вспомогательные системы и оборудование.

Насосные установки подразделяются на водопроводные, канализационные, мелиоративные, теплофикационные и др.

Теплофикационные насосные станции (тепловые пункты) предназначены для подачи потребителям горячей воды требуемых параметров.

### **1.1 Технический процесс подачи тепловой энергии**

Поставщиком тепловой энергии для города Бийск является ТЭЦ – 1 ОАО «Бийскэнерго». От ТЭЦ – 1 проложено четыре магистрали диаметром 300 -700 мм, по которым горячая вода подается на подкачивающие насосные станции. На насосных станциях установлены насосы, повышающие давление теплоносителя до рабочего (7,5-8 кгс/см<sup>2</sup>). Давление теплоносителя в магистралях варьируется от 5 - 6 кгс/см<sup>2</sup> во время пиковых нагрузок и до 9 кгс/см<sup>2</sup> в ночное время.

На рисунке 1.1 показана схема подкачивающей насосной станции ПНС – 2

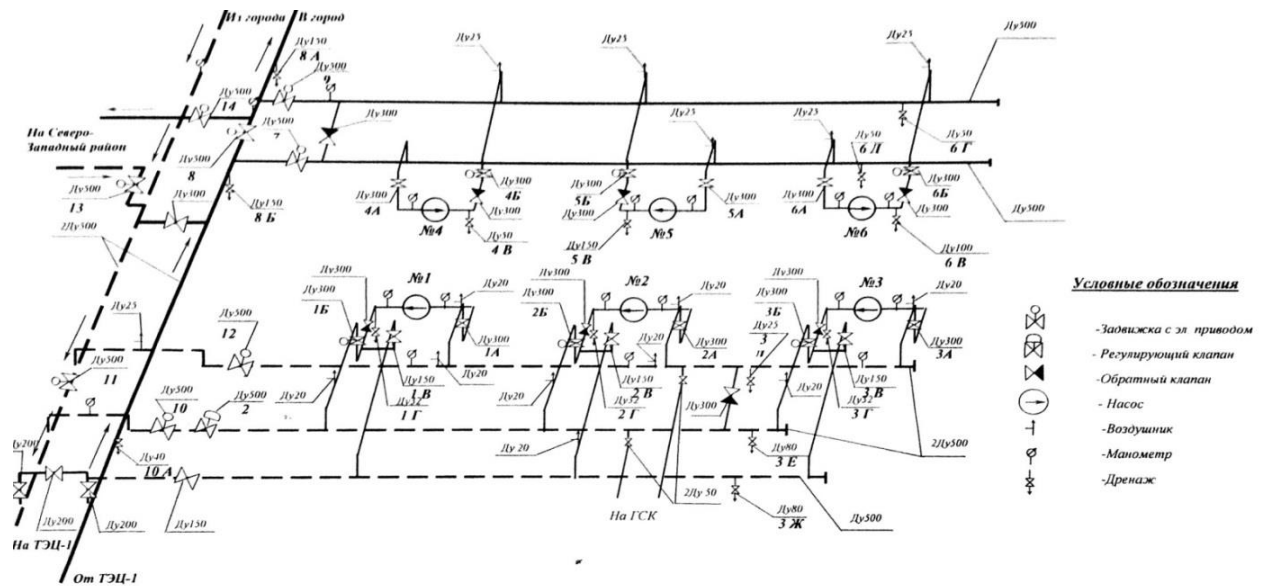


Рисунок 1.1 - Схема подкачивающей насосной станции ПНС – 2

## 1.2 Основное и вспомогательное оборудование

Подкачивающая насосная станция № 2 (ПНС-2) предназначена для повышения давления в прямом трубопроводе на центр города, Восточный и Северо-Западный районы и понижения давления в обратном трубопроводе перед ПНС, с целью увеличения располагаемого перепада у потребителей и пропускной способности городской тепломагистрали. Для этого на ПНС -2 установлено две группы насосов (Таблица 1.1 и Таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Насосы на обратном трубопроводе ПНС-2

| <b>№ с/н</b> | <b>Марка насоса</b> | <b>Произ в м<sup>3</sup></b> | <b>Напор М.в.ст</b> | <b>Мощн эл.двиг.,кВт</b> | <b>Число об.в мин</b> | <b>Марка Эл.двиг.</b> | <b>Диам раб.колеса</b> |
|--------------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1            | 300Д-90А            | 1260                         | 70                  | 400                      | 1480                  | ДАЗО-4-400            | 460                    |
| 2            | 300Д-90А            | 1260                         | 70                  | 400                      | 1480                  | ДАЗО-4-400            | 460                    |
| 3            | 300Д-90А            | 1260                         | 70                  | 400                      | 1480                  | А114-4                | 460                    |

Таблица 1.2 - Насосы на прямом трубопроводе ПНС-2

| <b>№ с/н</b> | <b>Марка насоса</b> | <b>Произ в м<sup>3</sup></b> | <b>Напор М.в.ст</b> | <b>Мощн эл.двиг.,кВт</b> | <b>Число об.в мин</b> | <b>Марка Эл.двиг.</b> | <b>Диам раб.колеса</b> |
|--------------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 4            | СЭ-1250             | 1250                         | 70                  | 315                      | 1480                  | ДАЗО-4-400            | 490                    |
| 5            | СЭ-1250             | 1250                         | 70                  | 320                      | 1480                  | А114-4                | 490                    |
| 6            | СЭ-1250             | 1250                         | 70                  | 250                      | 1480                  | А113-4                | 480                    |

Для производства оперативных переключений по включению или отключению насосов и коллекторов ПНС на подающем трубопроводе установлена следующая арматура:

- 1) № 7 – отключающая стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом, установленная на всасывающем коллекторе;
- 2) № 8 – секционная стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на перемычке между всасывающим и напорным коллекторами подающей магистрали;
- 3) № 9 – отключающая стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на напорном коллекторе;
- 4) № 1Г – обратный клапан стальной Ду – 500 для обеспечения циркуляции воды при остановке насосов ПНС прямого трубопровода;
- 5) №14 – отключающая стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на Северо-Западный район на напорном коллекторе.

Насосы прямого трубопровода оборудованы стальными задвижками Ду-300 - (4Б,5Б,6Б) с электроприводом на нагнетании и задвижками с ручным управлением на всасе (№4а, 5а, 6а).

На обратном трубопроводе:

- 1) № 10 – отключающая стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на напорном коллекторе трубопровода;
- 2) №11 – секционная стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на перемычке между всасывающим и напорным коллекторами обратной магистрали;
- 3) № 12 – отключающая стальная задвижка Ду – 500 с электроприводом на всасывающем коллекторе обратного трубопровода;
- 4) № 2 Г – обратный клапан стальной Ду – 500 для обеспечения циркуляции воды при остановке насосов ПНС обратного трубопровода;
- 5) № 13 - отключающая стальная задвижка Ду-500 с электроприводом на Северо-Западный район на обратном коллекторе;

6) РК –2 – стальной регулирующей клапан Ду – 500 для автоматического поддержания заданного давления в обратном трубопроводе центральной части города Восточного и Северо-Западного районов.

Насосы обратного трубопровода оборудованы стальными задвижками ДУ – 300 (№1Б, №2 Б, № 3Б) с электроприводами на нагнетание и задвижками с ручным управлением на всасе (№1А, 2А ,3А). Насосы прямого трубопровода оборудованы стальными задвижками Ду – 300 (№4Б,5Б, 6Б) с электроприводами на нагнетании и задвижками с ручным управлением на всасе (№ 4А, 5А, 6А).

Контроль за параметрами давления во всасывающих и нагнетательных коллекторах прямого и обратного трубопроводов, осуществляется электроконтактными манометрами (ЭКМ), контакты которых задействованы в схему технологической сигнализации ПНС. Пределы измерения ЭКМов:

- 1) Прямого трубопровода 0-25 кгс/см<sup>2</sup>;
- 2) Обратного трубопровода 0-16 кгс/см<sup>2</sup>.

Для контроля давления со стороны всасывающей и нагнетательной линий насосов установлены технические манометры (типа ОБМ – 160; МТП – 160; МПЧ – У и их модификации). Пределы измерения манометров:

- 1) Всас прямого трубопровода 0-16 кгс/см<sup>2</sup>;
- 2) Нагнетание прямого трубопровода 0-25 кгс/см<sup>2</sup>;
- 3) Обратного трубопровода 0-16 кгс/см<sup>2</sup>;
- 4) Нагнетание обратного трубопровода 0-16 кгс/см<sup>2</sup>.

Для автоматического поддерживания параметров давления на обратном трубопроводе установлен регулирующей клапан типа РК.

Управление приводами насосов и задвижек осуществляется из машинного зала со шкафов управления с № 1 по № 6. Соответствующих номерам насосов. А также с двух шкафов управления задвижками с №7 по №14.

Шкафы управления и сигнализации приводов насосов и задвижек, на лицевой стороне которых расположены:

- 1) Амперметры двигателей;
- 2) Ключи дистанционного управления (КУ) приводами насосов;

3) Кнопки управления приводами задвижек.

Под ключами и кнопками расположены по две лампы (зеленого и красного цвета), сигнализирующие положение выключателей и исправности цепей управления:

1) Красная лампа – привод включен; задвижка открыта;

2) Зеленая лампа привод отключен; задвижка закрыта.

В целях экономии электрической энергии и модернизации оборудования предлагается установить на насос прямой подачи ПНС – 2 автоматизированный электропривод выполненный по системы ПЧ – АД.

### **1.3 Описание насоса и его характеристики**

Насос типа 300Д90.

Насос разработан с учетом эксплуатации в условиях интенсивных нагрузок. Благодаря особой конструкции ротора, инженерам удалось добиться высокого КПД в сочетании с высокой сопротивляемостью ударным нагрузкам, возникающим при кавитации.

Насосы серии 300Д предназначены для перекачивания сред, близких по физико-химическим свойствам к воде с температурой не более +85°С. Количество механических примесей, содержащихся в среде, не должно превышать 0,05% (для серии «В» — 1%).

Привод ротора насоса 300Д90 осуществляется с помощью гибкой втулочно-пальцевой муфты, соединенной с электродвигателем. Электронасос имеет центробежную одноступенчатую конструкцию. Жидкость подводится с двух сторон. Для герметизации вала используется двойной сальник с гидравлическим уплотнением, надежно защищающий насос от протечек.

Внешний вид насоса представлен на рисунке 1.2., а его параметры в таблице 1.3.



Рисунок 1.2 – Внешний вид насоса типа 300Д90

Таблица 1.3 – Технические параметры насоса типа 300Д90

| Тип насоса | Q, м <sup>3</sup> /час | H, м | η, % | P, кВт | $\frac{J_{nc}}{c^2}$<br>$\frac{кг \cdot м}{с^2}$ |
|------------|------------------------|------|------|--------|--|
| 300Д90     | 1080                   | 70   | 88   | 315    | 9,2  |

Механические характеристики и габаритный чертеж представлены на рисунках 1.3 и 1.4.

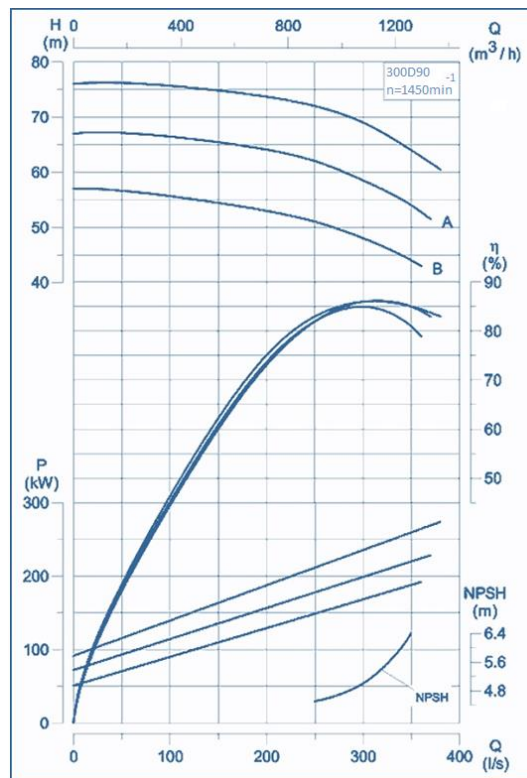


Рисунок 1.3 – Механические характеристики насоса 300Д90



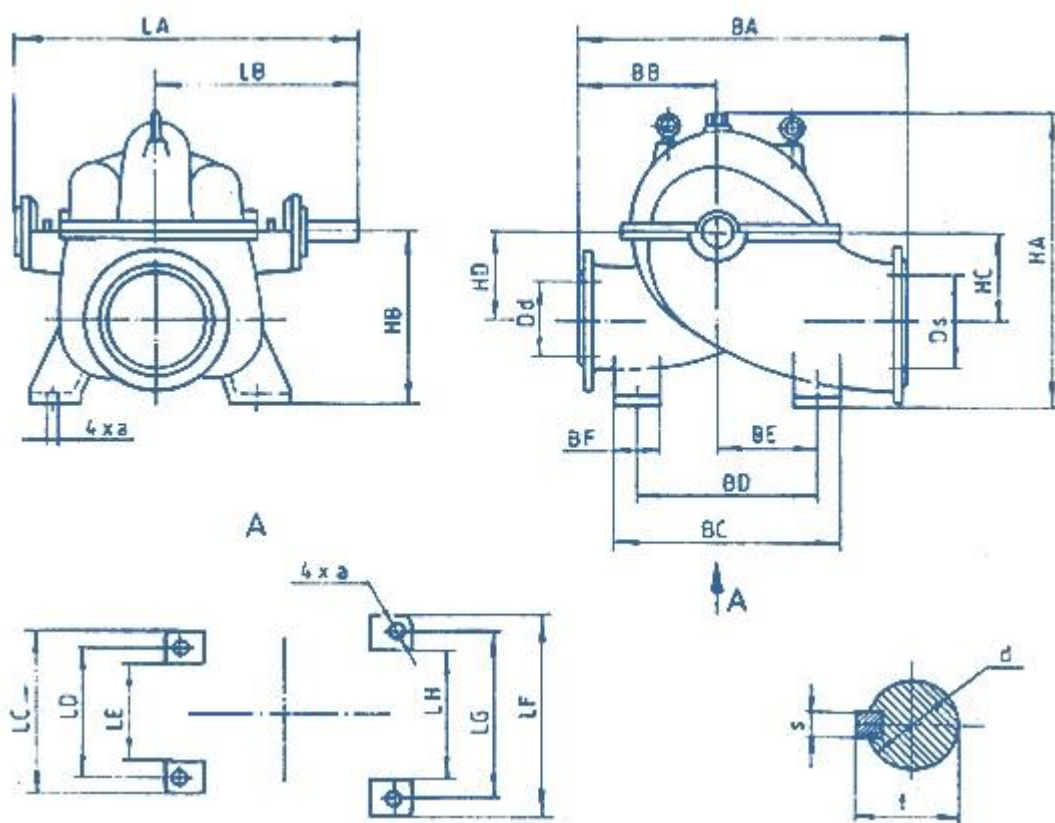


Рисунок 1.4 – Габаритный чертеж насоса 300Д90

## **2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПЧ-АД**

### **2.1 Расчет параметров и характеристик асинхронного электродвигателя**

В соответствии с техническими данными насоса, а также, согласно выбранной системы электропривода, предварительно выбираем трехфазный асинхронный двигатель АК4-400ХК-4УЗ.

#### **2.1.1 Паспортные данные электродвигателя**

Электродвигатели асинхронные трехфазные с короткозамкнутым ротором типа АК4 предназначены для привода механизмов, требующих регулирования частоты вращения, а также для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска. Двигатели предназначены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 6000 В.

Вид климатического исполнения – УЗ.

Номинальный режим работы - продолжительный S1.

Конструктивное исполнение двигателей - IM1001.

Способ охлаждения двигателей - IC01A61.

Степень защиты двигателей – IP54, коробки выводов - IP55.



Рисунок 2.1 – Внешний вид электродвигателя АК4-400ХК-4УЗ

Паспортные данные электродвигателя приведены в таблице 2.1

Таблица № 2.1 – Паспортные данные электродвигателя АК4-400ХК-4УЗ

| Тип двигателя | Номинальная мощность, кВт | Номинальная частота вращения, об/мин | Номинальный ток статора, А | КПД, % | cos φ, о.е | Номинальный ток ротора, А | Напряжение между кольцами фазного ротора, В | Номинальный вращающий момент, кНм | Маховый момент ротора, кгм |
|---------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------|------------|---------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------|
| АК4-400ХК-4УЗ | 400                       | 1500                                 | 47                         | 93,8   | 0,87       | 491                       | 510   | 2,5                               | 52                         |

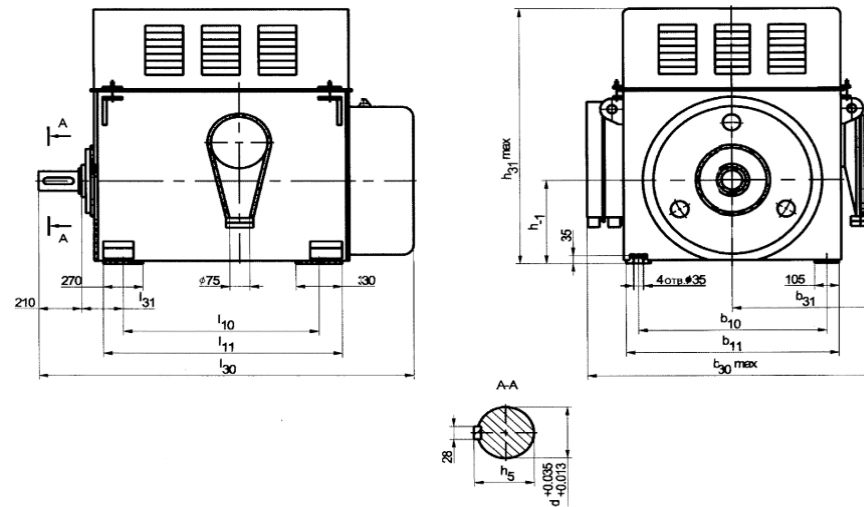


Рисунок 2.2 – габаритный чертеж электродвигателя АК4-400ХК-4УЗ

## 2.1.2 Расчет параметров электродвигателя

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна или несколько больше мощности на валу насоса во всех его возможных технологических режимах работы. В режиме регулирования производительности насоса.

Таблица 2.2 – Технические характеристики электродвигателя АК4-400ХК-4УЗ

| Типо-размер   | $n_0$ ,<br>об/мин | $U_{1н}$ ,<br>кВ | $P_{дв.н}$ ,<br>кВт | При номинальной нагрузке |                  |              | $s_K$ ,<br>% | $J_{дв}$ ,<br>кг·м <sup>2</sup> |
|---------------|-------------------|------------------|---------------------|--------------------------|------------------|--------------|--------------|---------------------------------|
|               |                   |                  |                     | $s_H$ , %                | $\cos \varphi_H$ | $\eta_H$ , % |              |                                 |
| АК4-400ХК-4УЗ | 1500              | 6                | 400                 | 1,6                      | 0,87             | 0,938        | 0,094        | 9,2                             |

Продолжение таблицы 2.2

|                                 |                              |                             |                                     |                |
|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| $m_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$ | $m_K = \frac{M_{макс}}{M_H}$ | $m_M = \frac{M_{мин}}{M_H}$ | $k_{i_{дв}} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$ | Степень защиты |
| 2,2                             | 2,5                          | 2,8                         | 7                                   | IP54           |

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{157,08 - 154,566}{157,08} = 1,6\%$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$\omega_{двн} = \left(1 - \frac{s_n}{100}\right) \cdot \omega_0 = \left(1 - \frac{1,6}{100}\right) \cdot 157,08 = 154,566 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{двн} = \frac{P_H \cdot 1000}{\omega_{дв.}} = \frac{400000}{154,566} = 2588 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определим кратность максимального и пускового момента двигателя

$$m_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{7246,4}{2588} = 2,8;$$

$$m_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{5693,6}{2588} = 2,2$$

и кратность пускового тока

$$k_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{1н}} = \frac{330,169}{47,167} = 7$$

### 2.1.3 Определение параметров схемы замещения электродвигателя по каталожным данным

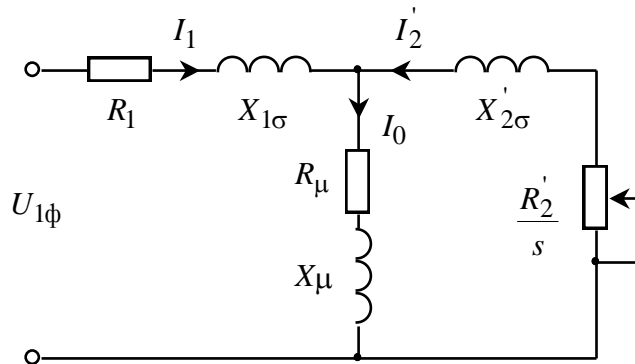


Рисунок 2.3 - Схема замещения асинхронного двигателя

Параметры схемы замещения определим по методике, изложенной в [12]

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( p^* \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-s_n}{1-p^* \cdot s_n} \right)^2}{1 - \left( p^* \cdot \frac{1-s_n}{1-p^* \cdot s_n} \right)^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{36,639^2 - \left( 0,75 \cdot 47,167 \cdot \frac{1-0,016}{1-0,75 \cdot 0,016} \right)^2}{1 - \left( 0,75 \cdot \frac{1-0,016}{1-0,75 \cdot 0,016} \right)^2}} = 15,123 \text{ A}$$

Где

$$I_{1H} = \frac{P_H \cdot 1000}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{400000}{3 \cdot 3464 \cdot 0,87 \cdot 0,938} = 47,167 \text{ А - номинальный ток статора;}$$

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_z \cdot \eta_z} = \frac{400000 \cdot 0,75}{3 \cdot 3464 \cdot 0,84 \cdot 0,938} = 36,639 \text{ А. - ток фазы статора при}$$

частичной нагрузке;

где

$p^*$  – коэффициент загрузки двигателя, принимаем  $p^* = 0,75$ ;

$\eta_{p^*}$  – КПД при частичной нагрузке, принимаем  $\eta_{p^*} = \eta_H$ .

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, принимаем согласно:

$$\cos \varphi_z = 0,84 + \Delta \cos \varphi_z = 0,84.$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{овн}} \cdot c_1^2 \cdot \left( \beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 3464^2 \cdot (1 - 0,016)}{2 \cdot 2,8 \cdot 400000 \cdot 1,023^2 \cdot \left( 1,55 + \frac{1}{0,096} \right)} = 1,265 \text{ Ом.}$$

Где

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{15,123}{2 \cdot 7 \cdot 47,167} = 1,023 \text{ - Коэффициент характеризующий}$$

Критическое скольжение

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_M + \sqrt{k_M^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1)} =$$
$$= 0,016 \cdot \frac{2,8 + \sqrt{2,8^2 - (1 - 2 \cdot 0,016 \cdot 1,55 \cdot (2,8 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,016 \cdot 1,55 \cdot (2,8 - 1)} = 0,096.$$

где  $\beta$  – коэффициент, значение которого находится в диапазоне 0,6–2,5, принимаем  $\beta = 1,55$ .

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению

$$R_1 = c_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,023 \cdot 1,265 \cdot 1,55 = 2,005 \text{ Ом.}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволит найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_k$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,096^2}\right) - 1,55^2} = 10,286,$$

тогда

$$X_k = \gamma \cdot c_1 \cdot R_2' = 10,286 \cdot 1,023 \cdot 1,265 = 13,304 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_k = 0,42 \cdot 13,304 = 5,588 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{5,588}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,018 \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано

$$X_{2\sigma}' = \frac{0,58 \cdot X_k}{c_1} = \frac{0,58 \cdot 13,304}{1,023} = 7,544 \text{ Ом}$$

Индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{7,544}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,024 \text{ Гн}.$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания  $E_1$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1H} \cdot R_1)^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - I_{1H} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(3464 \cdot 0,87 - 47,167 \cdot 2,005)^2 + (3464 \cdot \sqrt{1 - 0,87^2} - 47,167 \cdot 5,588)^2} = 3257 \text{ В}. \end{aligned}$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{3257}{15,123} = 215,364 \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{215,364}{2\pi \cdot 50} = 0,686 \text{ Гн.}$$

### Проверка адекватности расчетных параметров двигателя

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

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

$$= \frac{3 \cdot 3464^2 \cdot 1,265}{157,08 \cdot 0,016 \left( 13,304^2 + \left[ \left( 2,005 + \frac{1,265}{0,016} \right)^2 + \left( 2,005 + \frac{1,265^2}{0,016 \cdot 215,364} \right)^2 \right] \right)} = 2685 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2}, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,686}{(0,686 + 0,024)} \cdot 14,67 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{47,167^2 - 15,123^2} = 2685 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 15,123 \cdot 0,686 = 14,67 \text{ Вб}$$

**Должны выполняться условия:**

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}} = 2588 < 2685 \leq 2846,8;$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} \approx M_{\text{эм.н}}^*; 2685 \approx 2685.$$

По результатам расчета эти условия выполняются [17].

Рассчитанные параметры схемы замещения сведены в таблице 2.3.



Таблица 2.3 – Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

| $R_1$ , | $X_{1\sigma}$ , | $L_{1\sigma}$ , | $R_2'$ , | $X_{2\sigma}'$ , | $L_{2\sigma}'$ , | $X_\mu$ , | $X_k$ , | $L_\mu$ , |
|---------|-----------------|-----------------|----------|------------------|------------------|-----------|---------|-----------|
| Ом      | Ом              | Гн              | Ом       | Ом               | Гн               | Ом        | Ом      | Гн        |
| 2,005   | 5,588           | 0,018           | 1.265    | 7,544            | 0,024            | 215,364   | 13,304  | 0,68553   |

## 2.2 Расчёт естественных характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя рассчитывается по выражениям:

$$M(S, f_1) = \frac{3 \cdot \left[ U_{1\phi H}^2 \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot S \cdot \left[ \left( X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]}$$

$$\omega(s, f) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s).$$

где  $M$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

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

$$= \frac{3 \cdot 3464^2 \cdot 1,256}{157,08 \cdot 1,6 \cdot \left[ 13,304^2 + \left( 2,005 + \frac{1,256}{1,6} \right)^2 + \left( \frac{1,256 \cdot 2,005}{1,6 \cdot 215,364} \right)^2 \right]} = 3583 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_K = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2}{R_1^2 + (X_{KH})^2}} = 2,005 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{2,005}{215,364}\right)^2}{2,005^2 + (13,304)^2}} = 0,094$$

$$M_{\text{эм.к}}(s_H) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{KH}^2) \cdot \left[ 1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2 \right]} \right\}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 3464^2}{2 \cdot 157,08 \cdot \left( 2,005 + \sqrt{(2,005^2 + 13,304^2) \cdot \left( 1 + \frac{2,005^2}{215,364} \right)} \right)} = 7412 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

При помощи программы Mathcad строим естественную механическую характеристику:

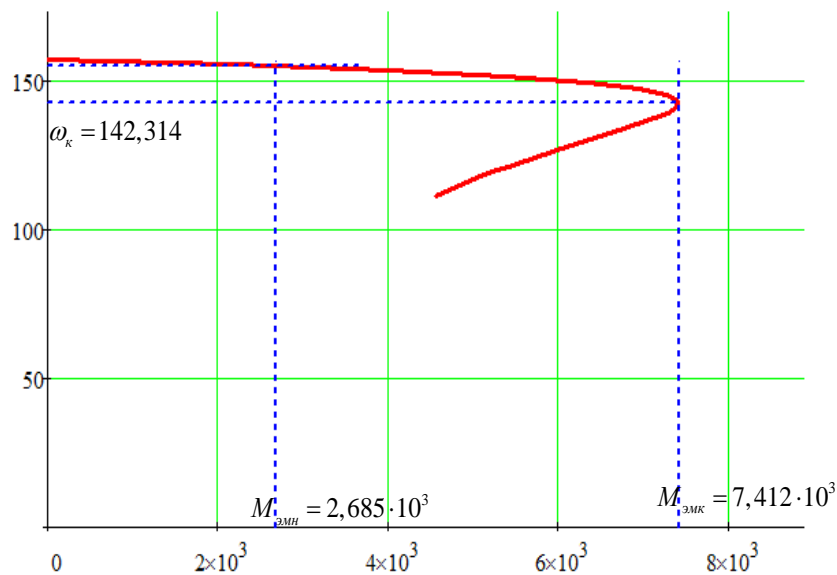


Рисунок 2.4 - Естественная механическая характеристика электродвигателя

АК4-400ХК-4УЗ

По полученным результатам определяем:

– кратность пускового момента

$$m_n = \frac{M_{\text{эм.к}}}{M_{\text{эм.н}}} = \frac{7,246}{2,685} = 2,3;$$

– кратность максимального (критического) момента

$$m_{\kappa} = \frac{M_{\text{эмк}}}{M_{\text{эмн}}} = \frac{7,412}{2,685} = 2,8;$$

– критическое скольжение

$$s_{\kappa} = \frac{\omega_0 - \omega_{\kappa}}{\omega_0} = \frac{157,08 - 142,314}{157,08} = 0,094$$

Естественные электромеханические характеристики двигателя  $I_1(s, f_1)$  и  $I_2'(s, f_1)$  рассчитываются по выражениям:

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

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

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

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

$$\omega(s, f) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s).$$

По результатам расчета на рисунке 9 построены естественные электромеханические характеристики  $\omega(I_1)$ ,  $\omega(I_2')$  при  $f_1 = f_{1H} = 50$  Гц.

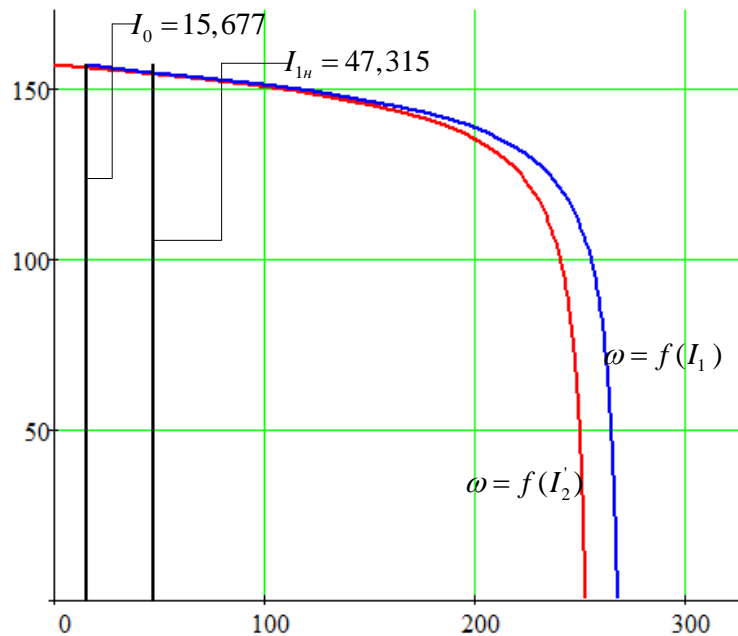


Рисунок 2.5 - Естественная электромеханическая характеристика электродвигателя типа АК4-400ХК-4УЗ

По результатам расчета электромеханической характеристики  $\omega(I_1)$  найдены значения тока холостого хода (намагничивания)  $I_0 = 15,677$  А, номинального тока  $I_{1н} = 47,315$  А и пускового тока двигателя  $I_{п} = 268,06$  А.

По полученным результатам определяем кратность пускового тока

$$k_i = \frac{I_{п}}{I_{н}} = \frac{268,06}{47,315} = 5,66.$$

Параметры расчетных механической и электромеханической характеристик двигателя оказались близки к справочным параметрам двигателя.

### 2.3 Расчет механических и электромеханических характеристик электропривода

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется следующим выражением:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu\text{н}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 3464^2 \cdot f_{1*}^2 \cdot 1,265}{\omega_{0j} \cdot 1,6 \cdot \left[ 13,304^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( 2,005 + \frac{1,265}{1,6} \right)^2 + \left( \frac{2,005 \cdot 1,265}{1,6 \cdot 214,364 \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;

$\omega_{0j}$  – синхронная частота вращения двигателя;

$f_{1*} = f_{1j} / f_{1\text{н}}$  – относительное значение частоты питающего напряжения.

Механические характеристики двигателя при частотном управлении приведены на рисунке 2.6

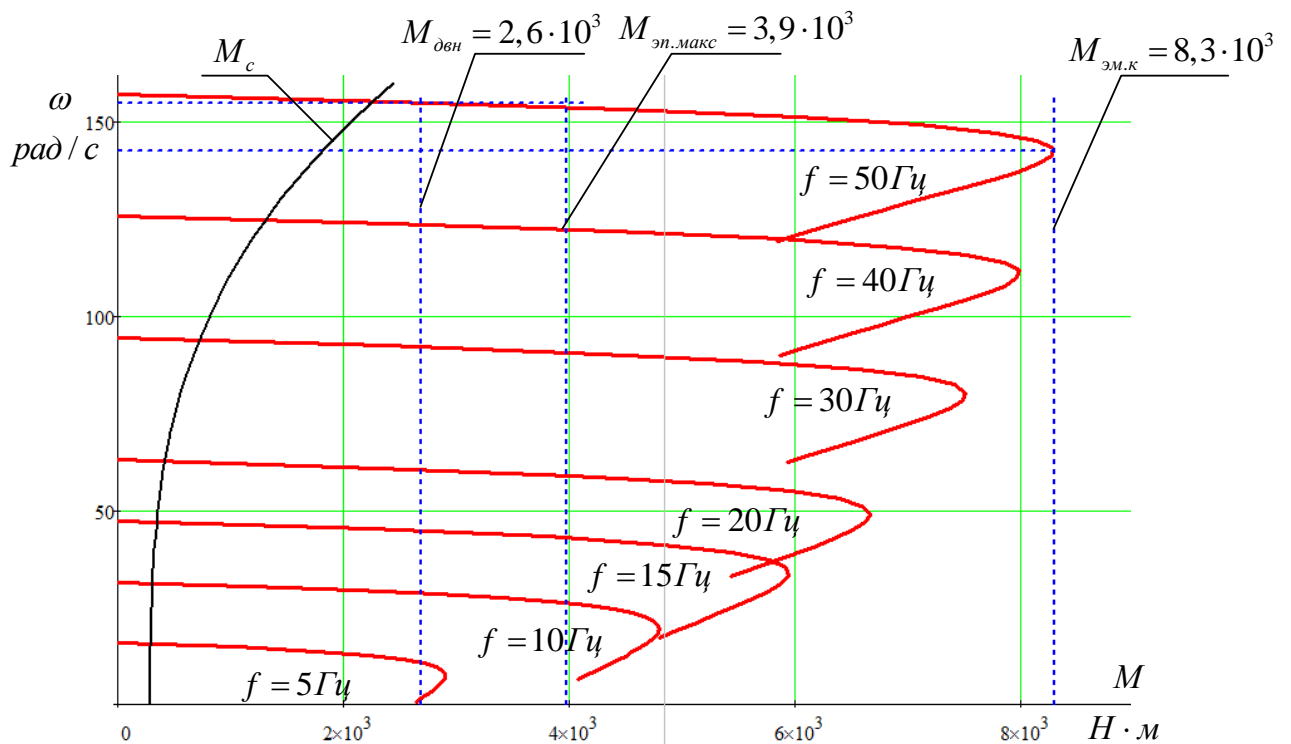


Рисунок 2.6 - Механические характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель.

Выражение для расчета электромеханических характеристик, определяющих зависимость приведенного тока ротора от скольжения  $s$  при законе управления  $U/f = \text{const}$ ,

$$I_2'(s) = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu\text{н}} \cdot f_{1*}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220 \cdot f_{1*}}{\pm \sqrt{(2,005 + 1,265/1,6)^2 + 13,304^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{2,005 \cdot 1,265}{1,6 \cdot 215,364 \cdot f_{1*}}\right)^2}}.$$

Расчетное выражение для электромеханических характеристик  $I_1 = f(s)$ , отражающих зависимость тока статора  $I_1$  от скольжения

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} =$$

$$= \sqrt{15,123^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot 15,123 \cdot I_2' \cdot \sin \phi_2(s)},$$

где

$$\sin \phi_2 = \frac{x_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}} = \frac{215,364 \cdot f_{1*}}{\sqrt{(2,005 + 1,265/1,6)^2 + 13,304^2 \cdot f_{1*}^2}};$$

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (x_{1\text{н}} + x_{\mu\text{н}})^2 \cdot f_{1*}^2}}.$$

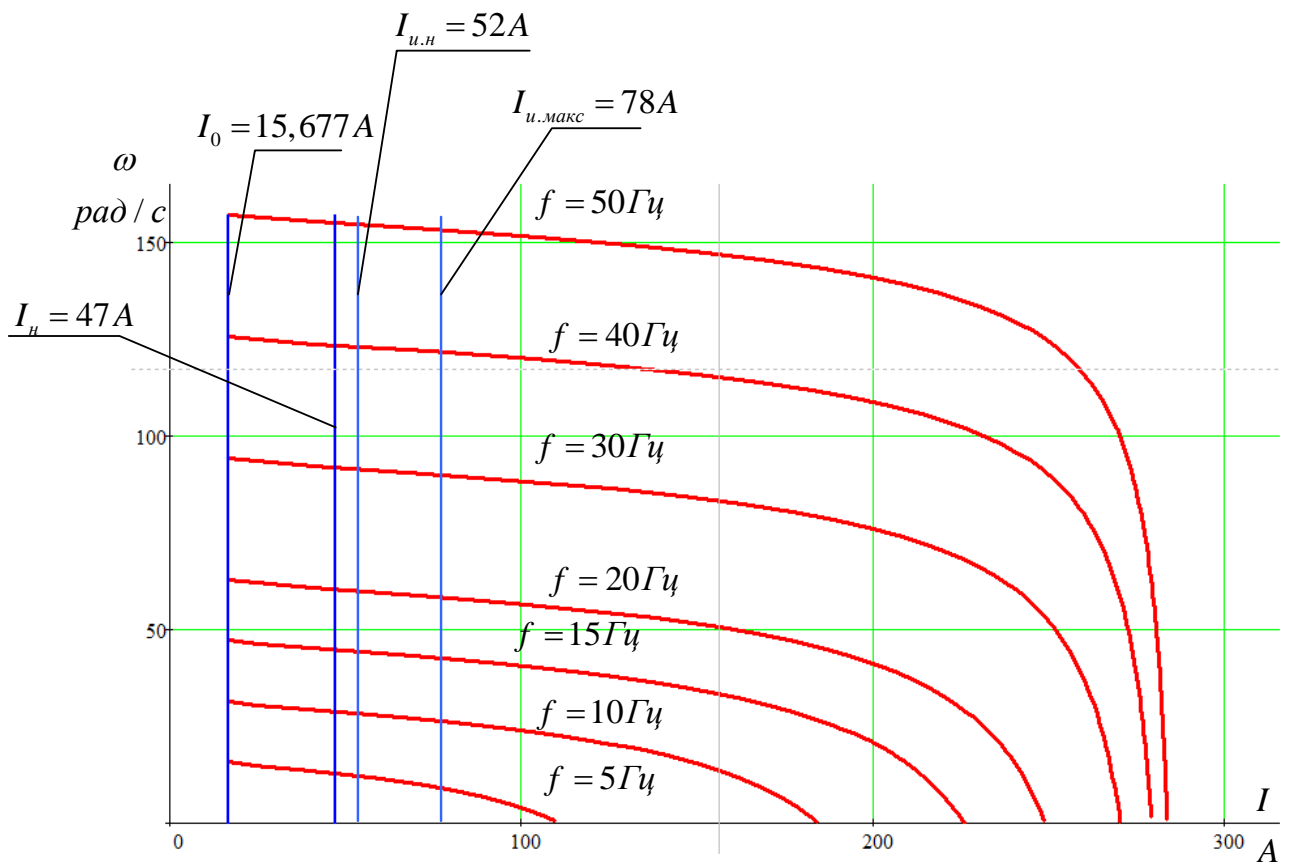


Рисунок 2.7 - Электромеханические характеристики  $I_2'(s)$

разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

## 2.4 Определение возможных вариантов и обоснование выбора вида преобразователя электрической энергии

Преимущества использования частотных преобразователей. Плавная регулировка скорости вращения электродвигателя позволяет в большинстве случаев отказаться от использования редукторов, дросселей и другой регулирующей аппаратуры. Это значительно упрощает механическую систему, повышает ее надежность и снижает эксплуатационные расходы.

При использовании частотного преобразователя пуск двигателя происходит плавно, без пусковых токов и ударов, что уменьшает нагрузку на двигатель и механику, увеличивает срок их жизни. Применение частотных преобразователей с обратной связью обеспечивает точное поддержание скорости

вращения при переменной нагрузке, что во многих задачах позволяет значительно улучшить качество технологического процесса [10].

Для питающей сети преобразователь является чисто активной нагрузкой и потребляет ровно столько энергии, сколько требуется для выполнения механической работы (с учетом КПД преобразователя и двигателя).

## 2.5 Выбор преобразователя частоты

Преобразователь частоты выбирается из условий:

$$P_{\text{дв}} \leq P_{\text{ПЧ}}; I_{\text{дв}} \leq I_{\text{ПЧ}}$$

Для двигателя мощностью  $P_{\text{дв}} = 400 \text{ кВт}$  и номинальным током  $I_{\text{ном}} = 47,167 \text{ А}$  выбираем преобразователь частоты серии : ATV1200-A570-6060 фирмы Altivar, имеющий следующие параметры представленные в таблице 2.4:



Таблица 2.4 – Паспортные данные преобразователя частоты

| Условное обозначение преобразователя частоты | Полная <b>Ошибка!</b> | Расчетная мощность двигателя, кВт | Максимальный ток в установившемся режиме, А |                 | номинальный ток инверторной ячейки, А | Количество <b>Ошибка!</b> ячеек | Максимальный ток в переходном режиме 60 с., А |
|--|-----------------------|-----------------------------------|---|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------|---|
|  |                       |                                   | Перегрузка 120%                             | Перегрузка 150% |                                       |                                 |   |
| ATV1200-A<br>570–6060                        | 570                   | 477                               | 55  | 44              | 65                                    | 15                              | 66  |



Рисунок 2.8 - Внешний вид преобразователя частоты Altivar 1200

Преобразователь частоты среднего напряжения Altivar 1200 обладает высокой надежностью, но в то же время прост в эксплуатации и обслуживании. Преобразователь частоты Altivar 1200 предназначен для управления трехфазными асинхронными и синхронными двигателями с номинальным напряжением от 2.4 до 11 кВ. Для асинхронных двигателей применимы скалярный (U/f) и векторный законы управления (векторное управление потоком в разомкнутой или замкнутой системе), для синхронных двигателей - только скалярный (U/f) закон управления. Благодаря использованию последнего поколения IGBT-транзисторов, преобразователь частоты Altivar 1200 удовлетворяет самым жестким требованиям по поддержанию заданной частоты вращения привода.

## **Конструктивные особенности**

### Компактность

Благодаря размещению преобразователя частоты в одном шкафу, его габаритные размеры на 30% меньше по сравнению со стандартной компоновкой преобразователей частоты среднего напряжения.

Преобразователь частоты одностороннего обслуживания, что позволяет устанавливать его вплотную к конструкциям и значительно облегчает доступ к секции управления, трансформатору и инверторным ячейкам.

Сертифицированный шкаф со степенями защиты IP31, IP41 и IP42. Степень защиты обеспечивается с учетом расположенных на крыше шкафа вентиляторов охлаждения.

### Базовая комплектация

Преобразователь частоты ATV1200 в любом варианте исполнения комплектуется:

- Элементы защиты: система механической блокировки дверей (исполнение может корректироваться в зависимости от требований заказчика), двери шкафа открываются специальными ключами, все двери оснащены концевыми выключателями

- Интерфейс: 10-дюймовая жидкокристаллическая панель оператора, программное обеспечение для конфигурирования преобразователя частоты, свободно программируемые входы/выходы

- Надежность: все преобразователи оснащаются источниками бесперебойного питания

- Преобразователи частоты имеют маркировку CE соответствия европейским директивам ЭМС (2004/108/EC) и LVD (2006/95/EC)

Базовая комплектация

Преобразователь частоты ATV1200 в любом варианте исполнения комплектуется:

Элементы защиты: система механической блокировки дверей (исполнение может корректироваться в зависимости от требований заказчика), двери шкафа открываются специальными ключами, все двери оснащены концевыми выключателями.

Интерфейс: 10-дюймовая жидкокристаллическая панель оператора, программное обеспечение для конфигурирования преобразователя частоты, свободно программируемые входы/выходы.

Надежность: все преобразователи оснащаются источниками бесперебойного питания.

Преобразователи частоты имеют маркировку CE соответствия европейским директивами (2004/108/EC) и LVD (2006/95/EC).

## **Проверенное конструктивное решение**

### *Многоуровневая технология*

Топология преобразователя частоты позволяет использовать его для управления уже установленными двигателями стандартного исполнения без применения дополнительного согласующего оборудования, что обеспечивает быстрый возврат инвестиций.

Снижение затрат на внедрение преобразователя частоты и эксплуатацию

Многоуровневая технология позволяет получить практически синусоидальную кривую тока и обеспечить  $\text{THDI} < 2\%$ , что удовлетворяет требованиям международных и российских стандартов.

Качество напряжения на выходе преобразователя частоты позволяет управлять двигателями, не имеющими специального исполнения и усиленной изоляции.

Предельно допустимая длина кабеля между преобразователем и двигателем - 2000 м.

Отсутствуют специальные требования к кабелю между преобразователем и двигателем.

Благодаря низкому  $du/dt$  и малому шагу формирования кривой напряжения увеличивается срок службы двигателей.

#### Эффективная система охлаждения

Профессионально спроектированная система распределения потоков охлаждающего воздуха позволила отказаться от дополнительных вентиляторов охлаждения трансформаторов, устанавливаемых обычно в нижней части секции трансформатора, и от дополнительных вентиляторов секции управления.

Отсутствие вентиляторов охлаждения трансформатора позволяет увеличить КПД преобразователя частоты (до 0.3%) и облегчает расчет фактической экономии электроэнергии.

#### Топология инвертора

Формирование кривой выходного напряжения осуществляется последовательным соединением двухуровневых инверторных ячеек, созданных на низковольтных IGBT-транзисторах, обладающих высокой надежностью и широко используемых в промышленности. Благодаря модульной конструкции замена ячейки инвертора занимает несколько минут.

#### Охлаждение секции управления

Конструкция секции управления не требует установки дополнительных вентиляторов. Охлаждение элементов секции осуществляется потоком воздуха общей системы охлаждения. Примененное конструкторское решение

увеличивает надежность работы преобразователя частоты. Подробные характеристики преобразователя частоты изложены в приложении А.

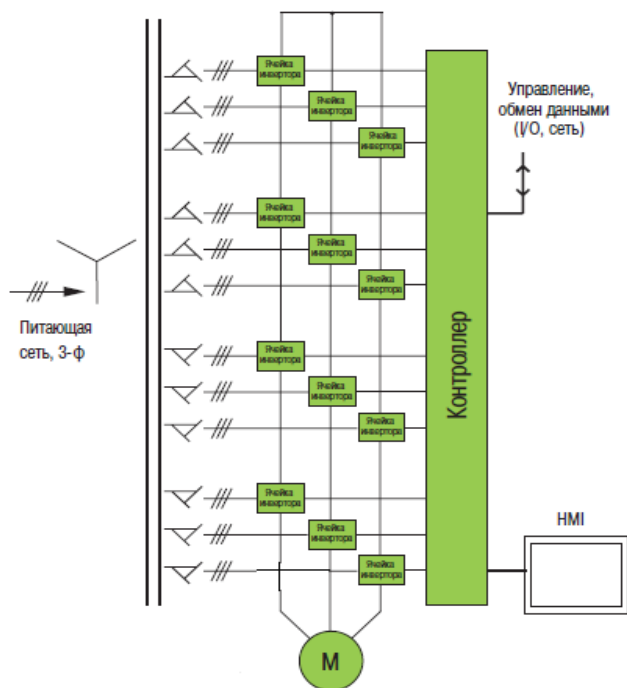


Рисунок 2.9 - Топология преобразователя частоты ATV1200

## 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СО СКАЛЯРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### 3.1 Разработка имитационных моделей электропривода со скалярным управлением

На рисунок 3.1 приведена функциональная схема реализации асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярным управлением без датчика скорости. Основными функциональными элементами регулируемого асинхронного электропривода с частотным скалярным управлением являются:

- преобразователь частоты;
- блок управления преобразователем, включающий в себя формирователь 3-фазной системы управляющих напряжений  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$  и  $u_{1c}$ , формирователь 6-канального ШИМ-сигнала и блок драйверов;
- формирователь  $\frac{U}{f}$  - характеристики;
- датчики в общем случае линейного тока двигателя;
- блок расчета фактического значения действующего фазного тока двигателя;
- элемент сравнения допустимого максимального и фактического значения действующего фазного тока двигателя и регулятор ограничения тока;
- блок компенсации скольжения;
- блок коррекции управления напряжением инвертора в функции фактического значения напряжения звена постоянного тока  $U_d$  преобразователя [11].

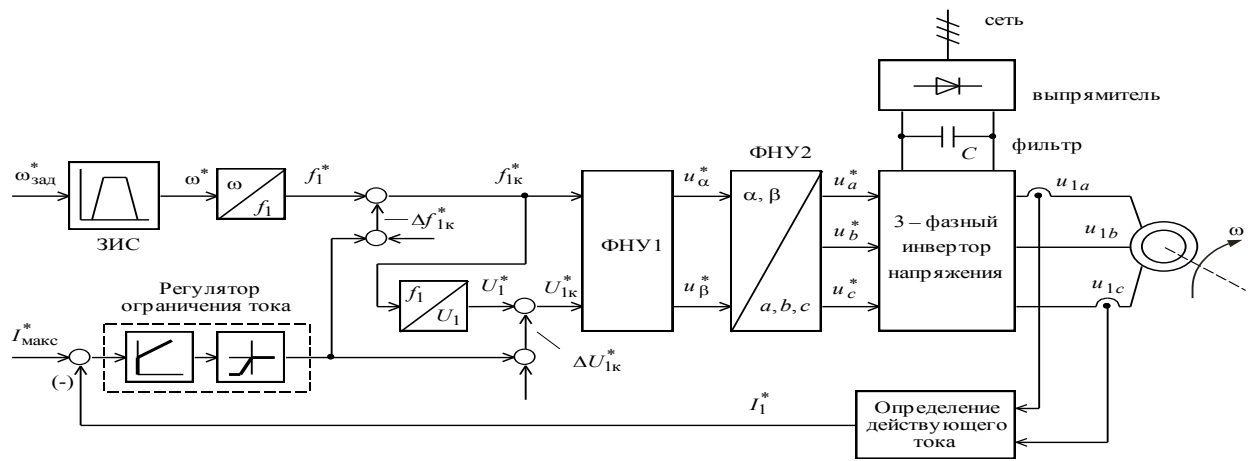


Рисунок 3.1 – Функциональная схема асинхронного электропривода со скалярным частотным управлением без датчика скорости

В функциональной схеме асинхронного электропривода со скалярным управлением используются следующие варианты реализации моделей:

- Имитационная модель электрической части силового канала насоса системы преобразователь частоты синхронного электродвигателя рисунок 3.2
- Имитационная модель механической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с насосной нагрузкой рисунок 3.3;
- Имитационная модель электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат рисунок 3.4
- имитационная модель блока одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера рисунок 3.5;
- имитационная модели задатчика интенсивности с S-образной выходной характеристикой представлена на рисунке 3.6
- модель задание на силовой канал системы преобразователь частоты асинхронного электродвигателя рисунок 3.7.

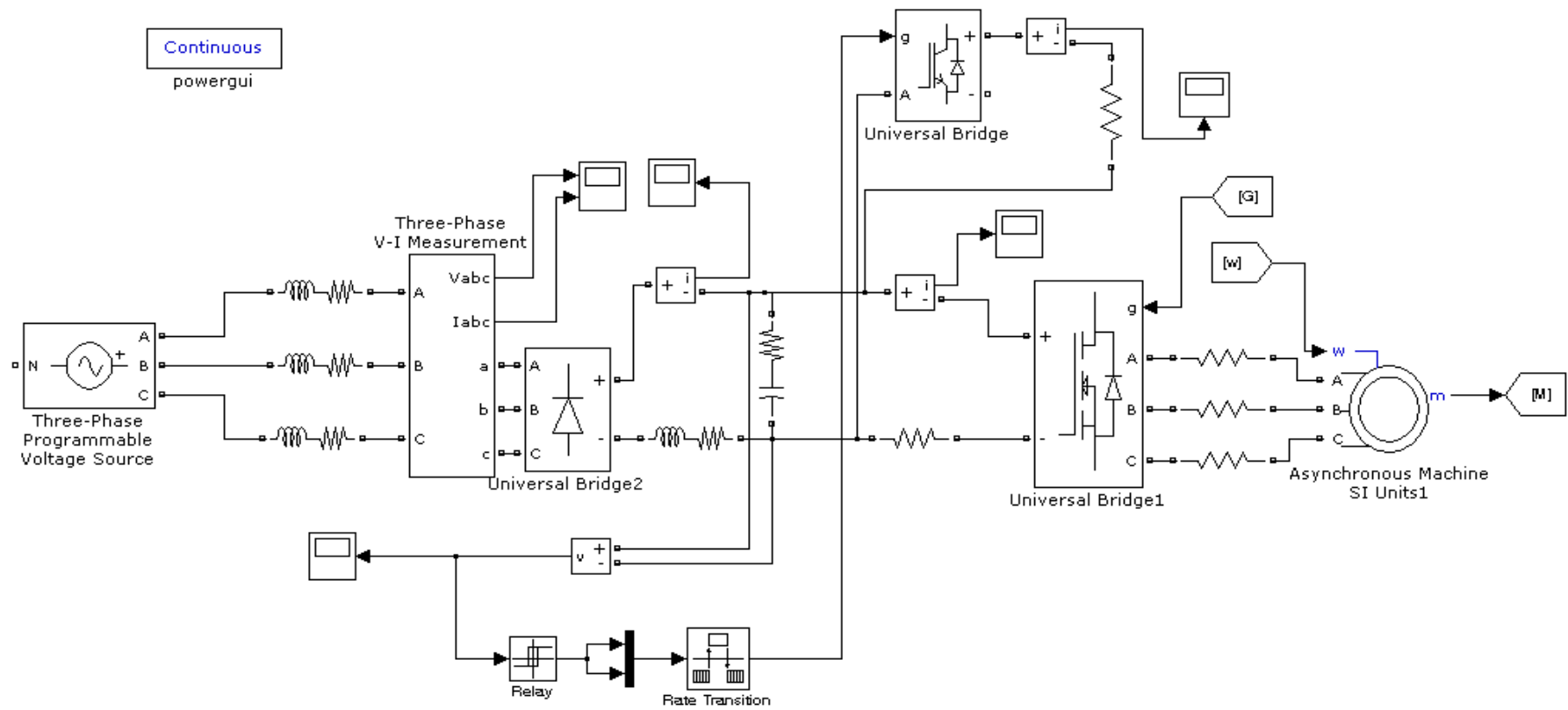


Рисунок 3.2 – Имитационная модель электрической части силового канала насоса системы преобразователь частоты синхронного электродвигателя



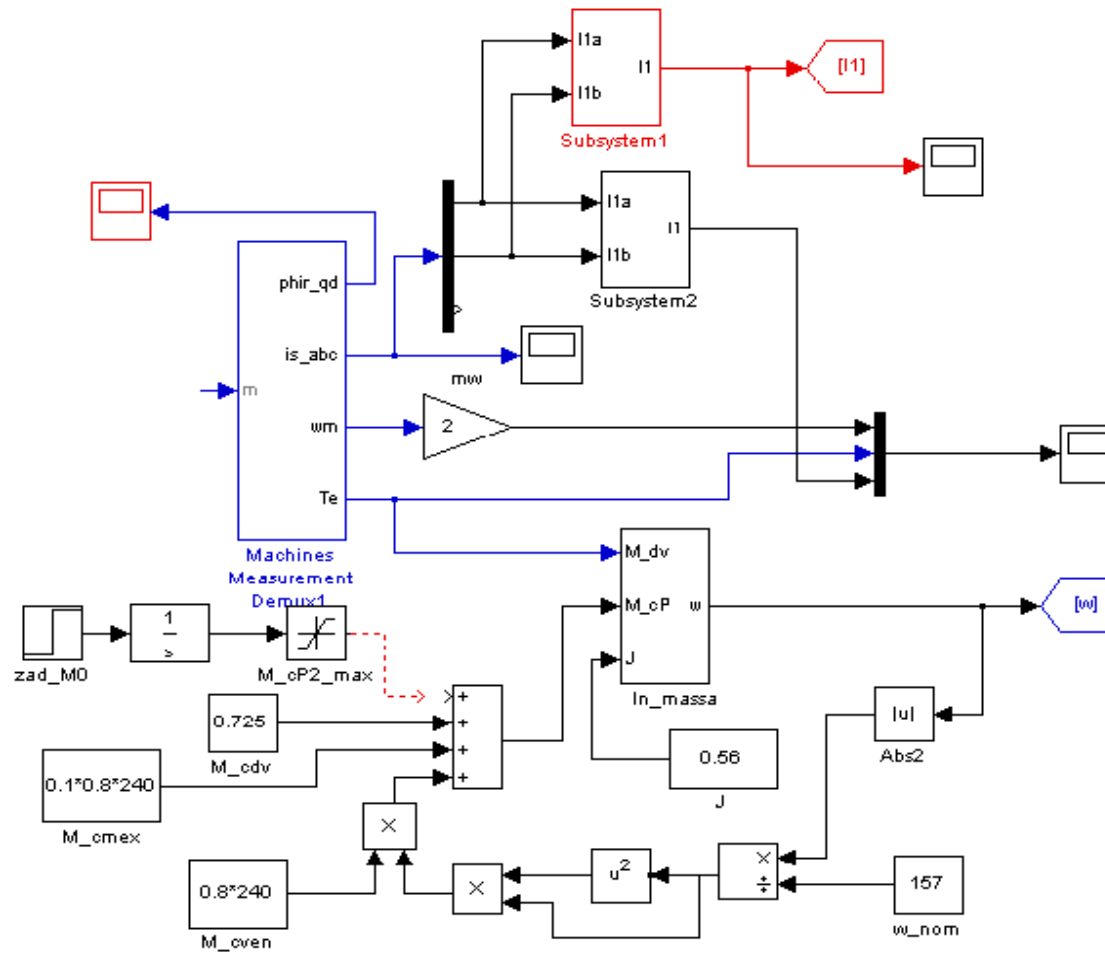


Рисунок 3.3 – Имитационная модель механической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с насосной нагрузкой.

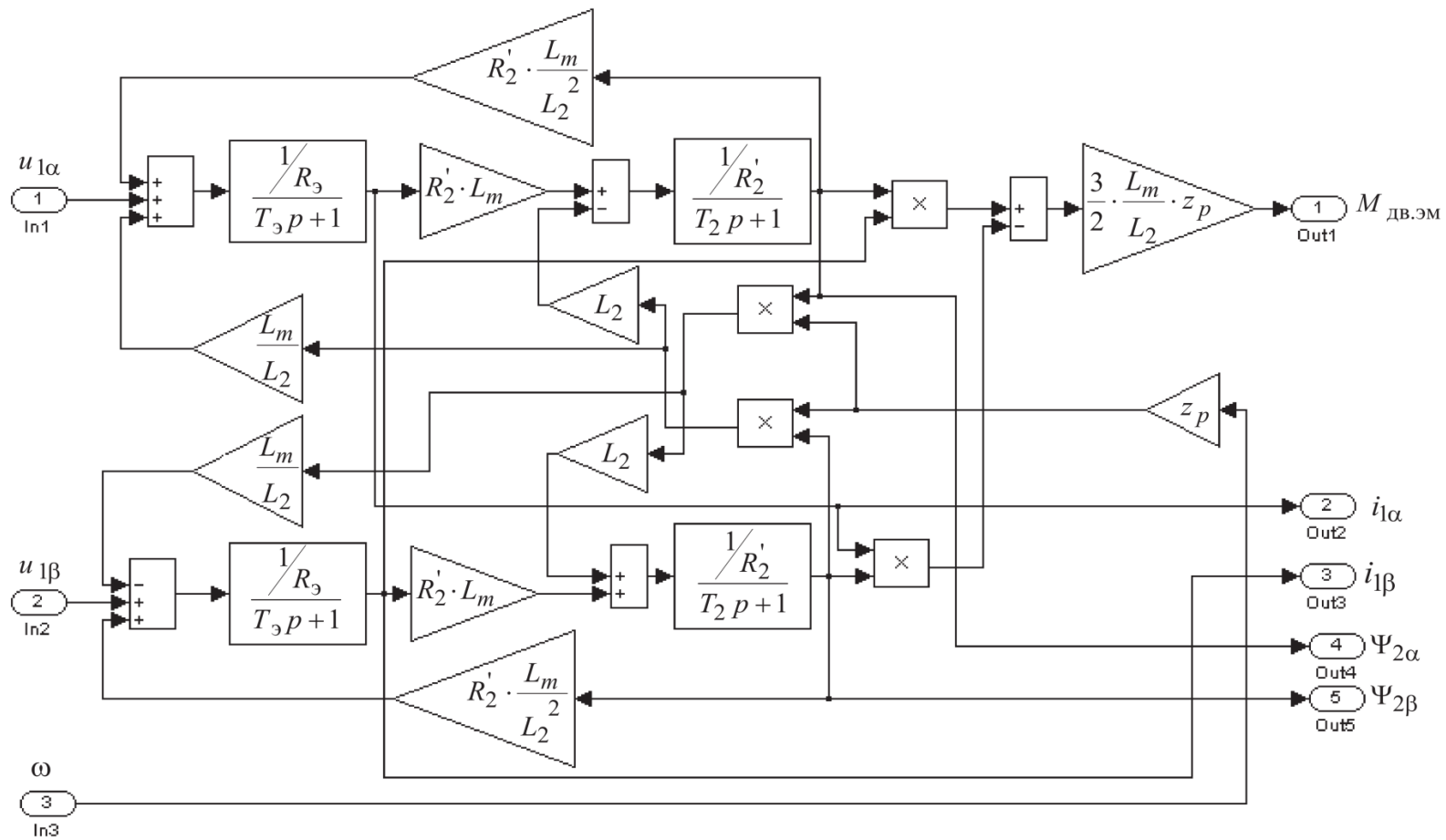


Рисунок 3.4 - Имитационная модель электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат

### 3.1.1 Одномассовая механическая система с реактивной нагрузкой

Имитационная модель блока одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера, используемая при моделировании систем электропривода, представлена на рисунке 3.5

На схеме рисунка 3.5 приняты следующие дополнительные обозначения:

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

$M_{ср}$  – приведенный к валу двигателя статический момент реактивного характера, Н·м;

$J_э$  – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции движущихся масс, кг·м<sup>2</sup>;

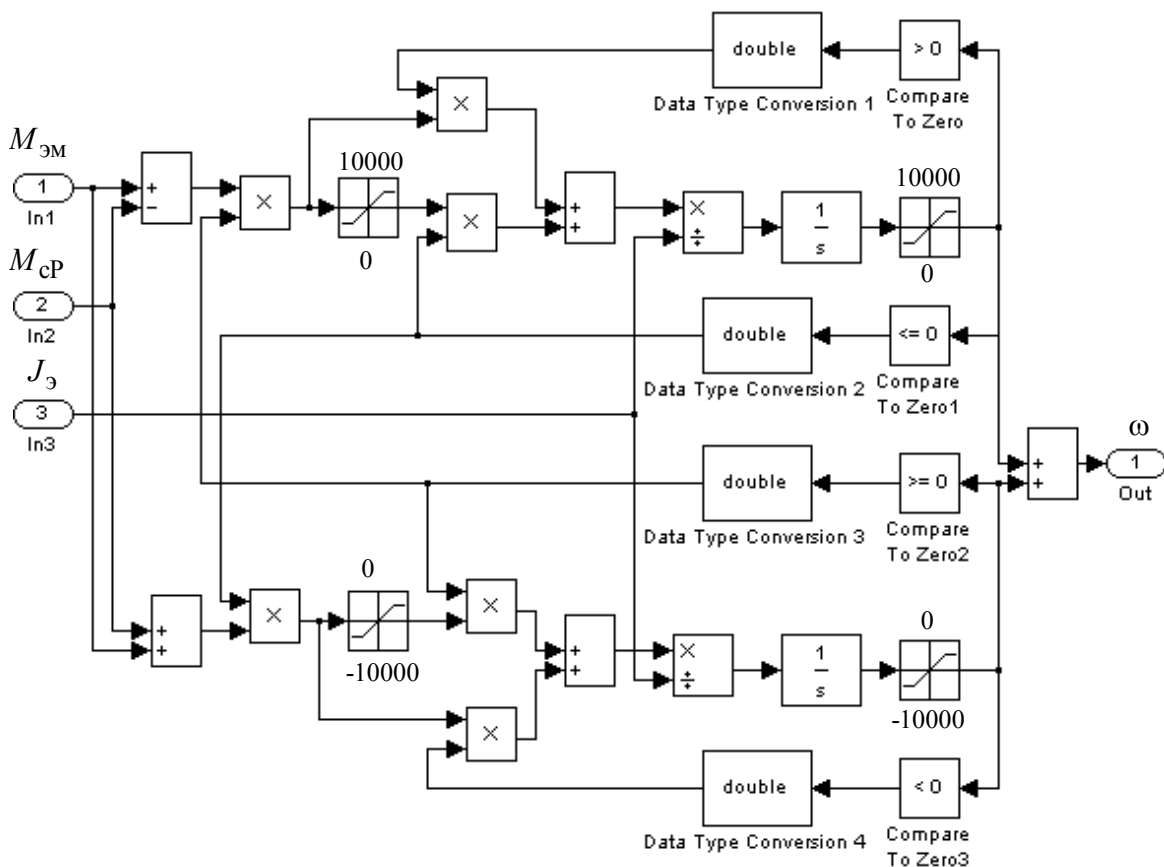


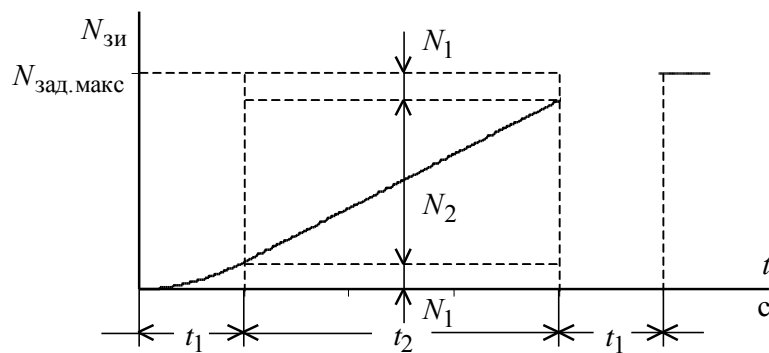
Рисунок 3.5 – Имитационная модель блока одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

### 3.1.2 Имитационная модель задатчика интенсивности с S-образной характеристикой

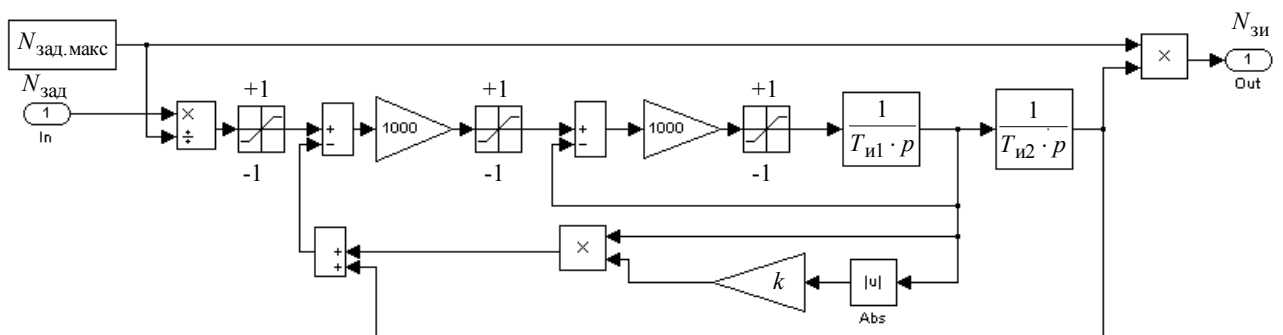
Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной выходной характеристикой представлена на рисунке 3.5. Параметры настройки имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой определяются по выражениям:

$$T_{u1} = t_1, c \quad T_{u2} = t_1 + t_2, c$$

$$k = 0,5 \cdot \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$



а



б

Рисунок. 3.6. Задатчик скорости с S – образной характеристикой:  
а – временная характеристика; б – имитационная модель

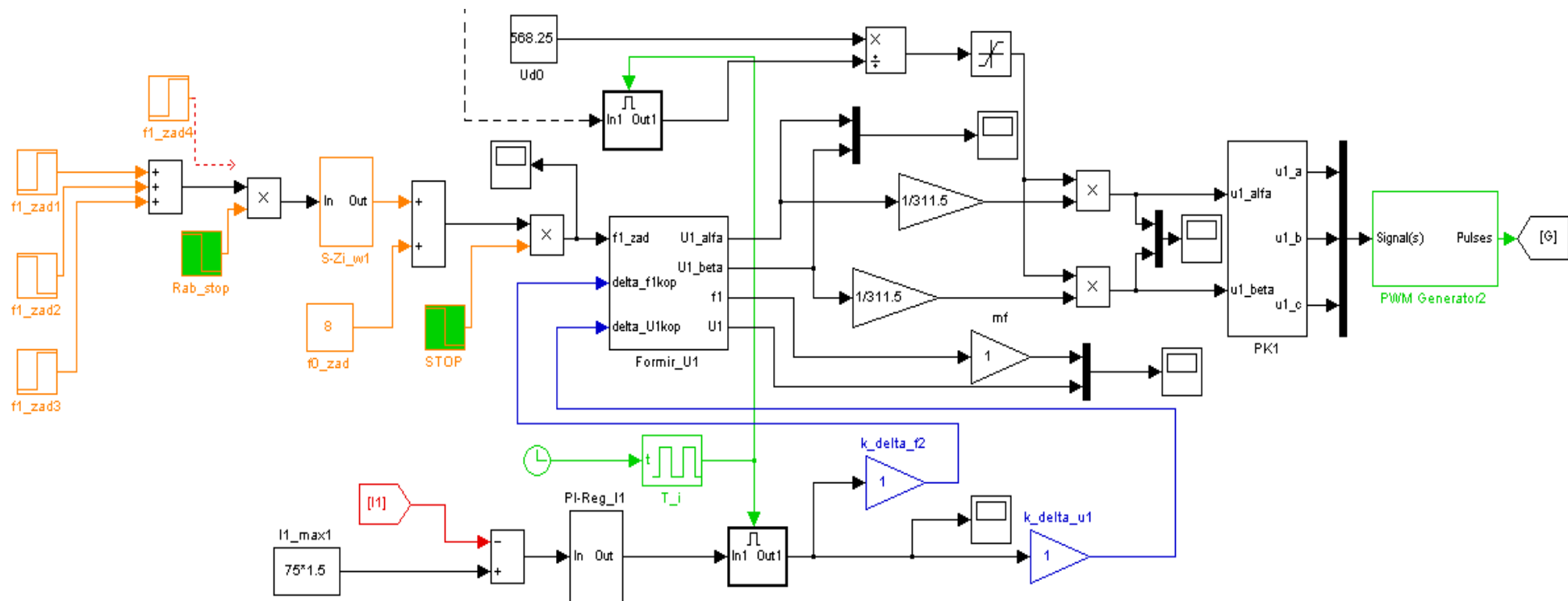


Рисунок 3.7 –Имитационная модель задание на силовой канал системы преобразователь частоты – асинхронного электродвигателя

## **3.2 Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении**

Насосная установка предназначена для непрерывного для поддержания давления системе отопления, поэтому электропривод должен работать в продолжительном режиме и быть нереверсивным. Требование регулирования производительности насоса, согласования скоростей и равномерного распределения нагрузок в многодвигательном электроприводе, обуславливают необходимость регулирования скорости электропривода, диапазон которого, как правило, не превышает значения 2:1.

Наиболее жесткие и противоречивые требования к электроприводу предъявляются в режиме пуска и останова насосной установки. С одной стороны, необходим плавный пуск и ограничение колебаний скорости. С другой стороны, требуется минимальное время разгона электропривода.

В связи с этим требуется ограничение рывка (второй производной скорости), обеспечивающее мягкое сцепление вала приводного двигателя с валом насоса через соединительную муфту.

Кроме того, необходимо ограничение максимального ускорения (второй производной скорости) электропривода в легких переходных процессах при пуске с небольшой нагрузкой и ограничение максимального момента электропривода в тяжелых переходных процессах при полной загрузке.

### **3.2.1 Программа исследований электропривода**

Работа электропривода насоса исследуется в двух режимах:

- плавный пуск насоса до максимальной скорости – снижение скорости на 50%
- выход на максимальную скорость – торможение и останов насоса.
- плавный пуск – разгон до максимальной скорости – авария- останов.

Модели частотно - регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении.

В данной работе рассматривается модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса со скалярным управлением с коррекцией вольт-частотной характеристики;

Библиотека моделей частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении. REP\_AD\_TRM\_Scal.mdl – модель асинхронного электропривода насоса с частотным скалярным управлением на базе модели электрической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель из пакета Simulink системы MATLAB, с датчиками токов  $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ , и коррекцией вольт-частотной характеристики

$$\frac{U_1}{f_1} = const.$$

Схемы набора имитационных моделей частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при скалярном управлении приведены в приложении В.

### 3.3 Параметры элементов силового канала электропривода насоса

Справочные технические параметры электродвигателя насоса приведены в разделе 2.1.2 в таблице 2.2.

Параметры двигателя, принятые при расчете

$$\eta_{0.85} = 0,938; \cos \phi_{0.87} = 0,84; \beta = 1,55$$

Расчетные параметры асинхронного электродвигателя

$$R_1 = 2,005 \text{ Ом}; L_{1\sigma} = 0,018 \text{ Гн};$$

$$R_2' = 1,26 \text{ Ом}; L_{2\sigma}' = 0,024 \text{ Гн};$$

$$L_m = 0,68553 \text{ Гн}; z = 3$$

$$\omega_n = 154,566 \text{ рад / с}; I_n = 47,167 \text{ А}; M_n = 2588 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Параметры преобразователя частоты серии Altivar 1200

$$I_{u.n} = 60 \text{ A}; I_{u.длит.дон} = 96 \text{ A при } f_{шум} \leq 5000 \text{ Гц}$$

$$I_{u.макс} = 66 (60с), \dots (2с) \text{ A}; f_{шум} = 5000 \text{ Гц}$$

### 3.3.1 Параметры элементов силового канала электропривода

Выбираем параметры сетевого трансформатора или реактора в соответствии с таблицей 3.1 для расчетного значения номинального тока обмотки фазы

$$I_{рфн} = I_{1фн} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1фн}}{U_c} = 47,167 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 3464}{6616} = 42,77 \text{ A}$$

Таблица 3.1 – параметры сетевого трансформатора

|                      |      |      |     |     |      |       |     |       |      |
|----------------------|------|------|-----|-----|------|-------|-----|-------|------|
| $I_{рфн}, \text{ A}$ | 12.3 | 20.5 | 41  | 82  | 165  | 265   | 410 | 660   | 820  |
| $L_p, \text{ мГн}$   | 3    | 2    | 1   | 0.5 | 0.25 | 0.156 | 0.1 | 0.064 | 0.05 |
| $R_p, \text{ мОм}$   | 450  | 265  | 100 | 37  | 13   | 7.2   | 3.8 | 2.1   | 1.4  |
| $I_{дн}, \text{ A}$  | 15   | 25   | 50  | 100 | 200  | 320   | 500 | 800   | 1000 |

Принимаем:  $R_p = 0,37 \text{ Ом}; L_p = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$

Принимаем:  $C = 100 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ , из условия  $C \approx (100 \div 300) \cdot P_n$ ;  $\text{мкФ}$ , где

$P_n$  - номинальная мощность двигателя,  $\text{кВт}$

#### Параметры механической системы электропривода насоса

$$\Delta M_{с.дв} = 2,704 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$J_{мех} = 2 \cdot J_3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$



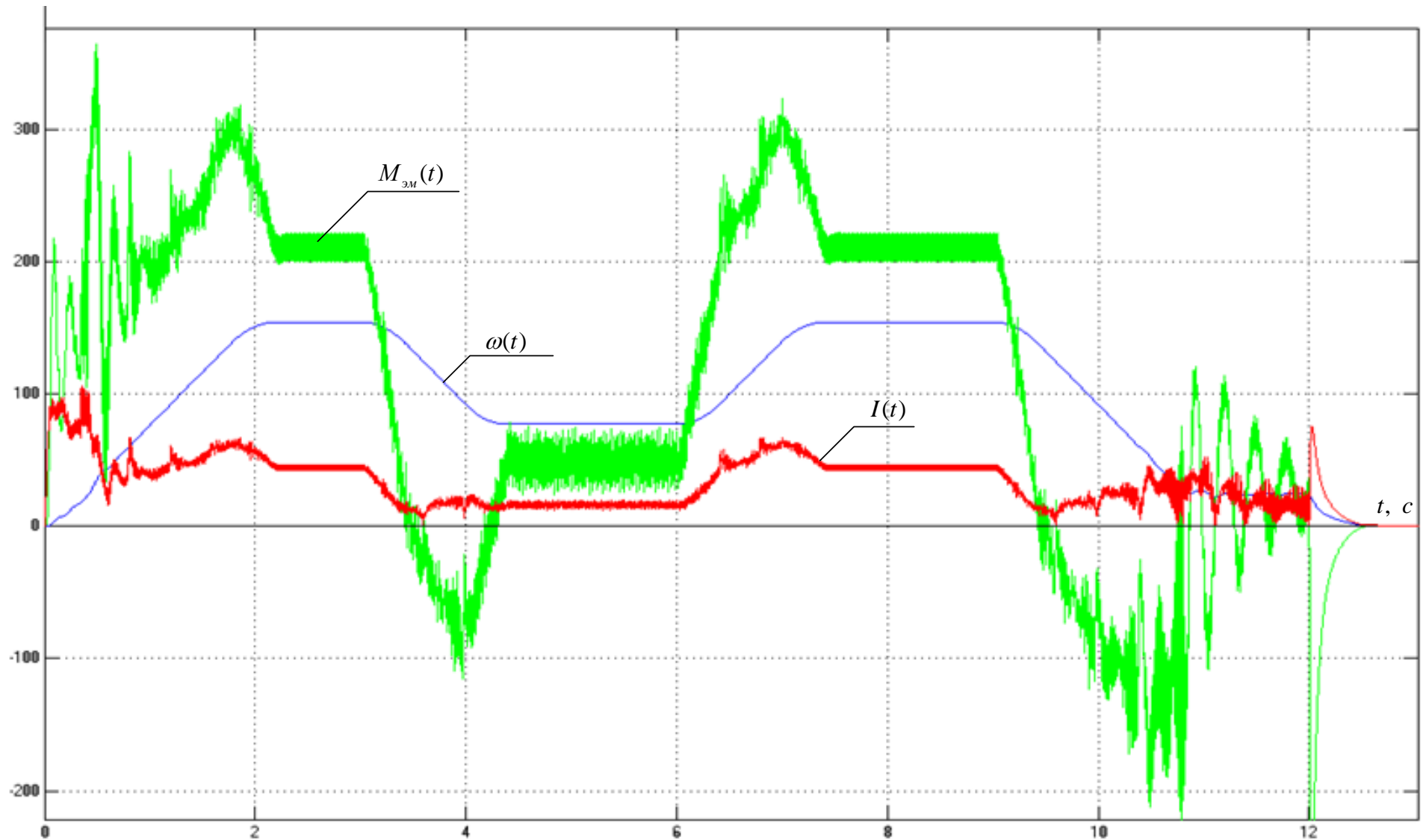


Рисунок 3.8 Диаграммы отработки электроприводом насоса цикла: разгон на максимальную скорость – снижение скорости на 50% - разгон на максимальную скорость – торможение и останов

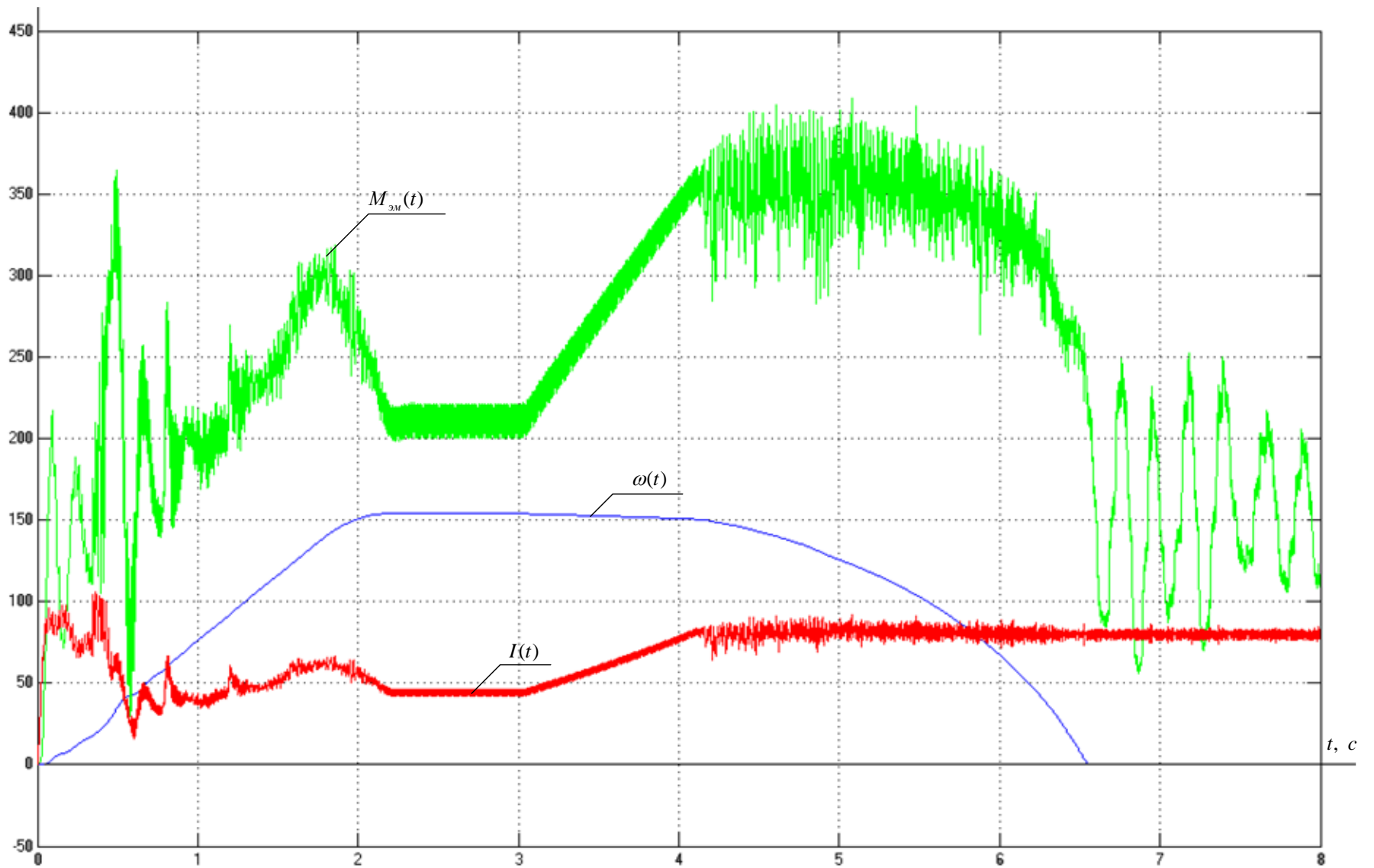


Рисунок 3.9 - Диапазон работы электропривода насоса при внезапной перегрузке по моменту

По результатам исследования были получены характеристики:

Если электроприводу подать задание на отработку определенного цикла технологического процесса, то это значит, что в пуско - тормозных режимах электропривода будет ограничивать значения динамического момента и тока двигателя, а при *S*-образной выходной характеристики задатчика – дополнительно и скорость их наименьшая. Однако, фактическое значение момента на валу двигателя и тока двигателя будут зависеть еще и от величины статического момента и характера нагрузки, а также от конкретного вида пуска - тормозного режима.

В рассмотренном электроприводе механизмов, для которых кратковременные большие перегрузки и стопорения двигателя являются рабочими режимами необходимо не только ограничивать величину тока и момента, но и поддерживать допустимое значения момента на валу двигателя в течении всего времени перегрузки. Большие кратковременные перегрузки вызывают провал скорости двигателя и затем восстановление её после исчезновения перегрузки. Процессы торможения и разгона двигателя в этом случаи уже не управляется от задатчика скорости и могут сопровождаться большими бросками тока и момента двигателя, если их величину не ограничивать.

Из рисунка 3.8 и 3.9 видны значительный пульсации тока, момента и скорости, что не позволяет говорить о плавных характеристиках процесса.

На установившейся скорости в диапазоне 2:1 работу электропривода можно считать удовлетворительной, с незначительными пульсациями тока и момента.

### **Вывод к разделу 3**

Скалярное управление одно из простейших вариантов реализации частотного – регулируемого асинхронного электропривода, имеющие не высокие качественные показатели: небольшой диапазон регулирования скорости, большая погрешности скорости и малое быстродействие, что обусловлено необходимостью применения задатчика интенсивности скорости.

Приведенные простейшие электроприводы со скалярным управлением во многих случаях полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электроприводу производственного механизма. Они широко применяются для решения задач регулирования скорости механизмов во вновь проектируемом технологическом оборудовании скоростью механизмов, а так же в качестве замены нерегулируемого электропривода переменного тока и регулируемого электропривода постоянного тока с обратными связями по напряжению и ЭДС двигателя. Сильные пульсации в момент пуска и момент торможения предотвратить практически не возможно даже благодаря скалярному управлению.

## 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### 4.1 Разработка имитационной модели регулируемого электропривода с векторным управлением

Система векторного частотного управления асинхронным двигателем базируется на представлении физических переменных двигателя пространственными векторами, у которых могут изменяться как модули так и положения в пространстве. Основой для реализации систем управления частотного – регулируемых асинхронных электроприводов с векторным управлением является структурная схема двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора  $\Psi_2^*$

Модели регулируемого асинхронного электропривода с частотным векторным управлением реализуются на основе базовой функциональной схемы:

- с моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ (рисунок 4.1)
- схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя без датчика потока и скорости (рисунок 4.2).

Общим для модели является 4-х контурная система автоматического управления (САУ) регулируемого асинхронного электропривода (РЭП). Управляющими сигналами на входе РЭП постоянное значение потокосцепления ротора  $\Psi_2^*$  и заданное значение скорости вращения двигателя  $\omega^*$ . В частном случае возможно отсутствие контура и регулятора потокосцепления ротора. В этом случае задается значение тока  $I_d$ , которое затем удерживается постоянным, в процессе работы привода. Развитие моделей осуществляется путем исключения датчиков потока и скорости вращения двигателя и реализации позиционных и следящих систем электропривода.

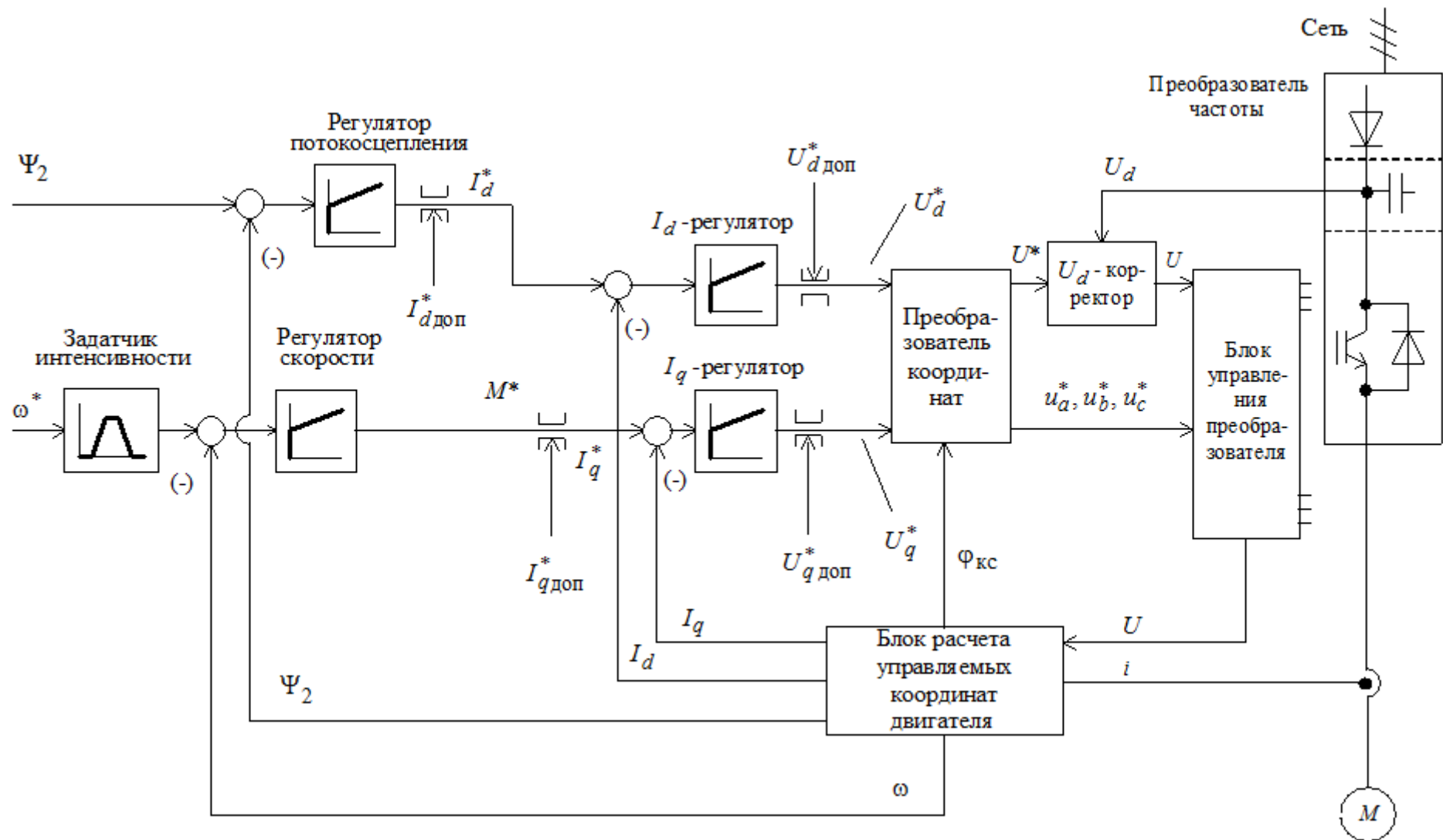


Рисунок 4.1 - Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ без датчиков потока и скорости

- В моделях асинхронного электропривода с частотным векторным управлением используются следующие модели асинхронного электродвигателя:
- двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат  $d, q$ , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, структурная схема которого представлена на рисунке 4.2 (полная схема) и рисунке 4.3 (упрощенная схема);
  - двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$  (рисунок 4.4)
  - трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора  $a, b, c$  (рисунок 4.5);

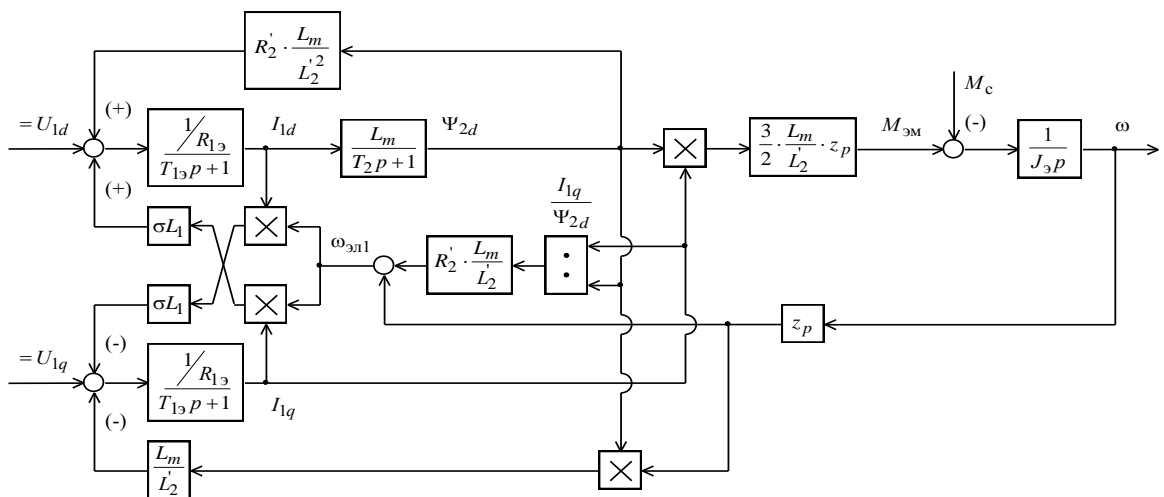


Рисунок 4.2 - Структурная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат  $d, q$ , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора

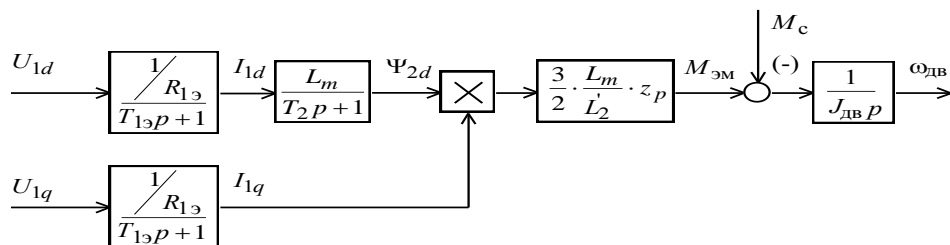


Рисунок 4.3 – Структурная схема двухфазного асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат  $d, q$ , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, с компенсированными внутренними обратными связям

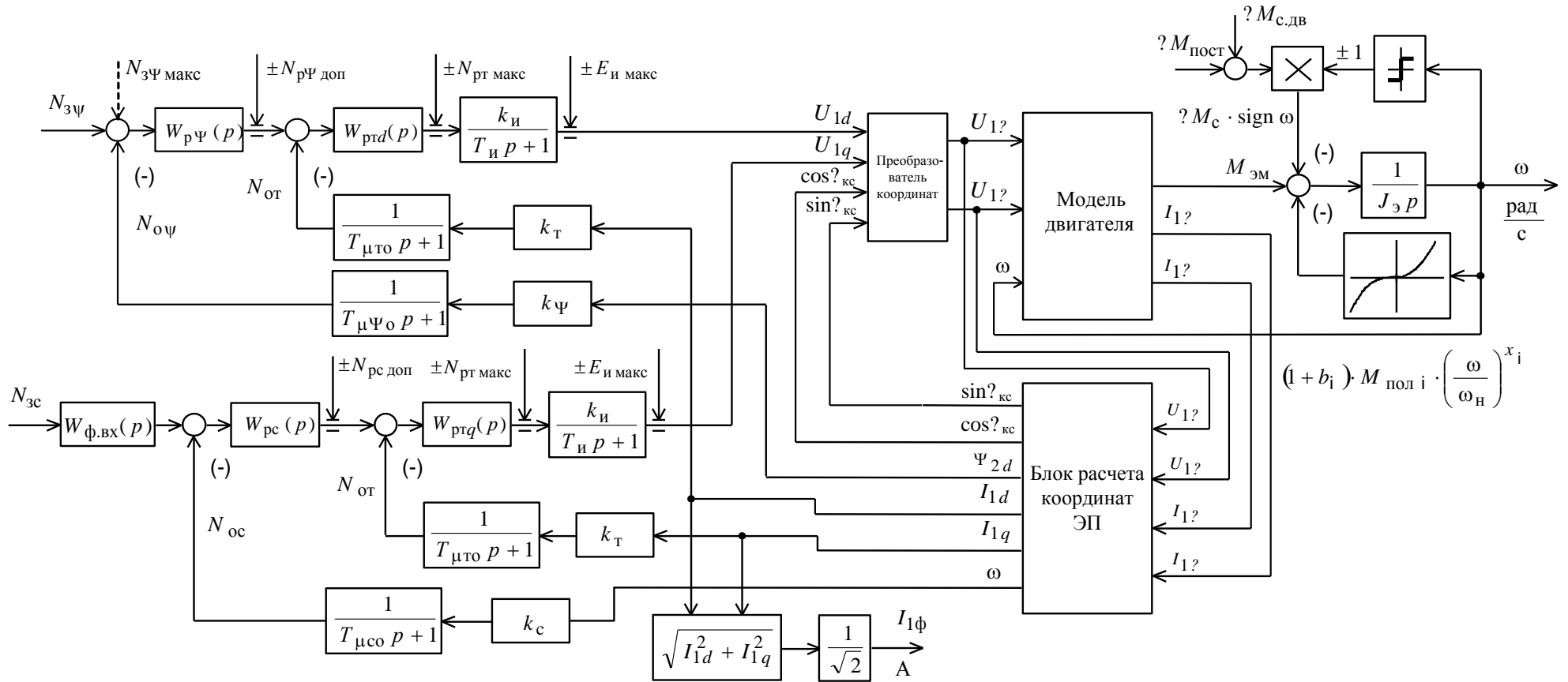


Рисунок 4.4 - Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя без датчика потока и скорости



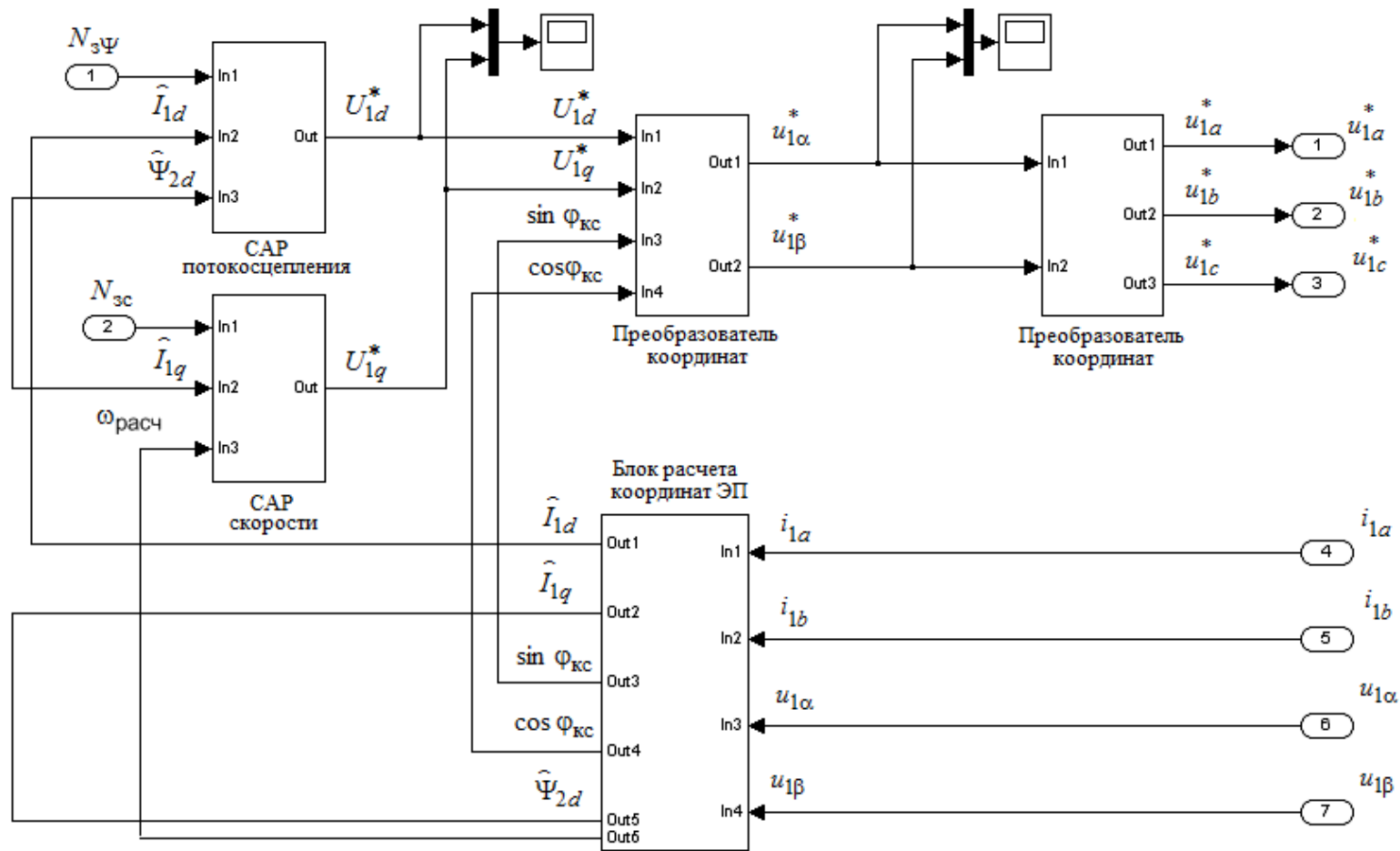


Рисунок 4.5 - Имитационная модель блока расчета управлений и преобразования координат системы векторного управления регулируемого асинхронного электропривода

### 4.1.1 Структурные схемы блоков преобразования координат

#### двигателя

Поскольку управления трехфазным асинхронным двигателем формируется в двухфазной системе координат, в моделях электропривода используются блоки прямого и обратного преобразования координат двигателя. Схемы моделей блоков преобразователей координат приведены на рисунок 4.6 и 4.7. Для преобразования не указанных на приведенных схемах координат двигателя блоки идентичные.

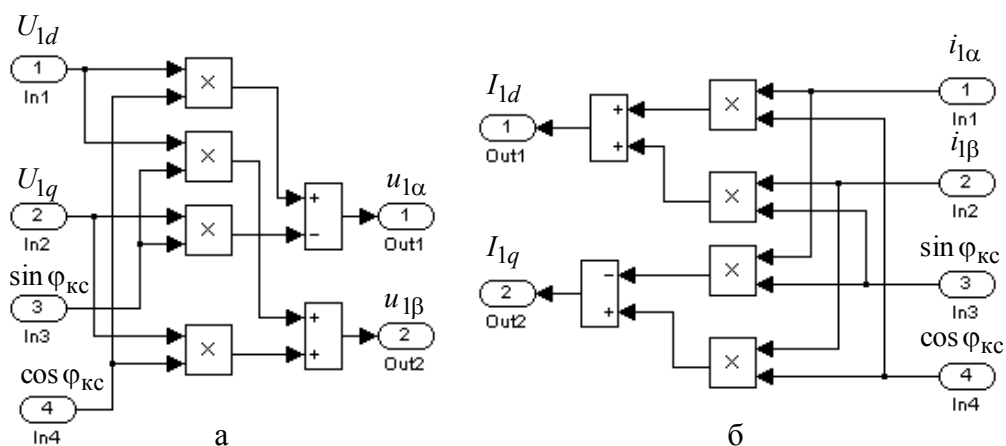


Рисунок 4.6 – Имитационные модели преобразователей координат:

- а – из вращающейся системы координат  $d, q$  в неподвижную систему  $\alpha, \beta$ ;
- б – из неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  во вращающуюся систему  $d, q$

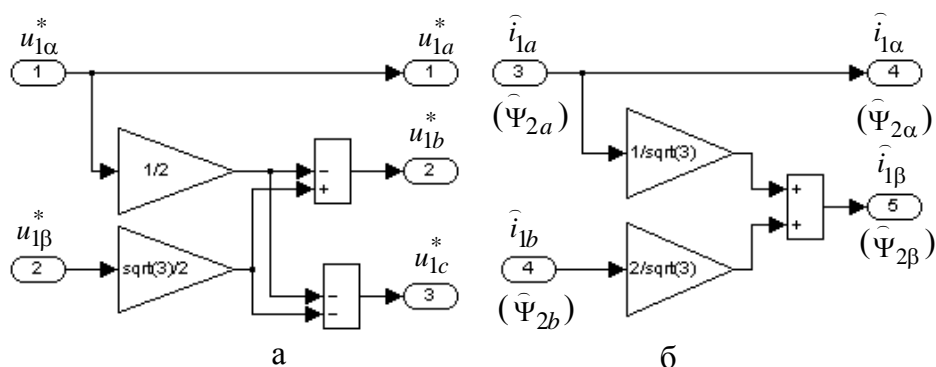


Рисунок 4.7 – Имитационные модели преобразователей координат:

- а – из неподвижной двухфазной координатной системы  $\alpha, \beta$  в неподвижную трехфазную систему координат  $a, b, c$ ;
- б – из неподвижной трехфазной системы координат  $a, b, c$  в неподвижную двухфазную координатную систему  $\alpha, \beta$

### 4.1.2 Структурные схемы ПИ-регуляторов

Схема набора имитационной модели ПИ-регулятора с неуправляемым значением уровня ограничения интегральной составляющей выходного сигнала в режиме насыщения приведена на рисунке 4.8.

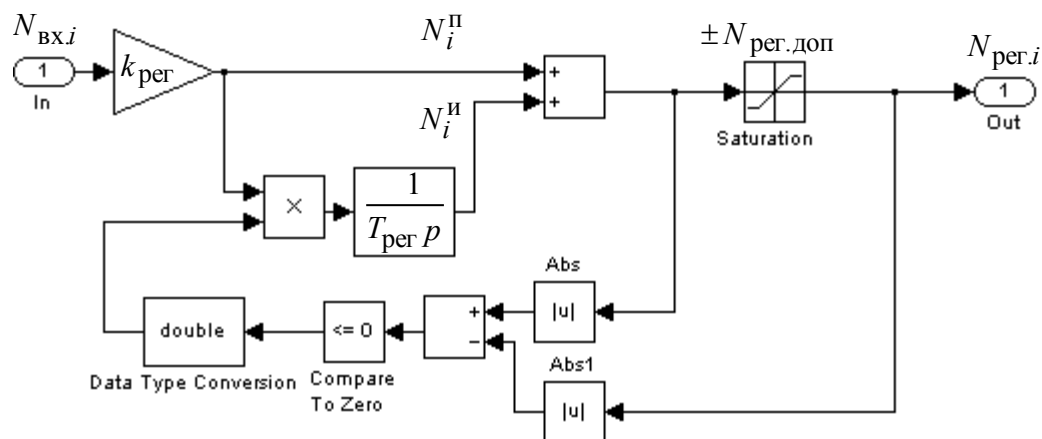


Рисунок 4.8. Схема набора имитационной модели ПИ-регулятора с отключением интегральной составляющей сигнала при насыщении.

Схема набора имитационной модели ПИ-регулятора с управляемым значением уровня ограничения интегральной составляющей выходного сигнала в режиме насыщения приведена на рисунке. 4.9.

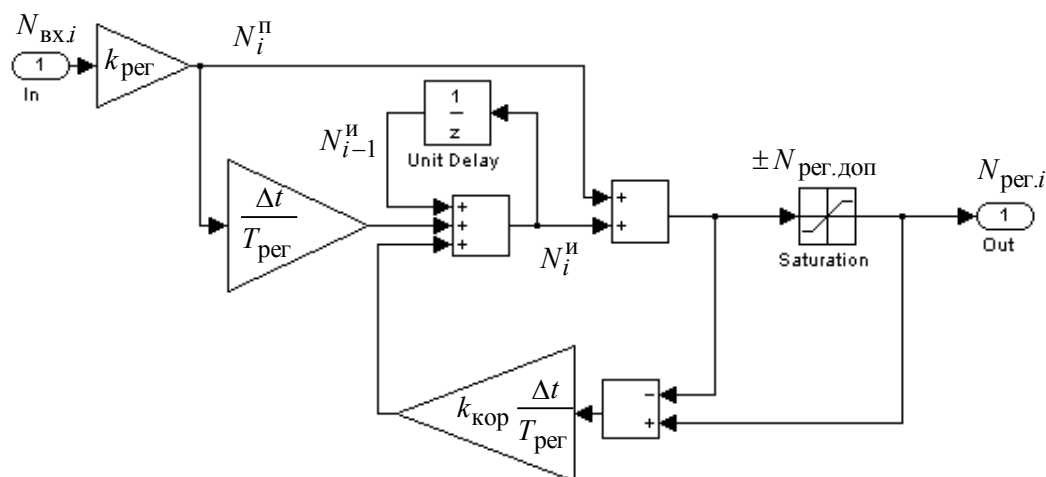


Рисунок. 4.9. Схема набора имитационной модели ПИ-регулятора с регулируемым значением интегральной составляющей сигнала в режиме насыщения.

Для ограничения выходного сигнала регулятора скорости в зависимости от фактического значения сигнала регулятора потокосцепления используется модель ПИ-регулятора скорости, приведенная на рисунке 4.10.

Для ограничения выходного сигнала регулятора тока  $I_q$  в зависимости от фактического значения сигнала регулятора тока  $I_d$  используется модель ПИ-регулятора тока, приведенная на рисунке. 4.11. Для компенсации влияние ЭДС вращения, наводимой в статоре потокосцеплением ротора, в регуляторе тока  $I_q$  предусмотрена положительная обратная связь по скорости двигателя с коэффициентом  $k_{\text{пос}}$ .

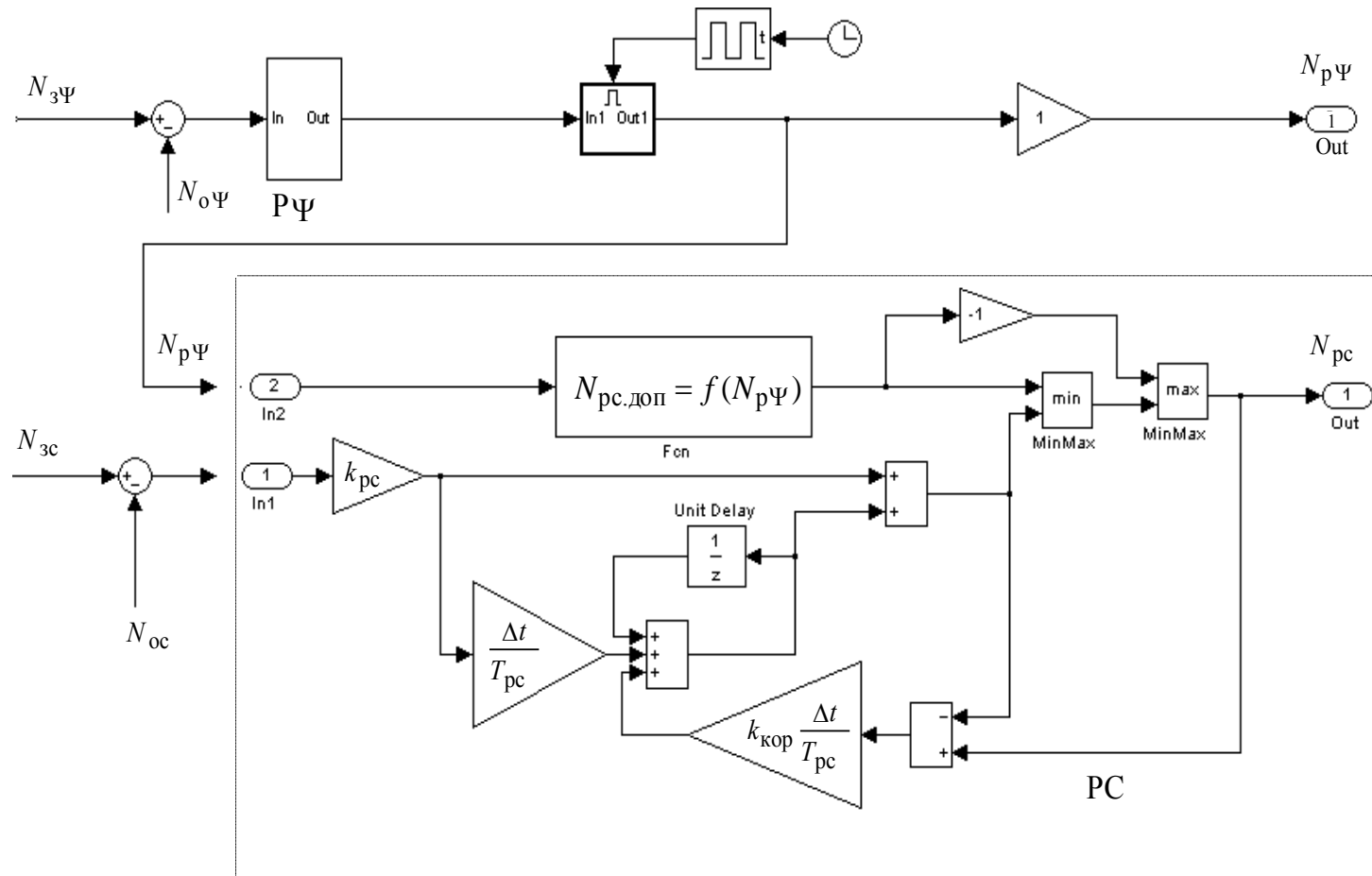


Рисунок 4.10 - Имитационная модель ПИ-регулятора скорости с управляемым значением ограничения выходного сигнала

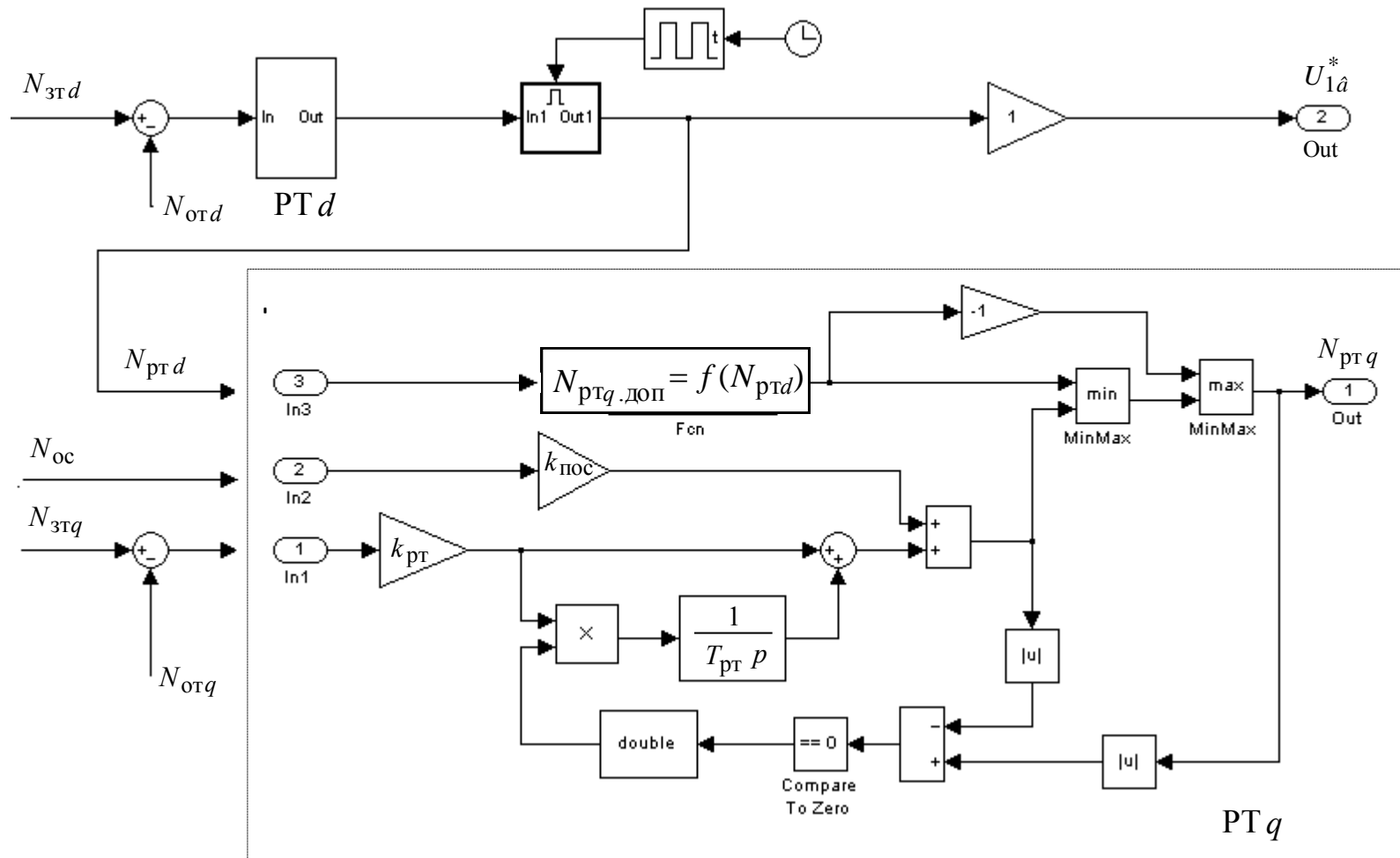


Рисунок 4.11 - Имитационная модель ПИ-регулятора тока  $I_q$  с положительной обратной связью по скорости двигателя и управляемым значением ограничения выходного сигнала

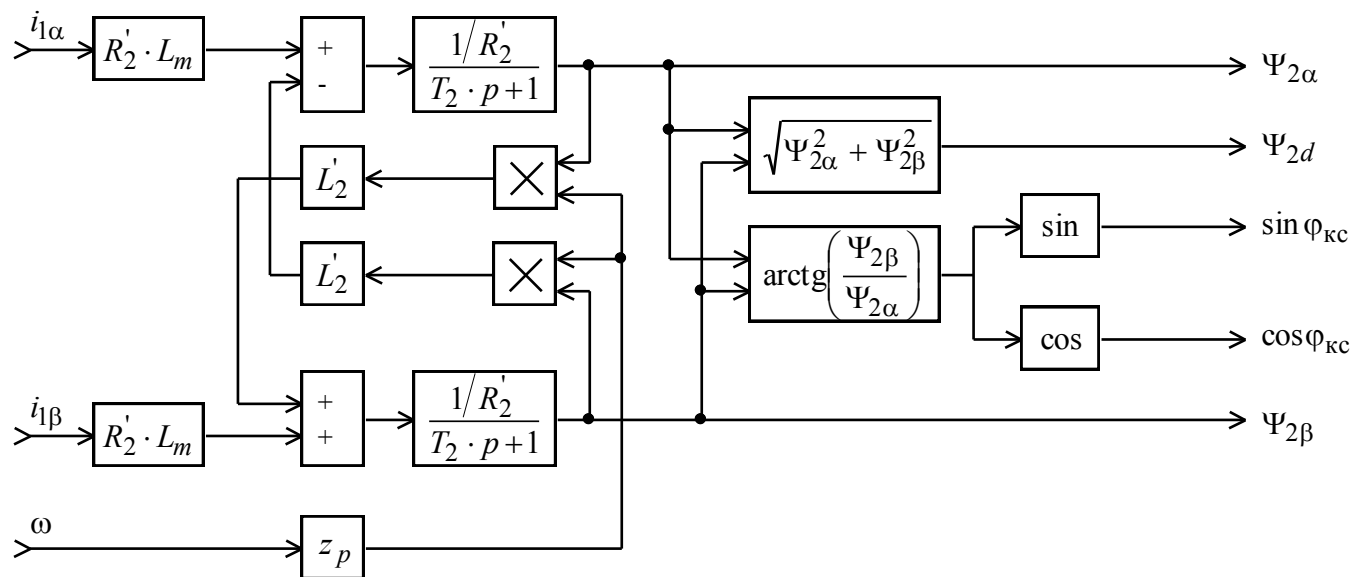


Рисунок 4.12 - Схема расчета угла поворота вращающейся координатной системы с использованием значений измеренных токов  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  и скорости  $\omega$  двигателя

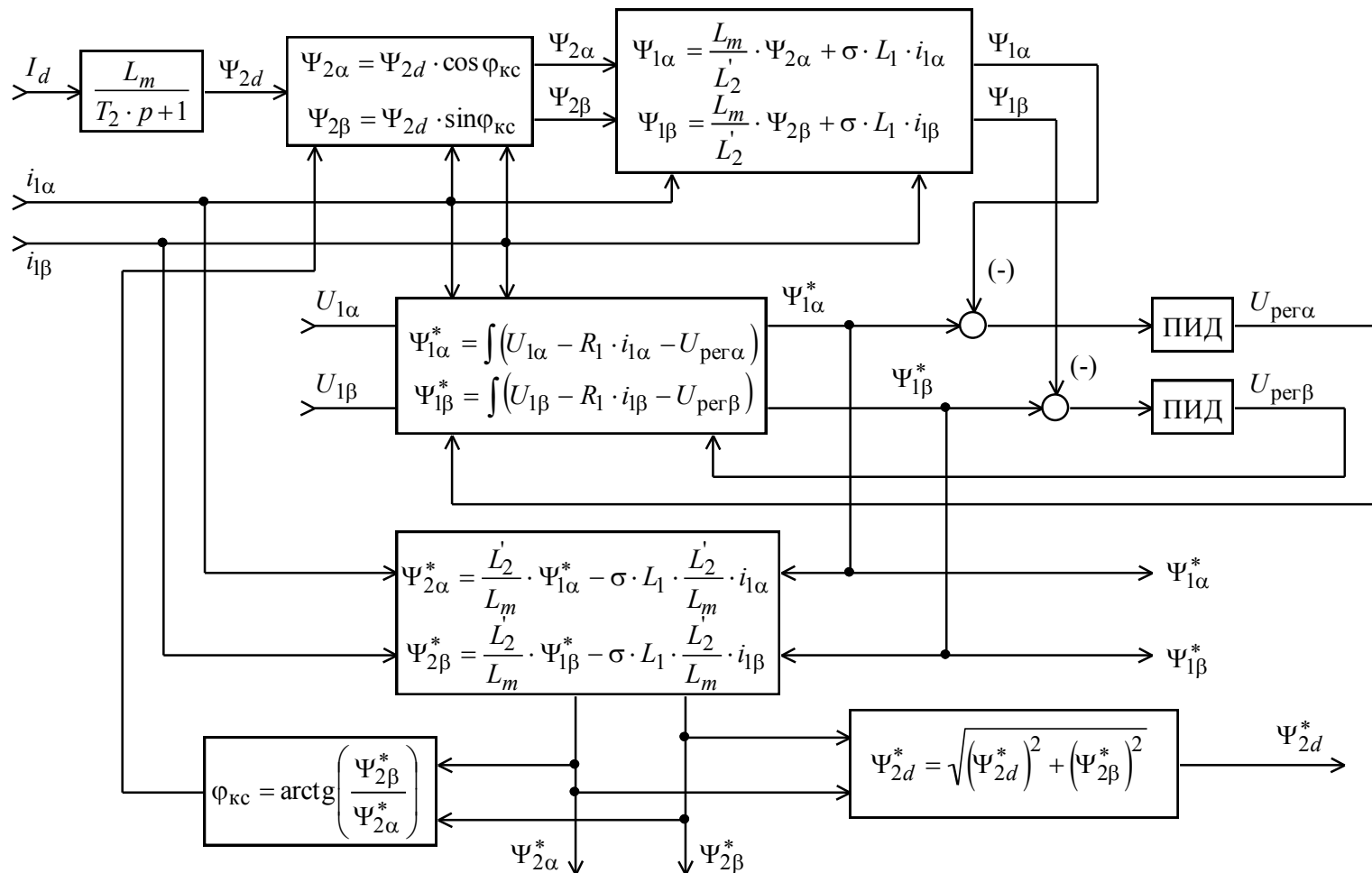


Рисунок 4.13 - Схема расчета угла поворота вращающейся координатной системы с использованием значений токов  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$ ,  $I_d$  и напряжений  $U_{1\alpha}$ ,  $U_{1\beta}$



В электроприводе без датчиков скорости и потока, скорость вращения двигателя может быть рассчитана в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.14

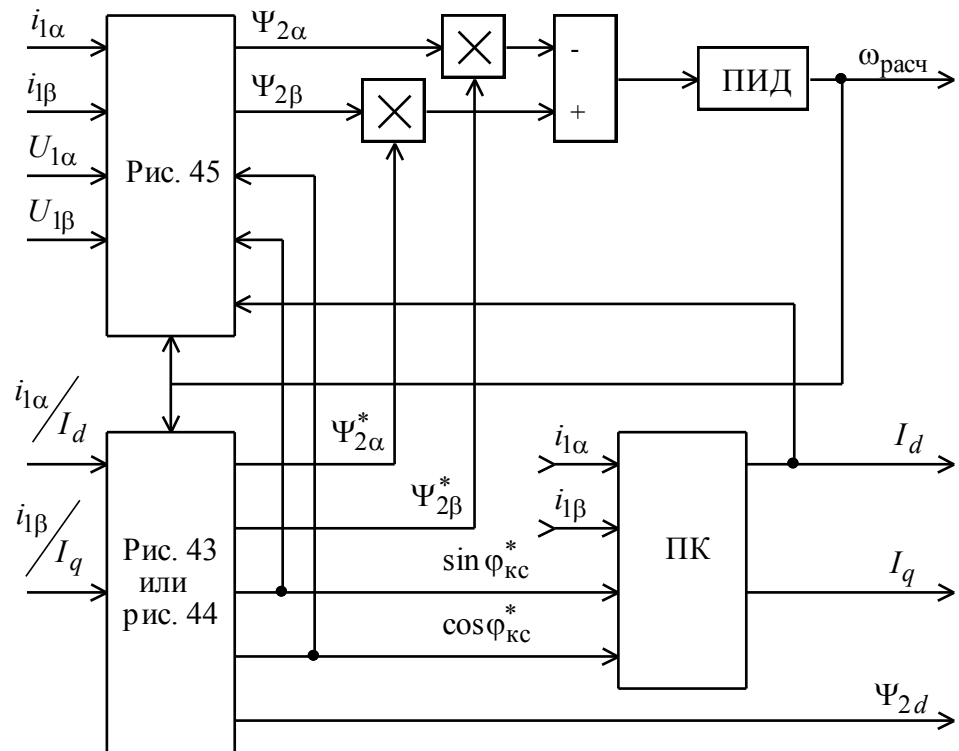


Рисунок 4.14 - Схема расчета скорости двигателя в бездатчиковом электроприводе.

## 4.2 Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода вращающихся насоса с векторным управлением

### 4.2.1 Программа исследований электропривода

Работа электропривода насоса исследуется в режиме:

Плавный пуск – разгон до максимальной скорости – снижение скорости до 50% – разгон до максимальной скорости – торможение и останов.

Модели частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса с векторным управлением

Рассматривается модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода сетки при векторном управлении:

– без датчика скорости.

Библиотека моделей частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса с векторным управлением: REP\_AD\_TRM\_vect.mdl – модели асинхронного электропривода насоса с частотным векторным управлением на базе модели электрической части силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель из пакета Simulink системы MATLAB, с датчиками токов  $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ , без датчиков потока и скорости вращения двигателя.

Схемы набора имитационных моделей частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при векторном управлении приведены в приложении С.

#### 4.2.2 Расчет параметров моделей асинхронного электропривода насоса с частотным векторным управлением

Расчет параметров элементов силового канала

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,018 + 0,68553 = 0,70353 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,024 + 0,68553 = 0,70953 \text{ Гн}$$

Коэффициент рассеяния магнитного потока:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,68553^2}{0,70353 \cdot 0,70953} = 0,059$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_{1\sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 2,005 + 1,265 \cdot \frac{0,68553^2}{0,70953^2} = 3,186 \text{ Ом}$$

Электромагнитные постоянные времени статора и ротора:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0,059 \cdot 0,70353}{3,186} = 0,01293 \text{ с}$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,70953}{1,265} = 0,56089 \text{ с}$$

Период ШИМ:

$$T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Напряжение звена постоянного тока преобразователя:

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1\text{фн}}}{\gamma_{\text{макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 3464}{0,95} = 8932 \text{ В}$$

где  $\gamma_{\text{макс}} = 0,95$  – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора.

Линейное напряжение источника питания преобразователя:

$$U_c = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{8932}{1,35} = 6616 \text{ В}$$

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя:

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} = \frac{8932}{\sqrt{3}} = 5157$$

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 15,677 \cdot 0,68553 = 15,199 \text{ Вб}$$

Значение номинального тока  $I_{1d}$ :

$$I_{1d\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 15,677 = 22,171 \text{ А}$$

Эквивалентный момент нагрузки, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{эп.макс}} = 1,5M_{\text{дв.н}} + \Delta M_{\text{с.дв}} = 1,5 \cdot 2588 + 96,457 = 3978 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Значение максимального тока  $I_{1q}$ :

$$I_{1q,\text{макс}} = \frac{M_{\text{эп.макс}}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2\text{н}}} = \frac{3978}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,68553}{0,70953} \cdot 2 \cdot 15,199} = 90,31 \text{ А}$$

Модуль вектора тока статора:

$$\text{mod } \vec{I}_{1\text{макс}} = \sqrt{I_{1q\text{макс}}^2 + I_{1d\text{н}}^2} = \sqrt{90,31^2 + 22,171^2} = 92,991 \text{ А}$$

Максимальный ток электропривода:

$$I_{\text{ЭП.макс}} = \frac{\text{mod } \vec{I}_{\text{I.макс}}}{\sqrt{2}} = \frac{92,991}{\sqrt{2}} = 65,755 \text{ A}$$

Условие  $I_{\text{ЭП.макс}} \leq I_{\text{И.макс}}$  выполняется:  $65,755 < 78 \text{ A}$

Параметры настройки контура тока с ПИ-регулятором и аналоговым датчиком

Принимаем разрядность АЦП датчика тока преобразователя:

$$n_{\text{ашп.дт}} = 12$$

Принимаем максимальное значение измеряемого тока (амплитудное значение переменного тока):

$$I_{\text{Изм.макс}} = \sigma_{\text{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}} = 1,29 \cdot \sqrt{2} \cdot 65,755 = 119,959 \text{ A}$$

где  $\sigma_{\text{T}} \geq 1,29$  – коэффициент, учитывающий возможное увеличение тока за счет перерегулирования.

Коэффициент передачи датчика тока:

$$k_{\text{дт}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ашп.дт}}}}{I_{\text{Изм.макс}}} = \frac{0,5 \cdot 2^{12}}{119,959} = 17,067 \text{ 1/A}$$

Принимаем  $N_{\text{от.макс}} = 1$ .

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_{\text{T}} = \frac{1}{I_{\text{Изм.макс}}} = \frac{1}{119,959} = 0,008333 \text{ 1/A}$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока:

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{n_{\text{ашп.дт}}}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^{12}} = \frac{1}{2048} = 4,883 \cdot 10^{-4}$$

Максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному действующему значению тока электропривода  $I_{\text{ЭП.макс}}$ :

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}}{I_{\text{Изм.макс}}} = k_{\text{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 65,755}{119,959} = 0,775$$

Принимаем:

$$T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

где  $T_{\text{ос.т}}$  – интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока;

$T_{\text{пк.т}}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура тока;

$T_{\text{зу.и}}$  – интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора.

Принимаем постоянную времени аналогового фильтра в цепи измерения тока

$$T_{\text{ф.от}} = 0$$

Принимаем коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном:

$$n_{\text{т}} = 2$$

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока

$$T_{\text{мтэ}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_{\text{т}}} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2} + 2 \cdot 10^{-4} + 0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Принимаем коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО):  $a_{\text{т}} = 2$ .

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{\text{рт}} = T_{\text{лэ}} = 0,01293 \text{ с}$$

Коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_{\text{лэ}} \cdot R_{\text{лэ}}}{k_{\text{и}} \cdot k_{\text{т}} \cdot a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мтэ}}} = \frac{0,01293 \cdot 3,186}{5157 \cdot 0,008333 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 1,59747$$

$$T_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мтэ}} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора тока  $I_{\text{ld}}$ :

$$N_{\text{ртд доп}} = 1$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора тока  $I_{\text{лq}}$ :

$$N_{\text{ртq доп}} = \sqrt{1^2 - N_{\text{ртд}}^2} = \sqrt{1^2 - 1^2} = 0$$

Параметры контура потокосцепления с ПИ-регулятором без датчика

Принимаем:

$$\Psi_{2\text{изм.макс}} = \sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2н} = 1,3 \cdot 14,661 \text{ где } \sigma_{\Psi} \geq 1,3$$

Принимаем:

$$N_{0\Psi.\text{макс}} = 1.$$

Коэффициент обратной связи по потоку:

$$k_{\Psi} = k_{\text{ос.}\Psi} = \frac{1}{\Psi_{2\text{изм.макс}}} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ } 1/\text{Вб}$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура потокосцепления:

$$N_{\Psi.\text{макс}} = \frac{\Psi_{2н}}{\Psi_{2\text{изм.макс}}} = k_{\Psi} \cdot \Psi_{2н} = 0,05 \cdot 14,661 = 0,73305$$

Принимаем

$$T_{\text{расч.}\Psi} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = 0,0002 \text{ с.}$$

Интервалы квантования сигналов в цепи обратной связи контура потока

принимаем:  $T_{\text{ос.}\Psi} = T_{\text{ПК.}\Psi} = 10 \cdot T_{\text{ШИМ}} = \frac{10}{f_{\text{ШИМ}}} = 0,002 \text{ с.}$

Принимаем постоянную времени аналогового фильтра в цепи измерения потока

:  $T_{\text{ф.о}\Psi} = 0 \text{ с.}$

Принимаем коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания

апериодическим звеном:  $n_{\Psi} = 1 \text{ с.}$

$$T_{\mu\Psi} = T_T + \frac{T_{\text{ос.}\Psi}}{n_{\Psi}} + T_{\text{ф.о}\Psi} = 0,0006 + \frac{0,002}{1} = 0,0026 \text{ с.}$$

Принимаем:

$$a_{\Psi} = 2 \text{ с.}$$

Постоянная времени регулятора:

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0,56089 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора:

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_m}{L_m \cdot k_\Psi \cdot a_\Psi \cdot T_{\mu\Psi}} = \frac{0,56089 \cdot 0,008}{0,068553 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 0,0026} = 26,22412.$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потока:

$$N_{p\Psi \text{ доп}} = N_{\text{эт. макс}} = 0,77493.$$

Параметры контура скорости с ПИ-регулятором без датчика скорости

Максимальное значение измеряемой скорости:

$$\omega_{\text{изм. макс}} = \sigma_c \cdot \omega_{\text{эт. макс}} = 1,5 \cdot 231,849 = 347,77 \text{ рад / с},$$

где  $\sigma_c \geq 1,5$  – коэффициент, учитывающий возможное увеличение скорости за счет перерегулирования.

Принимаем  $N_{\text{ос. макс}} = 1$ .

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$k_c = k_{\text{ос}} = \frac{1}{\omega_{\text{изм. макс}}} = \frac{1}{347,77} = 0,0043132 \text{ с / рад}$$

Значение максимального задания на входе контура скорости:

$$N_{\text{зс. макс}} = \frac{\omega_{\text{эт. макс}}}{\omega_{\text{изм. макс}}} = k_c \cdot \omega_{\text{эт. макс}} = 0,0043132 \cdot 231,849 = 0,66667.$$

Принимаем

$$T_{\text{расч.с}} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = 0,0002 \text{ с}.$$

Интервалы квантования сигналов в цепи обратной связи контура скорости:

$$T_{\text{ос.с}} = T_{\text{нк.с}} = 10 \cdot T_{\text{шим}} = 10 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Принимаем постоянную времени аналогового фильтра в цепи измерения скорости:

$$T_{\text{ф.о\Psi}} = 0 \text{ с}.$$

Принимаем коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiодическим звеном:  $n_c = 2 \text{ с}$ .

Эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости:

$$T_{\text{мэ}} = T_{\text{ПК.С}} + \frac{T_{\text{ос.с}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} = 6 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} + 0 = 0,0016 \text{ с.}$$

Принимаем коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум (СО) :  $b_c = a_c = 2$ .

Постоянная времени регулятора:

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мэ}} = 2 \cdot 2 \cdot 0,0016 = 0,0064 \text{ с.}$$

Коэффициент усиления регулятора:

$$k_{pc} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_m}{\Psi_{2n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мэ}}} =$$

$$\frac{0,044 \cdot 0,02808}{14,661 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,68553}{0,024} \cdot 2 \cdot 0,0043132 \cdot 2 \cdot 0,0016} = 163,155$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потока:

$$N_{pc.дон} = \sqrt{N_{\text{эт. макс}}^2 - N_{p.\psi}^2} = 0.$$

$$T_{\text{ф.вх}} = T_{pc} \div \left( T_{pc} + \frac{T_{\text{ксо}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} \right)$$

Принимаем:  $T_{\text{ф.вх}} = 0,0064 \text{ с}$



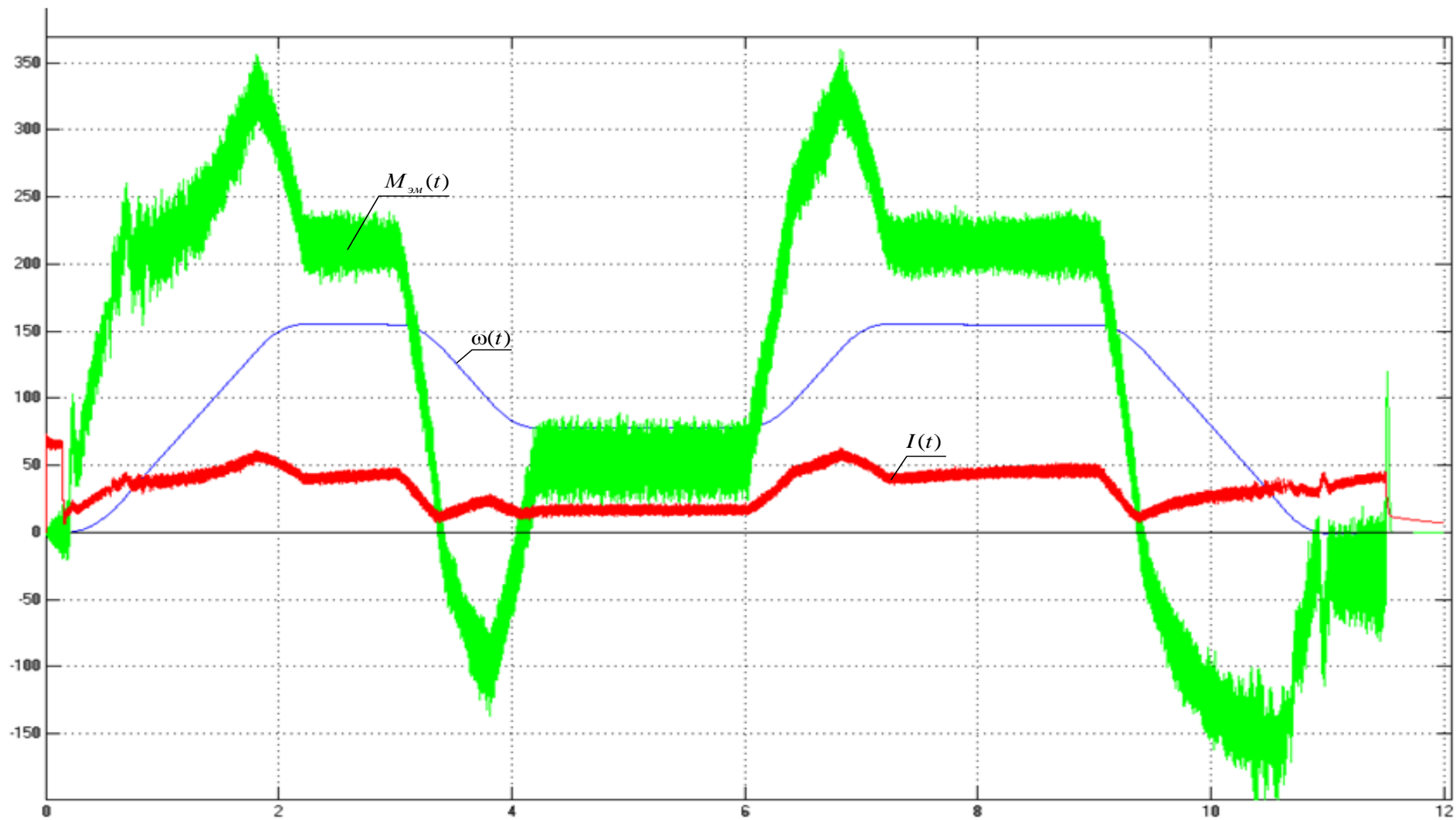


Рисунок 4.15 Диаграммы отработки электроприводом насоса цикла: плавный пуск – снижение скорости до 50 %– разгон до максимальной скорости – торможение и останов при векторном управлении

## **ВЫВОД**

Из рисунка 4.15 видно, что при векторном управлении в момент пуска и торможения, ток и момент имеют значительно меньшие пульсаций, чем при скалярном управлении. Так же стоит отметить ряд преимуществ векторного управления над скалярным, а именно:

- Высокий уровень точности при регулировании скорости вращения вала, несмотря даже на возможное отсутствие датчика скорости
- Осуществление вращения двигателя на малых частотах происходит без рывков и плавно
- Быстрое реагирование на возможное изменение нагрузки – резкие скачки нагрузки практически не отражаются на скорости электропривода,

Высокий уровень КПД двигателя, за счет сниженных потерь из-за намагничивания и нагрева.

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

Студенту:

|               |                               |
|---------------|-------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                    |
| 3-5Г3А1       | Михеев Владислав Владимирович |

|                            |             |                                  |                                       |
|----------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Институт</b>            | <b>ИШЭ</b>  | <b>Кафедра</b>                   | <b>ЭПЭО</b>                           |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат | <b>Направление/специальность</b> | Электроэнергетика<br>и электротехника |

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

|  |  |
|--|--|
| <p>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></p> | <p>- Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 1 миллион рублей,<br/>- В реализации проекта задействованы 3 человека: руководитель проекта, инженер – электроник, инженер – программист</p>  |
| <p>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></p>   | <p>- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»<br/>- Минимальный размер платы труда 2018 год составляет 9489 руб.</p> |
| <p>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></p>                                  | <p>- Отчисления по страховым взносам - 30% от ФОТ</p>  |

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

|  |   |
|--|---|
| <p>1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i></p>  | <p>- Инициализация НИИ и его технико-экономическое обоснование<br/><br/>- Потенциальные потребители результатов исследования.<br/><br/>- Анализ конкурентных технических решений<br/><br/>- Оценка НТУ проекта</p>  |
| <p>2. <i>Планирование и формирование бюджета проектной работы</i></p>  | <p>- Планирование работ по научному исследованию<br/>- Расчет общей сметы затрат на НИИ (бюджета проекта), в том числе материальных затрат (затраты на канцелярию и на литературу); затрат на сборочные единицы электропривода, расчет заработной платы исполнителей проекта; расчет пенсионных и страховых расходов; расчет амортизационных отчислений; расчет заработной платы обслуживающего персонала.<br/><br/>- Расчет издержек на ремонтно-эксплуатационное обслуживание электропривода.</p> |
| <p>3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической</i></p> | <p>- Определение ресурсной и экономической эффективности исследования</p>   |

|  |  |
|--|--|
| <i>эффективности исследования</i>  | - Оценка организационной эффективности |
| <b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей): |  |
| 1. График Ганта<br>2. Бюджет проекта   |  |
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>                        |  |

**Задание выдал консультант:**

| Должность | ФИО                        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| доцент    | Попова Светлана Николаевна | К.Э.Н                  |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа  | ФИО                           | Подпись | Дата |
|---------|-------------------------------|---------|------|
| 3-5ГЗА1 | Михеев Владислав Владимирович |         |      |

## **5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЕ**

Данный раздел выпускной квалификационной работы посвящен выбору наиболее выгодного варианта электропривода для рассматриваемого объекта автоматизации. В данном проекте рассматривается частотно-регулируемый высоковольтный асинхронный электропривод марки АК4-400ХК-4У3, производимые концерном «РУСЭЛПРОМ» и преобразователь частоты серии ATV1200-A570–6060 фирмы Altivar . Для насосной установки теплоснабжения подкачивающей насосной станции. 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 пыли в окружающей среде и требует степени защиты электрических машин не ниже IP54.

### **5.1 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 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=6000 В  | U=6000 В                          |   |
| б) мощность                          | P=470 кВт | P=400 кВт                         |   |
| 7. Габариты                          |           | Меньше в 2 раза                   |   |
| 8. Масса                             |           | Легче в 2 раза                    |   |

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 2 Коэффициент весомости критериев

|                          |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Номер критерия           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
| Коэффициент<br>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 3 – качественные характеристики электроприводов

| Номер варианта | Групповой критерий |     |     |     |     |     |     | Общая оценка<br>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 3 видно, что выбранные качественные характеристики обеспечиваются в варианте II.

## 5.2 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:

$$НГУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i,$$

где

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

$\Pi_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 4 – Весовые коэффициенты НГУ

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

Таблица 5 – Шкала оценки новизны

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



Таблица 6 – Значимость теоретических уровней

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

Таблица 7 -Возможность реализации по времени и масштабам

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

$$k_1 = 0.6, P_1 = 6, k_2 = 0.4, P_2 = 7,$$

$$k_3 = 0.2, P_3 = 10, k_4 = 0.2, P_4 = 4.$$

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

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.

### 5.3 Планирование проектных работ

Планирование проекта – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а так же 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 8 – Типовое содержание проектных работ

| Содержание работ  | Продолжительность работ, ожид/день |            |                 | Исполнители |
|---|------------------------------------|------------|-----------------|-------------|
|   | $t_{\min}$                         | $t_{\max}$ | $t_{\text{ож}}$ |             |
| <b>1. Подготовительные работы</b>   |                                    |            |                 |             |
| 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.      |
| <b>ИТОГО 1 этап</b>   |                                    |            | <b>33</b>       |             |
| <b>2. Экспериментальные работы</b>  |                                    |            |                 |             |
| 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.      |
| <b>ИТОГО 2 этап</b>   |                                    |            | <b>101</b>      |             |
| <b>3. Заключительные работы</b>   |                                    |            |                 |             |
| 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.      |
| 16. Сдача проекта   | 1                                  | 1          | 1               | РП, И.      |
| <b>ИТОГО 3 этап</b>   |                                    |            | <b>86</b>       |             |
| <b>ИТОГО</b>  |                                    |            | <b>220</b>      |             |

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 = 220, которые требуются на выполнение данного проектирования.

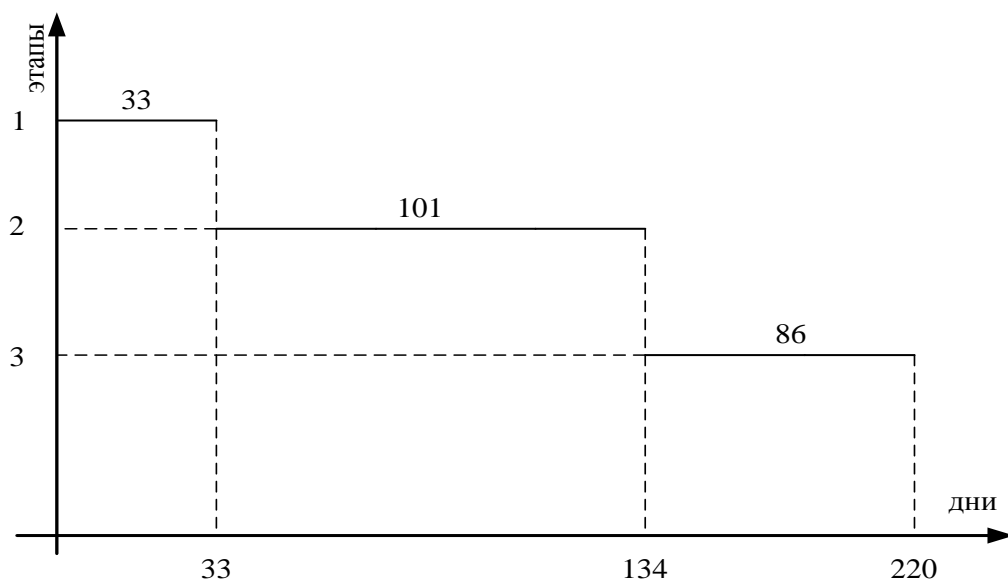


Рисунок 5.1 – график выполнения работ по дням

#### 5.4 Расчет сметы затрат на проектирование.

Расчет сметы затрат на выполнение проекта, рекомендуется осуществлять методом сметных калькуляций по отдельным статьям расходов, всех видов необходимых ресурсов.

Таблица 9 - Заработная плата научно-производственного персонала

| Квалификация рабочего | Тарифная ставка (Тс) руб./час | Премия (Пр.) 50% | Районный коэффициент 30% | Всего, руб./час | Всего часов | Всего начислено, руб. |
|-----------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| Руководитель проекта  | 210                           | 105              | 63                       | 378             | 1752        | 662256                |
| Инженер               | 190                           | 95               | 57                       | 342             | 1752        | 599184                |
| ИТОГО                 |                               |                  |                          |                 |             | 1261440               |

Таблица 10 - Смета затрат на проектирование

| Статьи расхода  | Сумма     | Примечания   |
|---|-----------|--|
|   | руб       |  |
| 1. Материалы, покупные п/ф и комплектующие изделия                    | 41000     | ПК для проектирования                                    |
| 2. Специальное оборудование   | 38000     | Стенды, приборы, установки.                              |
| 3. Основная заработная плата научно-производственного персонала       | 1261440   | Трудоемкость нормо-д, Стоимость 1-го нормо-д. из табл. 9 |
| 4. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала | 126144    | 10% от ст.3  |
| 5. ЕСН  | 416275,2  | 30%( ст.3+ст.4)  |
| 6. Расходы на научные и производственные командировки                 | 111006,72 | 8% от(ст.3+ст.4)   |
| 7. Накладные расходы  | 1009152   | 80% от ст.3  |
| 8. Плановая прибыль   | 168780,67 | 6% от (ст.3+4+5+7)                                       |
| 9. Годовая сметная стоимость проекта                                  | 3171799   |  |

### 5.5 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.

Таблица 11 – Смета затрат капитальных вложений на реализацию проекта

|   | Кол-во | Цена, руб | Общая стоимость, руб |
|---|--------|-----------|----------------------|
| I. Оборудование:  |        |           |                      |
| Электродвигатель АК4-400ХК-4УЗ <sup>1</sup>                               | 1      | 623000    | 623000               |
| Преобразователь ATV1200-A570-6060 <sup>2</sup>                            | 1      | 962787    | 962787               |
| Пуско-регулирующая аппаратура (20% стоимости некомплектного оборудования) |        | 192682    | 192682               |

|  |  |           |            |
|--|--|-----------|------------|
| II. Стоимость монтажных и пусконаладочных работ, в % от I.<br>Комплектный привод (6%)<br>Некомплектный (15%) |  | 266770,35 | 266770,35  |
| III. Транспортно-заготовительные расходы 2%(I+II)  |  | 40904,8   | 40904,8    |
| IV. Плановые накопления монтажной организации (10%) от II  |  | 26677,04  | 26677,04   |
| V. Сметная стоимость проектно конструкторских работ  |  | 3171799   | 3171799    |
| Всего затрат   |  |           | 5284620,19 |

<sup>1</sup>[http://ekb.pulscen.ru/products/elektrodivigateli\\_ak4\\_400khk\\_4u3\\_400kvt\\_1500ob\\_min\\_6000v\\_14945813](http://ekb.pulscen.ru/products/elektrodivigateli_ak4_400khk_4u3_400kvt_1500ob_min_6000v_14945813)

<sup>2</sup><http://www.re-drive.ru/price/invert>

Были рассчитаны капитальные вложения необходимые для реализации проекта с учетом цен действительных на 27 апреля 2018 года.

## 5.6 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:

$$W_{\text{сил.эн}} = \frac{P_{\text{уст}} \cdot F_{\text{д}} \cdot k_{\text{м}} \cdot k_{\text{в}} \cdot k_{\text{з}}}{k_{\text{дв}} \cdot k_{\text{с}}},$$

$$W_{\text{сил.эн}} = \frac{400 \cdot 4500 \cdot 0,65 \cdot 0,7 \cdot 0,8}{0,94 \cdot 0,93} = 749500 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

где

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

$F_d$  – действительный годовой фонд времени работы оборудования, час;

$k_m$  – коэффициент одновременного использования электродвигателей (0.6–0.7);

$k_v$  – коэффициент использования оборудования по машинному времени (0.6–0.8);

$k_z$  – средний коэффициент загрузки оборудования (0.7–0.8);

$k_c$  – коэффициент, учитывающий потери в сети (0.92–0.95);

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

Затраты на силовую энергию в денежном выражении рассчитывается:

$$C_{эл} = W_{сил\ эн} \cdot C_э,$$

где  $C_э$  – стоимость одного кВт·часа электроэнергии для промышленных предприятий.  $C_э$  - одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию составляет 3,25руб/кВт·ч для Томской области., введённый с 1 января 2018г.

$$C_{эн} = 749500 \cdot 3,25 = 2435875 \text{руб}$$

#### Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления рассчитываются на основе норм амортизации

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

где

$K$  – капитальные вложения в электрооборудование;

$H_A$  – проценты отчислений на амортизацию.

– Электродвигатели – 9.6%

$$A_{год} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 623000 \cdot 0.096 = 59808.$$

– Преобразователи – 3.5%

$$A_{год} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 962787 \cdot 0.035 = 33698.$$

– Электропривод – 9.6%

$$A_{год} = K \cdot \frac{H_A}{100} = 2604786 \cdot 0,096 = 250059,456.$$

Оборудование электроприводов (электродвигатели, генераторы, трансформаторы и т.д.) является ремонтируемым. Оно подвергается планово-

предупредительным ремонтам, периодичность и объем которых регламентируется системой ППР и сетей промышленной энергетики.

#### 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;

$C_{\text{м}}=84$  руб·час – стоимость материалов для ремонта (= основная зарплата без доплат);

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

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

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

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 12 – Нормы трудоемкости ремонта электропривода

| Мощность, кВт | Норма трудоемкости, чел-ч                  |                  |                           |
|---------------|--|------------------|---------------------------|
|               | Капитального ремонта без перемотки обмоток | Текущего ремонта | Технического обслуживания |
| 321-400       | 102  | 40               | 25                        |

Таблица 13 – Затраты на ППР электропривода

|  | Норма трудоемкости, чел-ч | Периодичность   | Затраты на ППР электропривода в час | Затраты на ППР электропривода |
|--|---------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Капитального ремонта без перемотки обмоток | 102                       | Раз в 2 года    | 415,2                               | 42350,4                       |
| Текущего ремонта                           | 40                        | Раз в 6 месяцев | 415,2                               | 16608                         |
| Технического обслуживания                  | 25                        | Раз в месяц     | 415,2                               | 10380                         |



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

Таблица 14–Затраты на ППР электропривода в год

|  | Затраты на ППР электропривода<br>в год |
|--|--|
| Капитального ремонта без перемотки обмоток | 21175,2                                |
| Текущего ремонта                           | 33216                                  |
| Технического обслуживания                  | 124560                                 |
| <b>Итого</b>                               | <b>178951,2</b>                        |

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

Таблица 15 – Эксплуатационные расходы

| <b>Вид расходов</b>        | <b>Величина расходов, руб</b> |
|----------------------------|-------------------------------|
| Расходы на эл. энергию     | 2435875                       |
| Амортизационные отчисления | 343565,6                      |
| Затраты на ППП             | 178951,2                      |
| <b>Всего расходов</b>      | <b>2958391,8</b>              |

В данной части ВКР был экономически обоснован выбор электропривода с асинхронным двигателем и преобразователем частоты, 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.

Выбранный электропривод является более экономически выгодным так как имеет более высокие эксплуатационные показатели в сравнении с заменяемым приводом. Это выражается в отсутствии быстроизнашивающихся частей (щёточный аппарат) и более современной элементной базе, позволяющей производить ремонт и обслуживание электропривода в разы быстрее. Так же, немаловажным является мощность привода, которая при тех же нагрузочных характеристиках составляет 1,5 кВт, что на 25% ниже заменяемого привода. Что напрямую влияет на возможность снижения эксплуатационных расходов.

Так же стоит отметить экономию электроэнергии, которая достигается путем регулирования электропривода, плавным пуском и возможностью регулировать частоту двигателя.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|         |                               |
|---------|-------------------------------|
| Группа  | ФИО                           |
| 3-5ГЗА1 | Михеев Владислав Владимирович |

|                     |                                |                           |                                       |
|---------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Школа               | Инженерная школа<br>энергетики | Отделение                 | Электроэнергетика и<br>электротехника |
| Уровень образования | Бакалавриат                    | Направление/специальность | Электроэнергетика и<br>электротехника |

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

|  |  |
|--|--|
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения | Асинхронный электропривод насоса прямой подачи подкачивающей насосной станции, применяемой для повышения давления теплоносителя до рабочих значений. |
|--|--|

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

|   |   |
|---|---|
| <b>1. Производственная безопасность</b><br>1.1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды.<br><br>1.2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды. | 1. Микроклиматические параметры<br>2. Повышенный уровень вибрации<br>3. Повышенный уровень шума<br>4. Недостаток необходимого освещения<br><br>1. Движущиеся машины и механизмы<br>2. Поражение электрическим током<br>4. Пожар |
| <b>2. Экологическая безопасность:</b>   | 1. Охрана окружающей среды.<br>2. Мероприятия по утилизации отходов.  |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>  | 1. Возможные ЧС<br>2. Пожар.  |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>  | Возрастное ограничение, требования к образованию. Специальные нормы, предусмотренные спецификой выполняемых работ.<br>Организация и оснащение рабочего места.   |

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

**Задание выдал консультант:**

|           |                               |                           |         |      |
|-----------|-------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Должность | ФИО                           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
| Ассистент | Мезенцева Ирина<br>Леонидовна |                           |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

|         |                               |         |      |
|---------|-------------------------------|---------|------|
| Группа  | ФИО                           | Подпись | Дата |
| 3-5ГЗА1 | Михеев Владислав Владимирович |         |      |

## 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### Введение

В данной квалификационной работе разработан электропривод подкачивающего насоса типа 300Д90. Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов труда электромонтёра по ремонту и обслуживанию электроустановок подкачивающей насосной станции (далее ПНС), где будет внедрен электропривод, разработка мер защиты от этих факторов, оценка условий труда и микроклимата рабочей среды. Кроме того, в разделе рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даются рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

### 6.1 Производственная безопасность

**Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования**

#### Микроклиматические параметры

На насосной станции в процессе работы возможно воздействие на человека (электромонтёра) следующих факторов, относящихся к вредным в соответствии с [1]:

микроклимат ;

повышенная вибрация;

повышенные уровни шума;

недостаток естественного света;

ПНС – 2 относится ко 2 классу по микроклимату и к категории 2а. Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений указаны в таблице 16 .[2]

Таблица 16.

| Период года | Категория работ по уровням энергозатрат(к кал/ч) | Температура воздуха, °С |       | Относительная влажность воздуха, % |       | Скорость движения воздуха, м/с |      |
|-------------|--|-------------------------|-------|------------------------------------|-------|--------------------------------|------|
|             |  | Опт.                    | Доп   | Опт.                               | Доп.  | Опт.                           | Доп. |
| Теплый      | 2а (151-200)                                     | 20-22                   | 18-27 | 60-40                              | 15-75 | 0,2                            | 0,4  |
| Холодный    | 2а (151-200)                                     | 19-21                   | 17-23 | 60-40                              | 15-75 | 0,2                            | 0,3  |

| Период года | Категория работ по уровням энергозатрат (к кал/ч) | Температура воздуха, °С |      | Относительная влажность воздуха, % |      | Скорость движения воздуха, м/с |      |
|-------------|---|-------------------------|------|------------------------------------|------|--------------------------------|------|
|             |   | Опт.                    | Доп. | Опт.                               | Доп. | Опт.                           | Доп. |
|             |   |                         |      |                                    |      |                                |      |

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 22°С [2].

Содержание пыли в воздухе рабочего помещения ниже установленной нормы, по которой предельно-допустимая концентрация составляет более 10 мг/м<sup>3</sup>.

### **Повышенный уровень вибрации**

Одним из важных моментов в работе оборудования является его вибрация, в результате не сбалансированности его узлов, элементов или особенности конструкции.

По источнику возникновения вибрации ПНС относится к общей вибрации 3 категории – технологическая вибрация. При действии на организм общей вибрации страдает в первую очередь нервная система и анализаторы: вестибулярный, зрительный, тактильный. Эти нарушения вызывают головные боли, головокружения, нарушения сна, снижение работоспособности, ухудшение самочувствия, нарушения сердечной деятельности, расстройство зрения, онемение и отечность пальцев рук, заболевание суставов, снижение чувствительности. Допустимые значения вибраций не должны превышать установленных значений [3].

### **Повышенный уровень шума**

Насосные установки являются источниками шума. Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот и уровней звука на рабочих местах приведены в таблице 17. [4]

Таблица 17.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот.

| Рабочее место            | Уровни звукового давления дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами |     |     |     |      |      |      |      | Уровни звука, дБА |
|--------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------------|
|                          | 63  | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |                   |
| Постоянные рабочие места | 95  | 87  | 72  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   | 80                |

Для обеспечения допустимого уровня шума применяются следующие меры безопасности [5]:

- разработкой шумобезопасной техники;
- применением средств и методов коллективной защиты ;
- применением средств индивидуальной защиты

### **Недостаток необходимого освещения**

В процессе работы на обслуживающий и ремонтный персонал влияет фактор пониженного освещенности рабочего места. Неудовлетворительное освещение может вызывать утомление всего организма в целом. Освещение должно обеспечивать работу без напряжения зрения.

Освещенность помещений насосной станции должна соответствовать виду производимых работ: в помещении с пультом управления - зрительной работе средней точности, а в прочих помещениях - малой точности.

Нормативы освещенности на рабочих местах приведены в таблице 18.

Таблица 18.

Нормативы освещенности на рабочих местах [6].

| Характеристика зрительной работы | Минимальный размер объекта | Разряд зрительной работы | Контраст объекта с фоном | Характеристика фона | Искусственное освещение, лк | Естественное освещение КЕО, % | Совместное освещение КЕО, % |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Средней точности                 | 0.5.1.0                    | IVв                      | средний                  | средний             | 400                         | 4                             | 2.4                         |
| Малой точности                   | 1.0.5.0                    | Vв                       | средний                  | средний             | 150                         | 3                             | 1.8                         |

### **1.2. Анализ опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования**

При эксплуатации насосной установки возможно воздействие на человека следующих опасных производственных факторов:

- наличие вращающихся частей ;
- возможность поражения электрическим током;
- пожар

## **Движущиеся машины и механизмы**

Движение механизмов и узлов оборудования представляет опасность для персонала. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала вращающиеся части электродвигателей и насосов должны быть закрыты защитными кожухами, так же используются оградительные устройства, информационные плакаты, сигнальные ленты и так далее согласно [7].

## **Поражение электрическим током**

Применяемое в производственном процессе электрооборудование напрямую влечет за собой возможность поражения электрическим током, последствия которого могут быть представлены в виде ожогов участков кожи тела, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон, электролиза крови, и как следствие, нарушения нормального функционирования организма и возможной гибели работников. Персонал должен быть обеспечен защитными средствами: изоляционными перчатками, изоляционными галошами и ковриками, а также строго следовать инструкции электробезопасности.

Электробезопасность должна обеспечиваться в соответствии с Правилами технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ) и Правилами технической безопасности при эксплуатации электроустановок (ПТБ).

ПНС относится ко 2 – ой категории опасности: Помещения с повышенной опасностью: сырые, в которых при нормальных условиях влажность временно может повышаться до насыщения, как, например, при резких изменениях температуры или при выделении большого количества пара;

До начала работы на электроустановках насосной станции и в процессе ее выполнения необходимо выполнять организационные и технические мероприятия, обеспечивающие безопасность труда.

Работы в действующих электроустановках подразделяются в отношении принятия мер безопасности на три категории:

1. Со снятием напряжения с токоведущих частей.
2. Под напряжением на токоведущих частях с применением электротехнических средств.
3. Без снятия напряжения на нетоковедущих частях.

В случае аварийной ситуации при работе электроустановок насосной станции возможно появление напряжения на металлических шкафах электрооборудования, электродвигателях и металлических частях пульта управления и других нетоковедущих частях. Для защиты

обслуживающего персонала корпуса шкафов управления и прочего электрооборудования заземляются, а двигатели - зануляются.

### **Пожар.**

Понятие пожарной безопасности означает состояние объекта, при котором исключается возможность пожара, а в случаях его возникновения предотвращается воздействие на людей опасных факторов пожара и обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность регламентируется [8].

Опасными факторами пожара для людей являются открытый огонь, искры, повышенная температура воздуха, токсичные продукты горения, дым, пониженная концентрация кислорода, обрушение и повреждение зданий, сооружений, установок, а также взрыв.

Возможные причины пожара на ПНС:

- воспламенение промасленной ткани, бытового мусора
- умышленный поджог

Для предотвращения пожара необходимы следующие меры:

- а) предотвращение образования горючей среды;
- б) предотвращение образования в горючей среде источников зажигания;
- в) поддержание температуры и давления горючей среды ниже допустимых;
- г) уменьшение определяющего размера горючей среды.

Согласно [9] насосная станция относится к производствам категории Д, характеризующимся наличием негорючих веществ и материалов в холодном состоянии.

При коротких замыканиях, перегреве и т.п. возможно загорание электропроводки, электроустановок. Для тушения пожара в таких условиях необходимо применять специальные средства, невозможно использовать воду и другие токопроводящие вещества. Поэтому помещения насосной станции должны быть оборудованы средствами для тушения электропроводок и электроустановок под напряжением. Применяемый тип огнетушителей: ОУ-10 (огнетушитель углекислотный).

## **6.2 Экологическая безопасность**

### **Охрана окружающей среды**

В данной выпускной квалификационной работе определена оценка воздействий и установлены мероприятия по снижению негативного воздействия при эксплуатации водоперекачивающей насосной станции и участками магистрального и технологического трубопроводов.



При эксплуатации объекта установлены основные виды воздействий проектируемого объекта:

физическое наличие объекта (сооружение и эксплуатация объекта) влияет на гидрологию, климат, социально-экономические условия жизни, природопользование местного населения;

химические вещества, пыль, твердые бытовые отходы загрязняют компоненты окружающей среды (воздух, воду, водные биоресурсы, почвы, растительность), воздействуют на биопродуктивность водоемов и здоровье населения;

шум, вибрация, электромагнитное излучение воздействуют на компоненты окружающей среды;

динамическое воздействие движущихся машин и механизмов на людей, животных, растительность, почву.

Мероприятиями по снижению интенсивности загрязнения атмосферного воздуха создание препятствий на пути распространения и их очисткой разными методами:

Физико-химическими – для сварочных работ применение устройств для сбора и очистки газов (местных отсосов).

Биологическими – сохранение и создание полос озеленения вокруг объекта.

Мероприятиями по снижению негативного шумового воздействия являются сохранения природных, создание искусственных препятствий для снижения уровня шума.

#### **Мероприятия по утилизации отходов**

В разделе охраны окружающей среды при складировании (утилизации) отходов промышленного производства выявляются источники образования отходов потребления и производства, мероприятия по их утилизации. К таковым источникам относятся горюче-смазочные материалы, металлолом, бытовые отходы. В качестве мероприятий по утилизации всех видов отходов предусматривается их вывоз на площадки хранения ТБО, повторная переработка ГСМ, металлолома, а так же демеркуризацию ртути содержащих предметов (ламп, термометров и тд.).

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Насосные станции в соответствии с требованиями постановления Правительства Российской Федерации от 19.09.98 N 1115 "О порядке отнесения организаций к категориям по гражданской обороне" отнесены к категорийным объектам по гражданской обороне.

Доведение сигналов оповещения ГО и в случае ЧС до персонала объектов осуществляется с помощью речевой информации по каналам радиовещания, по радиотрансляционным сетям и сетям связи. Электроснабжение основных электроприемников объектов

предусматривается по I категории надежности от двух независимых источников. Проектные решения по предупреждению чрезвычайных ситуаций выбираются согласно [10]. На территории насосных станций не используют, не производят, не перерабатывают, не хранят радиоактивные, пожаро-, а так же взрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации. В качестве наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций техногенного характера проектом рассматриваются:

- пожар на территории объектов;

- ЧС при постороннем вмешательстве в деятельность объектов. Население, которое может оказаться в зоне действия поражающих факторов в случае аварии на объектах, отсутствует. Для обеспечения нормальной работоспособности объекта при ЧС приняты следующие меры безопасности:

- Установлен генератор для обеспечения резервного электрического питания

- наличие запасов питьевой воды.

#### **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

К работе допускаются только обученные и аттестованные лица не моложе 18 лет, имеющие профильное образование, годные по состоянию здоровья, что должно быть подтверждено результатами медицинского освидетельствования. Согласно ст. 117 ТК РФ оператору предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в силу условий труда, минимальная продолжительность которого составляет 7 календарных дней. Каждые три месяца для работников, обслуживающих электроустановки, производится общий инструктаж по технике безопасности, каждый год — проверка знаний «Правила ПТЭ и ПТБ электроустановок» с соответствующей записью в журнале проверки знаний ПТЭ и ПТБ и выдачей специального удостоверения.

#### **Организация рабочего места**

Рабочие места, объекты, проезды и подходы к ним, проходы и переходы в темное время суток должны быть освещены. Искусственное освещение выполняется в соответствии с требованиями «Правил устройства электроустановок» и строительных норм и правил, установленных СН 245-71, СН 433-79 и СНиП 23-05-95. Объекты, для обслуживания которых требуется подъем рабочего на высоту до 0,75 м, оборудуются ступенями, а на высоту выше 0,75 м – лестницами с перилами. Работы, связанные с опасностью падения работающего с высоты должны проводиться с применением предохранительного пояса. Открывать дверцы ограждений или снимать ограждения следует после полной остановки оборудования или механизма. Пуск оборудования или механизма разрешается только после установки на место и надежного закрепления всех съемных частей ограждения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В соответствии с заданием на дипломный проект был разработан электропривод и система автоматического управления насосной установки.

Применение регулируемого привода увеличивает срок службы двигателя привода насоса и обеспечивает требуемую подачу воды и соответствующий ей расход электроэнергии. Используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и с комплектным преобразователем частоты.

При применении предлагаемой автоматизированной системы управления на предприятиях и в жилищно-хозяйственных организациях основной экономический эффект достигается за счет:

снижения расхода энергоносителя;

улучшения качества водоснабжения.

В результате исследования динамических характеристик реальной системы насосной установки при свойственных ей внешних воздействиях при помощи программы SIMULINK из прикладного пакета MATLAB 7.1 была проверена работоспособность насосной установки при двух способах регулирования, а именно: скалярный и векторный.

Исследования показали, что при векторном способе управления на низких частотах, при разгоне и торможении, характеристики момента и тока имеют незначительные колебания, в то время как при скалярном управлении, на низкой частоте происходят большие всплески колебаний момента и тока, что негативно сказывается на всей системе электропривода, проанализировав работу сделан вывод, что для данной системы подходит векторное управление.

Результаты работы удовлетворяют заданию проекта. Таким образом, основная цель дипломного проекта была выполнена.

## CONCLUSION

According to a task for the degree project the electric drive and the system of automatic control of pump installation have been developed.

Use of the adjustable drive increases service life of the engine of the drive of the pump and provides the required water supply and the electric power expense corresponding to it. The asynchronous engine with a short-circuited rotor and with the complete converter of frequency is used.

At application of the offered automated control system at the enterprises and in the housing and economic organizations the main economic effect is reached for the account:

decrease in an expense of the energy carrier;

improvements of quality of water supply.

As a result of a research of dynamic characteristics of real system of pump installation at external influences peculiar to her by means of the SIMULINK program from an applied MATLAB 7.1 package the operability of pump installation at two ways of regulation has been checked, namely: scalar and vector.

Researches have shown that at a vector way of management at low frequencies, at dispersal and braking, characteristics of the moment and current have insignificant fluctuations while at scalar management, at a low frequency there are big surges in fluctuations of the moment and current that negatively affects all system of the electric drive, having analysed work the conclusion is drawn that vector management is suitable for this system.

Results of work satisfy to a project task. Thus, the main objective of the degree project has been executed.

### Список использованных источников

1. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебное пособие для вузов / И. И. Алиев. — М.: Высшая школа, 2000. — 255 с.
2. Алиев И. И. Электротехнический справочник. — М.: ИП РадиоСофт, 2000. — 384 с.
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. — М.: "Академия", 2004.
4. Дьяконов В. П. *MATLAB 7/7.1+ Simulink 4/5* : Основы применения : Полное руководство пользователя. — М. : СОЛОН-Пресс, 2002. — 768 с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 560 с.
6. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электропроводах. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. — 172 с.
7. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. — М.: Издательский центр "Академия", 2006. — 272 с.
8. Электродвигатели асинхронные. Справочник / В.Л. Лихачев. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 304 с.
9. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. — М.: Издательский центр "Академия", 2005. — 304 с.
10. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. — Изд. 2-е, перераб. и дополн. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 156 с.

11. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 164 с.

12. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 448 с.

13. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления асинхронных частотно-регулируемых электроприводов: учебное пособие.– Томск: Изд. ТПУ, 2011. – 476с.

14. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с

15. Л.А.Одинцова. Планирование на предприятии: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Л.А.Одинцова. 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 272 с.

16. ГОСТ 12.1.019-79 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

17. Правила устройства электроустановок. Издание 7, Москва 1999 г.

18. ГОСТ 12.4.051-87 Средства индивидуальной защиты органа слуха

19. ГОСТ 12.1.003-83 Шум. Общие требования безопасности

20. ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума

21. НПБ 105-03 Определение категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности

22. ГОСТ 12.4.125-83 Средства коллективной защиты работающих от воздействия механических факторов. Классификация

23. ГОСТ 12.1.033-81 Пожарная безопасность. Термины и определения

24. ГОСТ 12.1.012-90 Вибрационная безопасность. Общие требования

25. СНиП2.01.51-90 Инженерно–технические мероприятия гражданской обороны

26. ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы.

Классификация

27. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

28. Б.А. Тихонов, А.Г. Дашковский, Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех специальностей. Томск, изд. ТПУ, 2005. - 12 с.

29. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение

30. ГОСТ 12.4.221-2002 Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты.

31. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

32. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.»

33. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования.

34. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.

35. СП 51.13330.2011. Защита от шума.

36. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений.

37. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

38. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

39. НПБ 105-03 нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений и зданий по взрывоопасной и пожарной опасности

40. ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.