

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

Институт Энергетический
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра ЭПЭО

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|--|
| Электропривод погружного насоса FP129/5 |

УДК 62-83 622 53

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------|---------|------|
| 5ГМ5Б | Суровец Алексей Дмитриевич | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Зав. кафедрой | Дементьев Ю.Н. | К.Т.Н | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|---------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель кафедры Менеджмента | Кузьмина Н.Г. | | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ЭБЖ | Дашковский А.Г. | К.Т.Н | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ЭПЭО | Дементьев Ю.Н. | | | |

Томск – 2017 г.

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

Институт - Энергетический
Направление подготовки - Электроэнергетика и электротехника
Кафедра - Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Ю.Н. Дементьев
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|----------------------------|
| 5ГМ5Б | Суровец Алексей Дмитриевич |

Тема работы:

| |
|---|
| Электропривод погружного насоса |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) |

| | |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | |
|--|--|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|--|
| <p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <ul style="list-style-type: none">• модернизации реального электропривода погружного насоса FP129/5 системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена .;• модернизация асинхронного нерегулируемого электропривода погружного насоса поз. FP129/5 с приводным двигателем АИР180М2 с перспективой последующего интегрирования в автоматизированную систему по поддержанию производительности погружного насоса на уровне $Q=120$ м³/ч при давлении $p=21.5$ кг·с/см²;• разработать схемные решения по построению электропривода погружного насоса<ul style="list-style-type: none">• имитационные исследования работы электропривода:- имитационная модель для исследования регулируемого электропривода- имитационное исследование работоспособности регулируемого электропривода- имитационное исследование работы регулируемого электропривода в режиме токоограничения |
|---|--|

| | |
|--|--|
| <p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>Обзор технической литературы по теме технологический процесс системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линии экструзии. Обзор способов управления. Моделирование асинхронного электропривода. Технические решения по построению электропривода погружного насоса Исследования электропривода погружного насоса. Заключение</p> |
|--|--|

| | |
|--|---|
| <p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <p>1. Функциональная и структурная схемы. 2. Имитационная модель. 3. Результаты исследований.</p> |
|--|---|

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

| Раздел | Консультант |
|---|-----------------|
| «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» | Кузьмина Н.Г. |
| «Социальная ответственность» | Дашковский А.Г. |
| Раздел на иностранном языке | Баластов А.В. |

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение; обзор литературы по вопросу отказоустойчивого электропривода; составление математической модели отказоустойчивого двухсекционного электропривода; заключение.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Зав. Каф. | Дементьев Ю.Н. | Кандидат технических наук | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------|---------|------|
| 5ГМ5Б | Суровец Алексей Дмитриевич | | |
| | | | |

РЕФЕРАТ

Представленная магистерская диссертация содержит: 101 страницу машинописного текста, 23 таблицы, 32 рисунка, 20 использованных источников, 5 приложений.

Магистерская диссертация посвящена вопросам модернизации реального электропривода погружного насоса *FP129/5* системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена .

Ключевые слова: погружной насос, асинхронный частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, коррекция вольт-частотной характеристики, регулятор ограничения тока, искусственные механические характеристики, искусственные электромеханические характеристики, имитационное исследование.

Цель работы: модернизация асинхронного нерегулируемого электропривода погружного насоса поз. *FP129/5* с приводным двигателем АИР180М2 с перспективой последующего интегрирования в автоматизированную систему по поддержанию производительности погружного насоса на уровне $Q=120$ м³/ч при давлении $p=21.5$ кг·с/см².

Работа выполнена в текстовом редакторе *Microsoft Office Word 2007* с использованием пакета программ: *MATLAB 7.11.0 R2010b*, *MathCAD 14*, *КОМПАС-3D V13*, *Microsoft Office Visio 2007*, *MathType 6* на белой бумаге формата А4.

Оглавление

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ | 8 |
| 1.1. Технологический процесс системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линии экструзии P129 | 8 |
| 1.2. Параметры погружного насоса | 12 |
| 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА | 13 |
| 2.1. Обоснование выбора частотно-регулируемого электропривода | 13 |
| 2.2. Выбор способа и закона частотного регулирования | 18 |
| 2.3. Функциональная схема регулируемого электропривода | 19 |
| 3. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА | 24 |
| 3.1. Выбор приводного электродвигателя погружного насоса | 24 |
| 3.2. Расчетная схема замещения механизма | 26 |
| 3.3. Расчет дополнительных параметров электродвигателя | 27 |
| 3.4. Расчет параметров схемы замещения электродвигателя | 28 |
| 3.5. Механические характеристики погружного насоса | 34 |
| 3.6. Расчет естественных характеристик приводного электродвигателя | 35 |
| 4. СИЛОВАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА .. | 40 |
| 4.1. Выбор преобразователя частоты | 40 |
| 4.2. Расчет искусственных механических и электромеханических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель | 41 |
| 4.3. Принципиальная электрическая схема регулируемого электропривода. Выбор силового электрооборудования | 50 |
| 4.4. Структурная схема силового канала регулируемого электропривода | 56 |
| 4.5. Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода | 59 |
| 5. РАСЧЕТ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА. ВЫБОР ДАТЧИКОВ | 62 |
| 6. ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА ... | 63 |
| 6.1. Имитационная модель для исследования регулируемого электропривода | 63 |
| 6.2. Имитационное исследование работоспособности регулируемого электропривода | 63 |
| 6.3. Имитационное исследование работы регулируемого электропривода в режиме токоограничения | 63 |
| 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. | 64 |
| 7.1 Планирование работ и их временных оценок. | 64 |
| 7.2 Расчет сметы затрат на исследование. | 68 |
| 7.3 Расчёт материальных затрат. | 68 |
| 7.4 Расчёт затрат амортизации. | 68 |
| 7.5 Расчёт затрат на заработную плату | 69 |
| 7.6 Затраты на социальные отчисления. | 70 |
| 7.7 Накладные расходы. | 71 |
| 7.8 Определение общего бюджета затрат на научно-исследовательскую работу. | 71 |

| | |
|---|-----|
| 7.9 Смета необходимых материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования..... | 72 |
| 8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ..... | 74 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 74 |
| 8.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов..... | 74 |
| 8.2. Производственная санитария..... | 77 |
| 8.3. Расчет защитного заземления помещения линии экструзии Р129..... | 80 |
| 8.4. Пожарная безопасность..... | 83 |
| 8.5. Охрана окружающей среды и экологическая безопасность..... | 85 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 87 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 89 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 92 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 101 |

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа представляет собой анализ эффективности производственного оборудования и конкретные предложения по модернизации этого оборудования на примере электропривода погружного насоса поз. *FP129/5*.

Погружной насос – насос, погружаемый в технологические емкости, буровые скважины и т.п. ниже уровня перекачиваемой жидкости. Это обеспечивает подъем жидкости с большой глубины, хорошее охлаждение узлов насоса, и позволяет поднимать жидкости с растворенным в ней газом.

В связи с необходимостью модернизации технологического оборудования, а также средств управления и контроля технологическими процессами для увеличения мощности выработки конечных продуктов (полипропилен и полиэтилен) появляется потребность во внедрении современных систем управления промышленными установками и технологическими комплексами. Внедрение современных комплексов и систем позволит увеличить такие показатели как: срок службы оборудования, энергоэффективность и уровень автоматизации.

При преобразовании порошка полипропилена в товарный гранулированный вид, определением технико-экономической рентабельности и надежности работы установки является эффективность использования погружных насосов систем охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линий экструзии. В дополнение к требованию экономичности и высокой надежности к ним предъявляют и специфические требования, работа при высокой температуре и давлении различных теплоносителей, возможность работы на переменных режимах, а так же длительный режим эксплуатации [1].

Электропривод погружного насоса требует плавный пуск, т.к. производственный механизм работает в продолжительном режиме [2].

Для достижения более качественного уровня технологического процесса охлаждения и транспортировки сырья и соответствия вышеизложенным

требованиям, необходимо заменить нерегулируемые электроприводы погружных насосов на регулируемые системы управления данными агрегатами.

Модернизация асинхронного нерегулируемого электропривода погружного насоса поз. *FP129/5* с приводным двигателем АИР180М2 установки гранулирования полипропилена системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена является целью работы.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1.1. Технологический процесс системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линии экструзии P129

Полученные гранулы полипропилена путем экструзии на экструдере фирмы «Вернер-Пфляйдер» типа ZSK-160 поз. P129, предназначенного для пластификации расплава полипропилена с добавками и дальнейшей грануляции продукта, охлаждаются и транспортируются деминерализованной водой, которая циркулирует в замкнутой системе.

В состав системы охлаждения и транспортировки гранул входят:

- заглубленная емкость поз. P129/2;
- погружной насос поз. P129/5;
- два корзинчатых фильтра поз. P129/6;
- теплообменник поз. P129/7;
- трехходовой автоматический клапан поз. X3100V-A на трубопроводе гидротранспорта;
- водоотделитель поз. P129/1;
- центробежная сушилка поз. P129/3;
- вентилятор центробежный для отсасывания паров из центрифуги поз. P129/16;
- конденсатосборник поз. P129/33;
- переключатель направления потока гранул поз. P129/17;
- автоматический регулирующий клапан поз. T3101ICSAHL-A на подаче деминерализованной воды в теплообменник поз. P129/7.

Функциональная схема технологического процесса системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена изображена на рисунке 1.

Деминерализованная вода из заглубленной емкости поз. P129/2 погружным насосом поз. P129/5 поступает на один из фильтров поз. P129/6, где очищается от «шелухи» и мелких гранул полипропилена. Второй фильтр –

резервный. После фильтра вода подается в теплообменник поз. *P129/7* на охлаждение. Охлаждение в теплообменнике поз. *P129/7* производится оборотной водой. Температура деминерализованной воды в пределах (45–70) °С поддерживается автоматически поз. *T3101ICSAHL-A*. При повышении температуры воды до 75 °С срабатывает световая сигнализация поз. *T3101ICSAHL-A* на местном щите управления, световая и звуковая сигнализация на центральном пульте управления (ЦПУ) *Q-2*, срабатывает блокировка: остановка экструдера [3]. При снижении температуры до 40 °С срабатывает световая сигнализация поз. *T3101ICSAHL-A* на местном щите управления, световая и звуковая сигнализация на ЦПУ *Q-2*, срабатывает блокировка: остановка экструдера [3]. Главный электропривод экструдера *FP 129* (электропривод шнеков двухшнекового экструдера) не может быть пущен в работу, если температура воды ниже 40 °С.

После теплообменника деминерализованная вода подается в камеру подводного гранулирования через трехходовой автоматический клапан поз. *X3100V-A*, где охлаждает получаемые гранулы полипропилена и транспортирует их в водоотделитель поз. *P129/1*, где большая часть воды (около 80 %) отделяется от гранул и самотеком возвращается в заглубленную емкость поз. *P129/2*. Далее гранулы полипропилена попадают в центробежную сушилку «Гала» поз. *P129/3*, где отделяется остаточная деминерализованная вода. Деминерализованная вода после этого сливается обратно в заглубленную емкость. Влажный воздух из сушилки отсасывается вентилятором поз. *P129/16*, проходит через конденсатосборник поз. *P129/33*. Сконденсировавшаяся вода стекает в заглубленную емкость, а воздух сбрасывается в атмосферу. За тем гранулированный полипропилен транспортируется от линий грануляции из центробежной сушилки *P129/3* к силосам гомогенизации *D139-D152*.

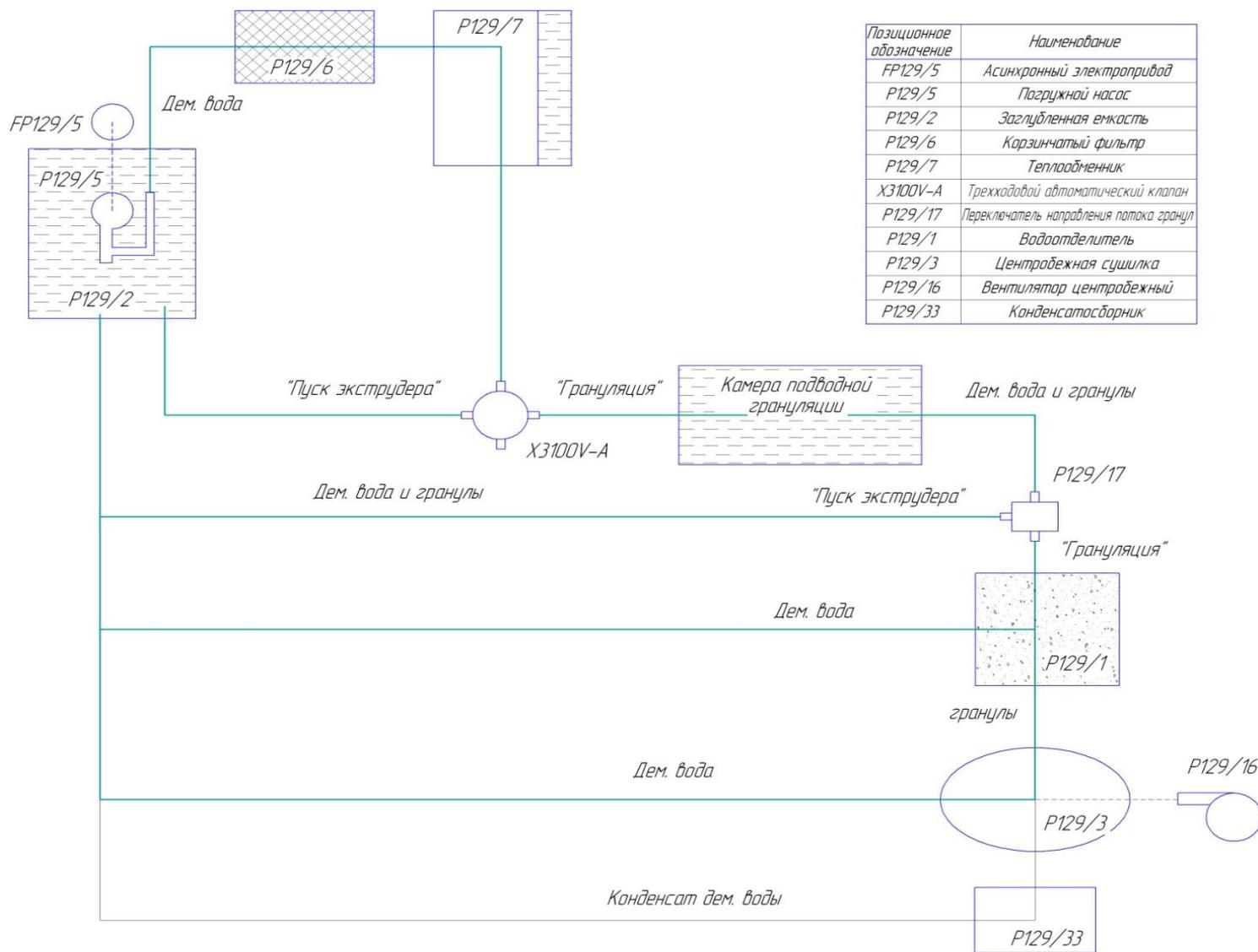
В период пуска экструдера, предусмотрена подача деминерализованной воды через «байпас» (обводной трубопровод технологических установок, применяющийся для транспортировки жидкостей параллельно запорной и регулирующей арматуре), от трехходового клапана поз. *X3100V-A* в

заглубленную емкость поз. P129/2, без подачи в камеру подводного гранулирования. Для подогрева деминерализованной воды до рабочего диапазона (45-70) °С, перед пуском экструдера, в заглубленную емкость поз. P129/2 предусмотрена подача пара давлением 4 кгс/см² вручную [3].

При пуске экструдера P129 охлажденные гранулы транспортируются деминерализованной водой через переключатель направления потока гранул (дроссельный клапан) поз. P129/17 в заглубленную емкость поз. P129/2. После выхода на режим дроссельный клапан поз. P129/17 переводится на водоотделитель поз. P129/1. Мокрые гранулы, вручную, периодически извлекаются из заглубленной емкости и собираются в контейнер.

Расход деминерализованной воды (производительность насосного агрегата) контролируется в пределах (80-120) м³/ч. При уменьшении расхода воды ниже 72 м³/ч срабатывает световая сигнализация на местном щите управления, световая и звуковая сигнализация на ЦПУ Q-2, срабатывает блокировка: останавливается главный электропривод экструдера [3].

Уровень деминерализованной воды в заглубленной емкости поз. P129/2 контролируется в пределах (80-100) %. При уменьшении уровня воды ниже 80 % открывается клапан на линии подпитки деминерализованной воды, при увеличении уровня до 100 % клапан закрывается. При уменьшении уровня воды до 70 % срабатывает световая и звуковая сигнализация на ЦПУ Q-2 [3].



Рисинок 1. Функциональная схема технологического процесса системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена

1.2. Параметры погружного насоса

Технические данные погружного насоса поз. *P129/5* системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Технические данные погружного насоса *P129/5*

| $Q, \text{м}^3/\text{ч}$ | $H, \text{м}$ | $n_{\text{НАС}}, \text{об}/\text{мин}$ | $\eta_{\text{НАС}}, \%$ | $J_{\text{НАС}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ |
|--------------------------|---------------|--|-------------------------|--|
| 120 | 215 | 3000 | 51 | 0.12 |

Кинематическая схема производственного механизма – погружного насоса *FP129/5* представлена на рисунке 2.

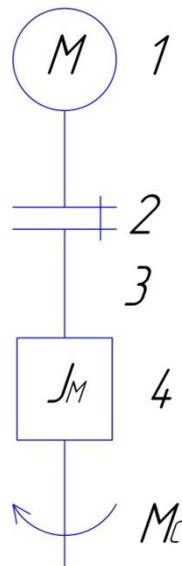


Рисунок 2. Кинематическая схема электропривода погружного насоса *FP129/5*

На рисунке 2 использованы следующие обозначения:

- 1 – *M* – асинхронный электродвигатель;
- 2 – соединительная муфта;
- 3 – вал механизма
- 4 – *J_M* – механизм со своим моментом инерции.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА

2.1. Обоснование выбора частотно-регулируемого электропривода

Существует ряд факторов, которые обуславливают необходимость модернизации нерегулируемого электропривода погружного насоса *FP129/5* системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линии экструзии *P129*:

I. Данная электромеханическая система не позволяет поддерживать определенное давление, предназначенное для технологического процесса транспортировки гранул, в трубопроводе гидротранспорта при разных расходах перекачиваемой деминерализованной воды. А также поддерживать производительность погружного насоса поз. *P129/5* при этом давлении $p=21.5$ кг·с/см².

Следовательно, необходимо создать регулируемый электропривод, на базе которого строится автоматизированная система с обратной связью по давлению для автоматического поддержания данного технологического параметра.

Наиболее современным является регулирование с помощью преобразователя частоты (ПЧ), который позволит плавно регулировать частоту вращения электродвигателя, тем самым регулировать производительность погружного насоса *FP129/5*, и поддерживать заданное давление $p=21.5$ кг·с/см² в гидросистеме при разных расходах перекачиваемой деминерализованной воды. При малых расходах *P129/5* приводной двигатель будет вращаться с малой скоростью, необходимой для поддержания только номинального давления. При увеличении расхода деминерализованной воды преобразователь увеличит частоту вращения электродвигателя, повышая производительность насоса *P129/5* при сохранении заданного давления.

Достоинства управления с помощью ПЧ:

– возможно поддержание производительности погружного насоса *P129/5* $Q=120$ м³/ч при давлении $p=21.5$ кг·с/см² в трубопроводе

гидротранспорта, что является одним из технических требования, предъявляемых к электроприводу *FP129/5*;

- при необходимости возможна регулировка частоты вращения электродвигателя оператором вручную в заданном диапазоне;

- КПД механизма поз. *P129/5* в диапазоне регулирования остается максимальным;

- повышается уровень автоматизации, появляется перспектива интеграции в систему управления более высокого уровня.

II. Погружной насос поз. *P129/5* выбран в расчете на максимальную производительность $Q=120$ м³/ч и оснащен нерегулируемым асинхронным электроприводом поз. *FP129/5*, работающим с постоянной частотой вращения. Тем не менее, *P129/5* работает не постоянно с максимальной нагрузкой. Это происходит: 1) вследствие смены режимов работы экструдера *P129*: в моменты пуска и останова, при переходе на другие марки гранулята полипропилена (смена производительности экструдера поз. *P129* от 2 т/ч до 3 т/ч); 2) исходя от уровня деминерализованной воды в заглубленной емкости поз. *P129/2*. Что приводит к значительным потерям электроэнергии.

Вышесказанное обуславливает необходимость регулирования производительности погружного насоса *P129/5*.

Методы регулирования производительности насосов:

- 1) Изменением характеристики сети (увеличением или уменьшением сопротивления в трубопроводе гидротранспорта).

Примером первого способа регулирования является дросселирование – понижение давления газа или жидкости при прохождении их через местное гидродинамическое сопротивление (суженное отверстие, вентиль, кран, пористую перегородку).

Но данный метод обладает существенными недостатками:

- метод не является экономичным;

- КПД в номинальном режиме выше чем КПД после регулирования установки

– эффективен только если требуется только уменьшение подачи

2) Изменением характеристики насосного агрегата, а именно частоты вращения приводного двигателя.

Второй способ заключается в изменении числа оборотов рабочего колеса насосного агрегата. Этот способ позволяет избежать непроизводительных затрат. Технически это может быть реализовано при использовании частотно-регулируемого электропривода. Преимущества частотного регулирования производительности в том, что:

– снижается потребление электроэнергии (как показывает опыт, применение частотно-регулируемого электропривода дает экономию электроэнергии до 30% [4]);

– позволяет исключить дросселирование;

– происходит дополнительное повышение производительности насосного агрегата *P129/5* при увеличении производительности экструдера *P129* при переходе на другой марочный ассортимент гранулята полипропилена.

III. Прямое включение погружного насоса *P129/5* вызывает гидравлический удар в трубопроводе гидротранспорта системы охлаждения и транспортировки гранул. Для предотвращения этого перед пуском насоса машинист гранулирования пластмасс должен закрыть входную заслонку, затем плавно открыть ее, а перед остановом насоса – вновь закрыть, что, в данном случае, повышает роль человеческого фактора в возникновении аварийной ситуации.

Ударная механическая нагрузка на насосный агрегат при прямом пуске ведёт к увеличению зазоров в механических соединениях между двигателем, преждевременному износу соединений «электродвигатель – насосная часть» – срыв шпонки на валу насосного агрегата, преждевременный износ подшипников, обрыв муфты или повреждению (деформации) рабочего колеса [5].

Также, прямой пуск электродвигателя погружного насоса создает ударную нагрузку на трехходовой автоматический клапан поз. *X3100V-A*, запорную

арматуру, трубопровод гидротранспорта, в результате чего снижается срок службы оборудования и могут образовываться прорывы ветхих участков труб и мест их соединений (соединительных муфт, фланцев), произойти значительная утечка деминерализованной воды, что повлечет за собой срыв технологического процесса и значительные расходы на ремонт оборудования предприятия.

Пути решения проблемы прямого пуска:

1) Пуск по схеме «звезда – треугольник».

Механизм погружного насоса *P129/5* обладает небольшим моментом инерции, поэтому пуск по методу «звезда – треугольник» не очень эффективен, другими словами даже неэкономичен. Дело в том, что диаметр насосного агрегата *P129/5* невелик. Тогда масса рабочего колеса насоса мала, поэтому мал и момент инерции. В результате для пуска и последующего разгона *P129/5* до номинальной скорости требуется не более пары десятков периодов напряжения сети. Это означает также, что насос при отключении конфигурации «звезда» и перед переходом к «треугольнику» (переключении тока) очень быстро, практически сразу же, остановится [5], ЭДС вращения исчезнет и электродвигателю придется второй раз запускаться напрямую.

2) Использование УПП (устройства плавного пуска) или ПЧ.

УПП позволяет решать следующие задачи:

– ограничить пусковой ток приводного электродвигателя (в большинстве случаев на уровне $(3 \div 4.5) \cdot I_{НОМ}$) и просадки сетевого напряжения питания в зависимости от мощности силового трансформатора и характеристик подводящих шин питания;

– оптимизировать пусковой и тормозной моменты приводного электродвигателя для безударных разгонов и остановок погружного насоса поз. *P129/5*, продлить, тем самым, срок использования подшипников, механизмов насоса;

– аварийно защитить питающую сеть от токовых перегрузок, заклинивания вала двигателя.

– исключаются гидроудары в трубопроводе гидротранспорта системы охлаждения и транспортировки гранул при пусках и при других переходных процессах погружного насоса поз. *P129/5*;

ПЧ решает все вышеперечисленные задачи присущие УПП и может также выполнить следующие функции:

– как было сказано раньше, регулировать частоту вращения двигателя в установившемся режиме;

– увеличить пусковой момент приводного двигателя погружного насоса *P129/5* относительно номинального;

– снизить пусковой ток двигателя погружного насоса *P129/5* до значений меньших, чем требуется для вращения ротора в момент старта.

Исходя из всего вышесказанного, упрощенная функциональная схема управления погружным насосом поз. *P129/5* с помощью преобразователя частоты с перспективой создания автоматизированной системы с обратной связью по давлению изображена на рисунке 3.

На вход системы подаются сигналы задания давления и сигнал реального давления, получаемый с датчика давления, установленного в цепи обратной связи. Отклонение между реальным и заданным значениями давления преобразуются ПИД-регулятором в сигнал задания частоты для преобразователя [6]. Под воздействием этого сигнала задания ПЧ изменяет скорость вращения электродвигателя погружного насосом *P129/5* и стремится привести разность между заданным и реальным значением к нулю. Таким образом, давление в системе поддерживается равным заданному давлению $p=21.5 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ и не зависит от расхода деминерализованной воды.

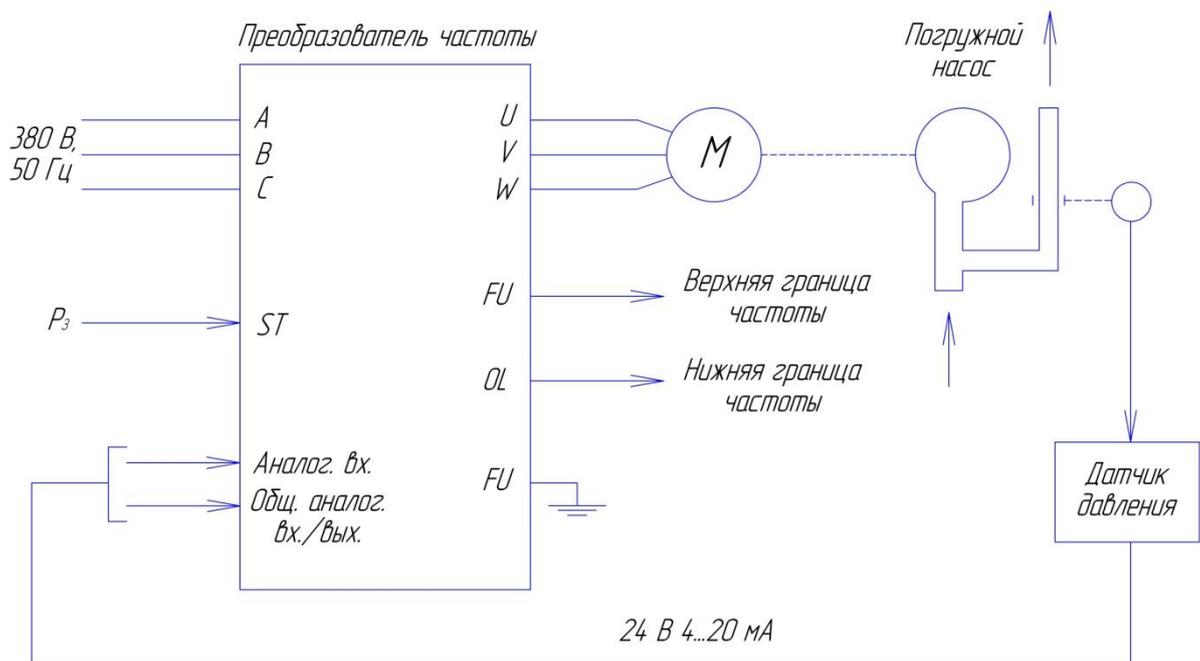


Рисунок 3. Упрощенная функциональная схема управления погружным насосом P129/5 с помощью преобразователя частоты.

2.2. Выбор способа и закона частотного регулирования

Под частотным управлением понимается управление электродвигателем переменного тока путем изменения амплитуды и частоты питающего напряжения, подаваемого на электродвигатель.

Для осуществления технологического процесса охлаждения и транспортировки гранул полипропилена требуется небольшой диапазон (менее 10) регулирования скорости погружного насоса P129/5. Также турбомеханизмы, к которым относятся все виды насосов, не требуют обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов, но плавный пуск необходим. В качестве режима торможения может использоваться выбег, в этом случае электродвигатель отключается от питающей сети и останавливается по инерции. Но тогда и торможение в рабочей зоне при переходе электропривода с большей скорости на меньшую

скорость также должно осуществляться без преобразования механической энергии вращающихся масс в электрическую энергию [2]. Данный способ торможения обуславливает появление ударных токов, от которых по требованию к электроприводу *FP129/5* нужно избавиться, поэтому выберем способ торможения – управляемое электрическое торможение.

А в качестве способа управления выберем, более дешевый, разомкнутый скалярный с коррекцией вольт-частотной характеристики способ регулирования скорости приводного электродвигателя погружного насоса.

Данный способ управления позволит плавно изменять скорость вращения рабочего колеса насосного агрегата поз. *P129/5* в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к электроприводу *FP129/5* и повысить пусковой момент приводного электродвигателя на малых скоростях до требуемых значений.

Тогда может быть принят один из двух законов частотного управления: $\frac{U}{f} = const$ или $\frac{U}{f^2} = const$. Квадратичный закон является более сложным, по сравнению с линейным, в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети электроэнергию.

2.3. Функциональная схема регулируемого электропривода

Выбираем для регулирования параметров электропривода погружного насоса тип преобразователя частоты (ПЧ) – с промежуточным звеном постоянного тока. Функциональная схема силовой части преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока изображена на рисунке 4.

В ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока происходит двукратное преобразование напряжения (энергии) питающей сети: переменное напряжение питающей выпрямляется с помощью управляющего выпрямителя *UD*, сглаживается фильтром *Z* и подается на инвертор *UZ*. Функции регулирования

частоты выходного напряжения осуществляет инвертор, а напряжения – выпрямитель.

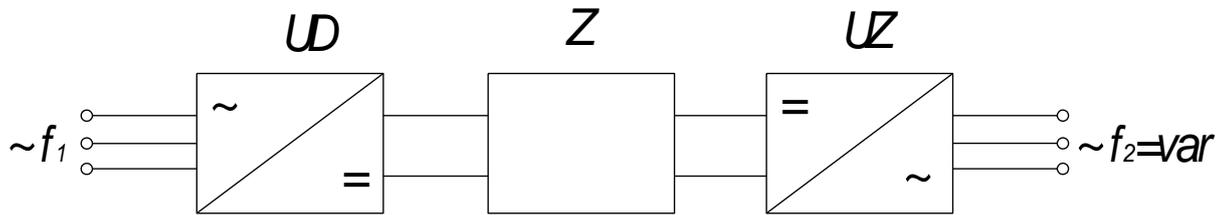


Рисунок 4. Функциональная схема силовой части преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока

Главными достоинствами ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока являются, во-первых,

На выходе ПЧ формируется напряжение переменного тока постоянной или регулируемой частоты причем $U_{вых}$ и $f_{вых}$ могут изменяться по любому закону, во-вторых, его относительная дешевизна по сравнению со многими другими ПЧ. Основной недостаток – двукратное преобразование энергии и связанные с этим повышенные потери и уменьшение КПД.

Исходя из всего вышесказанного, функциональная схема реализации асинхронного частотно-регулируемого электропривода погружного насоса *FP129/5* со скалярным управлением без датчика скорости с квадратичным законом управления приведена на рисунке 5.

Функциональная схема строится по модульному принципу. Модули (платы) расширения содержат в своем составе аналоговые и дискретные входы и выходы, а также интерфейсы связи.

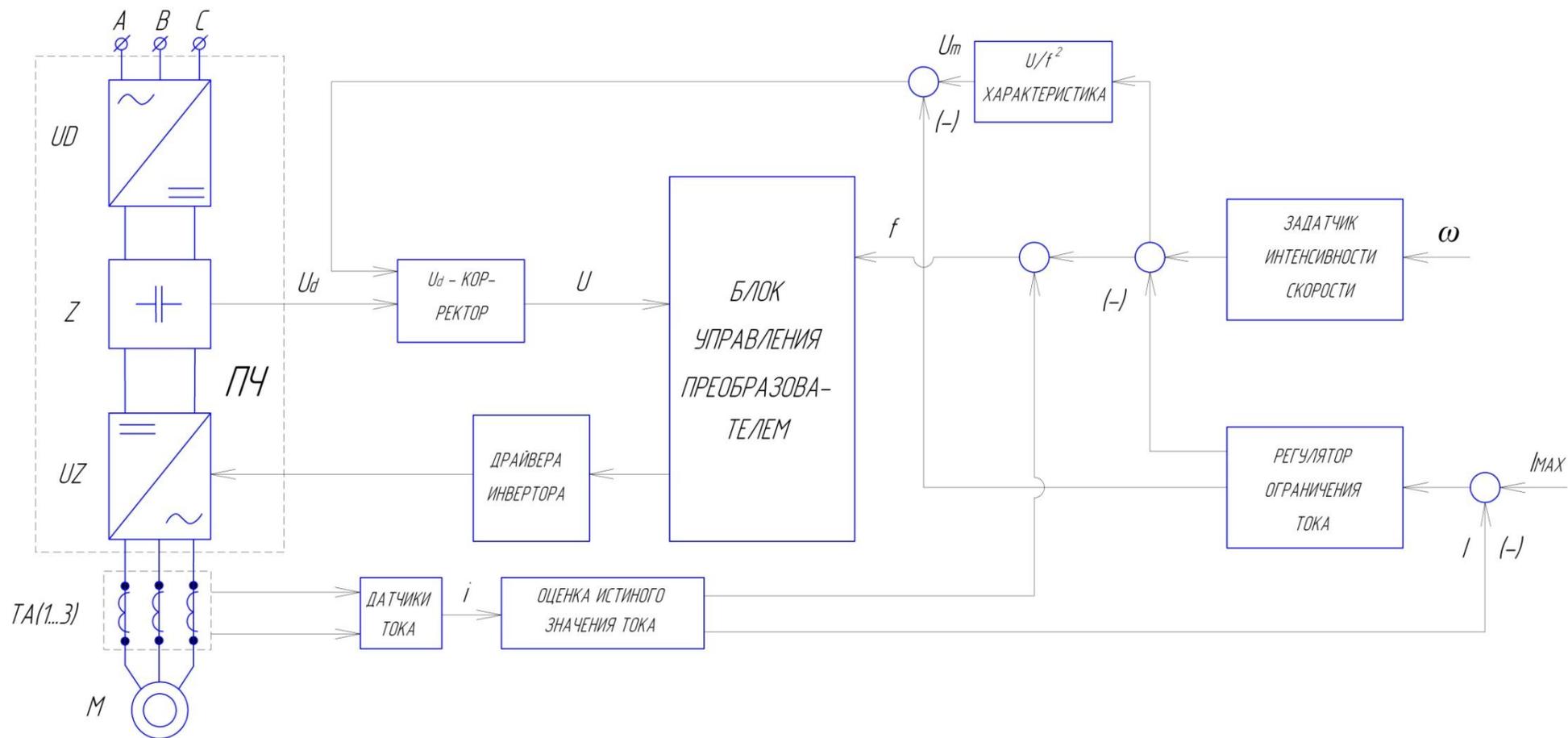


Рисунок 5. Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода погружного насоса

Основными элементами функциональной схемы частотно-регулируемого электропривода погружного насоса *FP129/5* со скалярным управлением являются:

- асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором;
- силовая часть преобразователя частоты, инвертор которого имеет драйвера управления силовыми ключами;
- блок управления преобразователем, который включает в себя формирователь 3-фазной системы управляющих напряжений u_{1a} , u_{1b} и u_{1c} , а также формирователь 6-канального ШИМ-сигнала;
- формирователь $\frac{U}{f^2}$ – характеристики;
- блок U_d -коррекции управления напряжением инвертора в функции фактического значения напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты;
- подключенные к статорной обмотки электродвигателя трансформаторы тока TA (1...3) с датчиками фазного тока двигателя;
- элемент сравнения допустимого максимального значения со значением фактического действующего фазного тока двигателя и регулятор ограничения тока;
- линейный задатчик интенсивности скорости.

Надежная работа преобразователя частоты во многом определяется как надежностью применяемых ключей, так и организацией правильного управления и защиты силовых модулей. Эти функции и обеспечиваются драйверами. Драйвер является промежуточным согласующим устройством, в нашем случае, между блоком управления преобразователем и силовыми ключами. Драйвера предназначены для формирования сигнала управления в соответствии с командами блока управления преобразователем.

Для повышения момента приводного двигателя на малых скоростях вращения насосного агрегата *P129/5* в преобразователе предусмотрена функция повышения начального значения выходного напряжения (начального

напряжения вольт-частотной характеристики) для этого применяются модули U_d –коррекции. В результате происходит увеличение пускового момента двигателя.

Ограничение тока двигателя с помощью датчика и регулятора тока необходимо при кратковременных перегрузках приводного двигателя погружного насоса поз. *P129/5*. Это исключит аварийное отключение привода *FP129/5* средствами защитной аппаратуры. Для защиты преобразователя частоты *VLT5032* фирмы «*Danfoss*» и приводного электродвигателя *AIP180S2* от перегрузки по току, а погружного насоса *P129/5* от перегрузки по моменту используется отрицательная обратная связь по току, так называемая токовая отсечка. Регулятор ограничения тока работает только тогда, когда ток статора превышает максимально допустимое значение. На уменьшение частоты и на уменьшение выходного напряжения ПЧ воздействует выходной сигнал регулятора. Если уменьшать напряжение и частоту преобразователя одновременно, то можно обеспечить постоянство момента двигателя и магнитного потока, что более разумно.

В пуско-тормозных режимах работы электропривода погружного насоса *FP129/5* применяют задатчик интенсивности (ЗИС) для ограничения момента двигателя, его устанавливают в канале задания скорости на входе электропривода.

Для электромеханической системы (рисунок 5) настроечными параметрами являются: тип и параметры ЗИС, максимальный ток регулятора ограничения тока, значение минимальной частоты ПЧ, закон регулирования $\frac{U}{f^2}$ и коррекция вольт-частотной характеристики.

3. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА

3.1. Выбор приводного электродвигателя погружного насоса

1. Электродвигатель выбираем общепромышленного (общего) назначения серии АИР с самовентиляцией со степень защиты $IP55$, что удовлетворяет техническим требованиям к регулируемому электроприводу.

2. Номинальная скорость электродвигателя выбирается исходя из условия $\omega_{\text{дв.н}} \geq \omega_{\text{эп.макс}}$, что требует регулирования скорости двигателя в первой зоне ($f_{\text{н}} \leq 50$ Гц), где $\omega_{\text{эп.макс}} = \omega_{\text{нас}}$.

3. Мощность двигателя выбирается в соответствии с зависимостями длительно допустимого и кратковременно допустимого тока и момента или мощности двигателя в функции скорости.

4. Номинальная мощность электродвигателя выбирается в режиме длительной работы в соответствии со следующим условием $P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{дв.потр}}$, где $P_{\text{дв.потр}} = P_{\text{полн}}$.

Электропривод погружного насоса $FP129/5$, исходя из технических требований к нему, работает в режиме $S1$ – продолжительная работа с постоянной нагрузкой. Поэтому двигатель для погружного насоса $P129/5$ по мощности выбирается из условия работы механизма с максимальной производительностью.

Полная мощность электродвигателя погружного насоса поз. $P129/5$

$$P_{\text{полн}} = \frac{k_3 \cdot \rho \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{пер}}} = \frac{1.4 \cdot 988.04 \cdot 120 \cdot 215}{1000 \cdot 3600 \cdot 0.51 \cdot 1} = 19.44 \text{ кВт},$$

где $k_3 = 1.1 \div 1.4$ – коэффициент запаса. Примем $k_3 = 1.4$ для завышения мощности двигателя;

$\rho = 988.04 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность деминерализованной воды при рабочей температуре 50°C ;

$Q = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$ – производительность погружного насоса;

$H = 215 \text{ м}$ – напор погружного насоса;

3600 – коэффициент для перевода значения производительности из $\text{м}^3/\text{ч}$ в $\text{м}^3/\text{с}$;

$\eta_{\text{НАС}} = 0.51$ – КПД погружного насоса;

$\eta_{\text{ПЕР}} = 1$ – КПД для прямой передачи.

Полезная мощность приводного двигателя

$$P_{\text{ПОЛ}} = P_{\text{ПОЛН}} \cdot \eta_{\text{НАС}} = 19.44 \cdot 0.51 = 9.92 \text{ кВт}.$$

При синхронной скорости $n_{\text{НАС}} = 3000 \text{ об/мин}$ ближайшим большим по мощности является электродвигатель АИР180S2, номинальная мощность которого равна 22 кВт.

Выбираем электродвигатель АИР180S2, степень защиты IP55.

Технические данные выбранного электродвигателя сведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические данные электродвигателя

| Типоразмер | $n_0, \text{об/мин}$ | $U_{\text{ИН}}, \text{В}$ | $P_{\text{ДВ.Н}}, \text{кВт}$ | При номинальной нагрузке | | | $J_{\text{ДВ}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$ |
|------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|---|
| | | | | $s_{\text{Н}}, \%$ | $\cos \varphi_{\text{Н}}$ | $\eta_{\text{Н}}, \%$ | |
| АИР180S2 | 3000 | 380 | 22 | 2.7 | 0.89 | 90.5 | 0.057 |

Продолжение таблицы 2

| $m_{\text{П}} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{Н}}}$ | $m_{\text{К}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{Н}}}$ | $m_{\text{М}} = \frac{M_{\text{МИН}}}{M_{\text{Н}}}$ | $k_{\text{ИДВ}} = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_{\text{Н}}}$ | Степень защиты |
|---|---|--|---|----------------|
| 2 | 2.7 | 1.9 | 7.0 | IP55 |

В ходе модернизации электропривода погружного насоса поз. FP129/5 требуется заменить двигатель АИР180M2 с номинальной мощностью 30 кВт на АИР180S2 с номинальной мощностью 22 кВт, что удовлетворяет техническим требованиям, а также будет обеспечивать меньшее электропотребление.

3.2. Расчетная схема замещения механизма

В приведенной расчетной схеме все инерционные элементы осуществляют один и тот же вид движения, а именно вращательный.

Расчетная схема замещения механической системы электропривода погружного насоса *FP129/5* (рисунок 6) может быть представлена в виде одномассовой системы.

На схеме рисунок 6 приняты следующие обозначения:

1 – M – асинхронный электродвигатель;

2 – J_{Σ} – эквивалентный момент инерции привода, приведенный к валу электродвигателя;

$M_{дв}$ – вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя;

M_c – момент нагрузки с учетом потерь в механизме, приведенный к валу двигателя;

$\omega_{НАС}$ – угловая скорость.

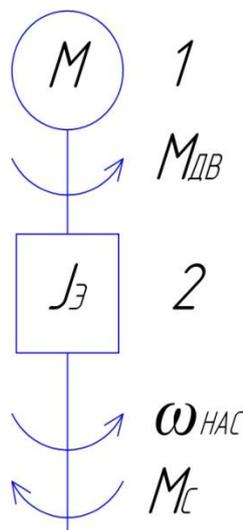


Рисунок 6. Расчетная схема механической системы электропривода *FP129/5*

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}.$$

Номинальная угловая частота вращения погружного насоса

$$\omega_{\text{НАС}} = \omega_{\text{ДВ.Н}} = \omega_{\text{ЭП.МАКС}} = (1 - s_{\text{Н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0.027) \cdot 314 = 305.65 \text{ рад/с}.$$

Эквивалентный момент инерции электропривода

$$J_{\text{Э}} = 1.1 \cdot J_{\text{ДВ}} + J_{\text{НАС}} = 1.1 \cdot 0.057 + 0.12 = 0.183 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $J_{\text{ДВ}} = 0.057 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции электродвигателя АИР180S2.

3.3. Расчет дополнительных параметров электродвигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с}.$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{\text{ДВ.Н}} = (1 - s_{\text{Н}}) \cdot n_0 = (1 - 0.027) \cdot 3000 = 2919 \text{ об/мин}$$

Полный момент приводного двигателя

$$M_{\text{ПОЛН}} = \frac{P_{\text{ПОЛН}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ДВ.Н}}} = \frac{19.44 \cdot 10^3}{305.65} = 63.59 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полезный момент приводного двигателя

$$M_{\text{ПОЛ}} = \frac{P_{\text{ПОЛ}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ДВ.Н}}} = \frac{9.92 \cdot 10^3}{305.65} = 32.46 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ДВ.Н}} = \frac{P_{\text{ДВ.Н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ДВ.Н}}} = \frac{22 \cdot 10^3}{305.65} = 71.98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{ДВ.Н}} = 2.7 \cdot 71.98 = 194.35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске (по паспортным данным)

$$M_{\text{ДВПУСК}} = m_{\text{П}} \cdot M_{\text{ДВ.Н}} = 2 \cdot 71.98 = 143.96 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Если соединение обмоток неизвестно, то при расчете номинального фазного напряжения следует принять соединение Y:

$$U_{1н} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы

$$I_{1лн} = I_{1фн} = \frac{P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.89 \cdot 0.905} = 41.39 \text{ А.}$$

3.4. Расчет параметров схемы замещения электродвигателя

При создании электроприводов с двигателями переменного тока часто сталкиваются с проблемой определения параметров асинхронного двигателя, которые необходимы для проектирования и настройки системы управления электроприводом, а также для моделирования переходных процессов в асинхронном электроприводе.

Для большинства практических случаев приемлемыми являются методы определения параметров АД на основании его справочных данных.

Расчет коэффициентов математической модели сводится к определению параметров схемы замещения асинхронной машины по данным каталога.

Определение параметров схемы замещения будем проводить при следующих основных допущениях [7]:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют $0.02 \cdot P_{дв.н}$;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения тока не учитываются.

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя воспользуемся его математической моделью, соответствующей простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя T-образной схеме замещения [2].

T – образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы приведена на рисунке 7.

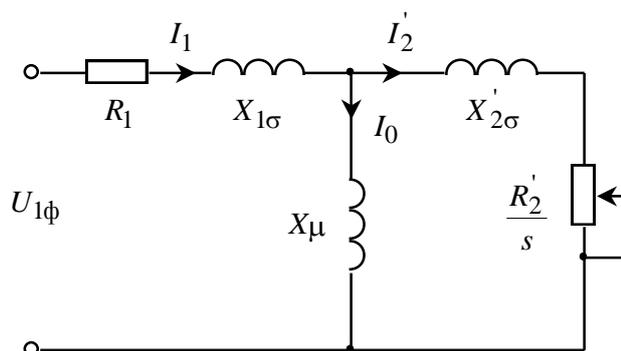


Рисунок 7. Схема замещения асинхронного двигателя

Рассчитывается ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(k_3 \cdot I_{1\text{ЛН}} \cdot \frac{1-s_{\text{Н}}}{1-k_3 \cdot s_{\text{Н}}} \right)^2}{1 - \left(k_3 \cdot \frac{1-s_{\text{Н}}}{1-k_3 \cdot s_{\text{Н}}} \right)^2}},$$

где I_{11} – ток статора двигателя при частичной нагрузке.

$$I_{11} = \frac{k_3 \cdot P_{\text{ДВ.Н}}}{3 \cdot U_{1\text{Н}} \cdot \cos \varphi_{k_3} \cdot \eta_{k_3}} = \frac{0.75 \cdot 22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.87 \cdot 0.905} = 31.75 \text{ А},$$

где $k_3 = 0.75$ – коэффициент загрузки двигателя;

$\eta_{k_3} = \eta_{\text{Н}} = 0.905$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{k_3} = \cos \varphi_{0.75} = \cos \varphi_{\text{Н}} \cdot 0.98 = 0.89 \cdot 0.98 = 0.87$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке (исходя из рисунка 8).

Коэффициент мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют [8]. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

– современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10–15% меньшей номинальной.

Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и частичной нагрузке практически равны между собой.

– коэффициент мощности при той же нагрузке значительно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости [8], приведенной на рисунке 8.

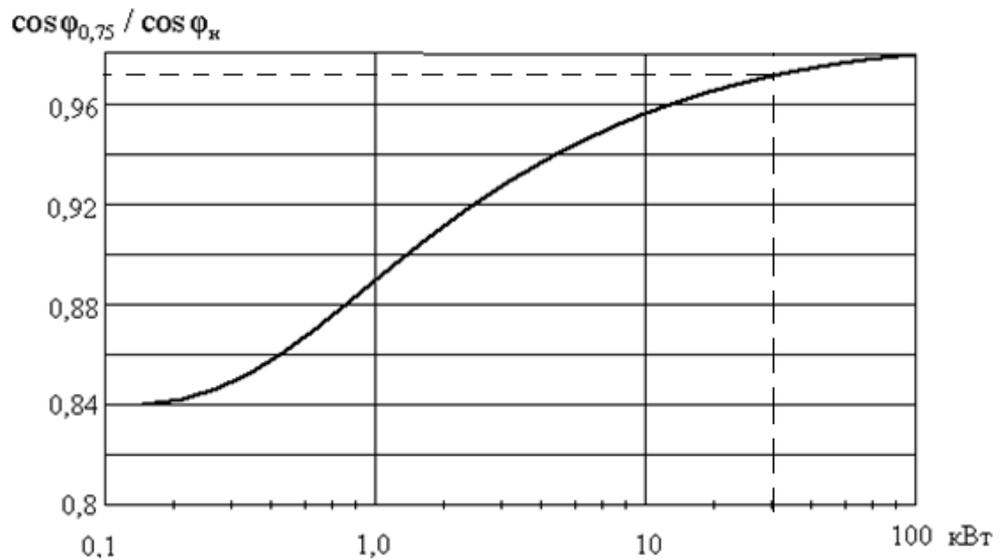


Рисунок 8. График зависимости $\cos \varphi_{0,75} = \cos \varphi_n$ от мощности асинхронного двигателя

Тогда

$$I_0 = \sqrt{\frac{31,75^2 - \left(0,75 \cdot 41,39 \cdot \frac{1 - 0,027}{1 - 0,75 \cdot 0,027}\right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,027}{1 - 0,75 \cdot 0,027}\right)^2}} = 11,38 \text{ А.}$$

Критическое скольжение по формуле Клосса, принимая в первом приближение $\beta=1$:

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

$$= 0.027 \cdot \frac{2.7 + \sqrt{2.7^2 - [1 - 2 \cdot 0.027 \cdot 1 \cdot (2.7 - 1)]}}{[1 - 2 \cdot 0.027 \cdot 1 \cdot (2.7 - 1)]} = 0.155.$$

Определяются значения коэффициентов

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_{дВ} \cdot I_{лн}} \right) = 1 + \left(\frac{11.38}{2 \cdot 7 \cdot 41.39} \right) = 1.02;$$

$$A_1 = m \cdot U_{лн}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot m_K \cdot P_{дВн}} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0.027}{2 \cdot 1.02 \cdot 2.7 \cdot 22 \cdot 10^3} = 1.166,$$

где $m=3$ – число фаз асинхронного двигателя.

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{1.166}{\left(1 + \frac{1}{0.155} \right) \cdot 1.02} = 0.153 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.02 \cdot 0.153 \cdot 1 = 0.156 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания при нормальном режиме

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 6.374 \cdot 1.02 \cdot 0.153 = 0.995 \text{ Ом,}$$

где γ – параметр, позволяющий найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0.155^2} - 1^2} = 6.374.$$

Найденное значение коэффициента $\gamma = 6.374$, практически определяющее отношение индуктивного сопротивления короткого замыкания в номинальном режиме к приведенному активному сопротивлению обмотки ротора (коэффициент $C_1 \approx 1$), для двигателя мощностью 22 кВт является приемлемым.

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$X'_{2\delta} = 0.58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{0.995}{1.02} = 0.566 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\delta} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 0.995 = 0.418 \text{ Ом.}$$

Произведем проверку расчетов индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток двигателя через индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = X_{1\delta} + X'_{2\delta} = 0.418 + 0.566 = 0.984 \text{ Ом.}$$

Так как $0.984 \text{ Ом} \approx 0.995 \text{ Ом}$, то данный расчет верен и для дальнейших расчетов примем $X_{\text{кн}} = 0.984 \text{ Ом}$.

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора (главным полем) в номинальном режиме

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi - I_{1\text{лн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{н}} \cdot \sin \varphi - I_{1\text{лн}} \cdot L_{1\sigma})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0.89 - 41.39 \cdot 0.156)^2 + (220 \cdot 0.46 - 41.39 \cdot 0.418)^2} = 207.099 \text{ В,}$$

где $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0.89^2} = 0.46$.

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{207.099}{11.38} = 18.199 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\delta} = \frac{X_{1\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0.418}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 1.331 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_{2\delta}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0.566}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 1.803 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием полюсов статора (индуктивность контура намагничивания) [2]:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{18.199}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.058 \text{ Гн}.$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя при прямом пуске

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

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.153}{314 \cdot 0.027 \cdot \left[0.984^2 + \left(0.156 + \frac{0.153}{0.027} \right)^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{0.027 \cdot 18.199} \right)^2 \right]} = 74.75 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При найденных параметрах схемы замещения электродвигателя должны выполняться условия:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}} \leq 1.1 \cdot M_{\text{дв.н}};$$

$$71.98 \text{ Н} \cdot \text{м} < 74.75 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 1.1 \cdot 71.98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$71.98 \text{ Н} \cdot \text{м} < 74.75 \text{ Н} \cdot \text{м} < 79.18 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, параметрах схемы замещения электродвигателя найдены верно.

Рассчитанные параметры двигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3. Рассчитанные параметры схемы замещения двигателя АИР180S2

| $R_2', \text{ Ом}$ | $R_1, \text{ Ом}$ | $L_{2\sigma}', \text{ Гн}$ | $L_{1\sigma}', \text{ Гн}$ | $L_{\mu}, \text{ Гн}$ | $X_{\text{кн}}, \text{ Ом}$ | $X_{2\sigma}', \text{ Ом}$ | $X_{1\sigma}', \text{ Ом}$ | $X_{\mu}, \text{ Ом}$ |
|--------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 0.153 | 0.156 | $1.803 \cdot 10^{-3}$ | $1.331 \cdot 10^{-3}$ | 0.058 | 0.984 | 0.566 | 0.418 | 18.199 |

3.5. Механические характеристики погружного насоса

Из условия равенства постоянных и переменных потерь погружного насоса в номинальном режиме работы коэффициенты потерь при работе насоса P129/5 с $\eta_H = 0.51$:

$$a_H = b_H = \frac{1 - \eta_H \cdot \eta_{ПЕР}}{2 \cdot \eta_H \cdot \eta_{ПЕР}} = \frac{1 - 0.51 \cdot 1}{2 \cdot 0.51 \cdot 1} = 0.48.$$

Механическая характеристика погружного насоса для номинального режима работы соответствует значению КПД и имеет следующий вид:

$$M_{снас}(\omega) = a_H \cdot M_{ПОЛ} + (1 + b_H) \cdot M_{ПОЛ} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^3 = 15.58 + (1 + 0.48) \cdot 32.46 \cdot \left(\frac{\omega}{314} \right)^3,$$

где $a_H \cdot M_{ПОЛ} = 0.48 \cdot 32.46 = 15.58 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – момент постоянных потерь на валу погружного насоса.

Момент от сил трения приводного двигателя

$$\Delta M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 74.75 - 71.98 = 2.77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полный момент сопротивления на валу погружного насоса

$$\Delta M_{снас} = \Delta M_{с.дв} + a_H \cdot M_{ПОЛ} = 2.77 + 15.58 = 18.35 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда выражение для механической характеристики полного момента сопротивления на валу двигателя имеет вид:

$$M_c(\omega) = \Delta M_{снас} + (1 + b_H) \cdot M_{ПОЛ} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^3 = 18.35 + (1 + 0.48) \cdot 32.46 \cdot \left(\frac{\omega}{314} \right)^3.$$

Следовательно, механические характеристики погружного насоса P129/5 системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена изображены на рисунке 9.

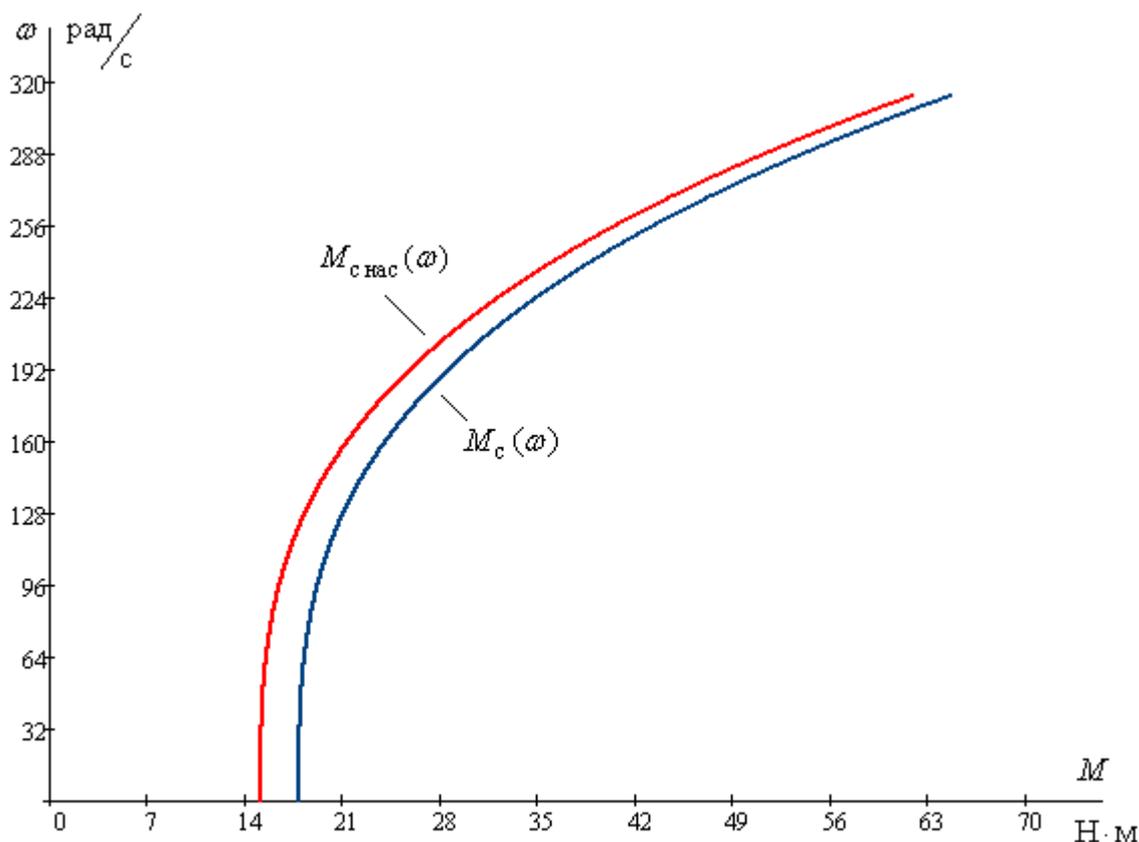


Рисунок 9. Механические характеристики погружного насоса P129/5

Для дальнейших расчетов будем пользоваться характеристикой полного момента сопротивления $M_c(\omega)$, так как следует учитывать и момент от сил трения собственно приводного двигателя.

3.6. Расчет естественных характеристик приводного электродвигателя

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

Произведем расчет и построение естественных механической и электромеханических характеристик приводного электродвигателя АИР180S2.

Естественная механическая характеристика $M_{\text{эм}}(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц рассчитывается по выражению:

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

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0.153}{314 \cdot s \cdot \left[0.984^2 + \left(0.156 + \frac{0.153}{s} \right)^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.199} \right)^2 \right]}.$$

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega(M_{\text{эм}})$ (см. рисунок 10), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению $\omega = \omega_0 \cdot (1-s) = 314 \cdot (1-s)$.

Параметры характерных точек на естественной механической характеристике двигателя (см. п. 3.4.):

– значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении $s_{\text{н}}$: $M_{\text{эм.н}} = 74.75 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– значение критического скольжения $s_{\text{к}} = 0.155$;

– значение электромагнитного критического момента при критическом скольжении

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

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot \left(0.156 + \sqrt{(0.156^2 + 0.984^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{0.156}{18.199} \right)^2 \right]} \right)} = 200.65 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

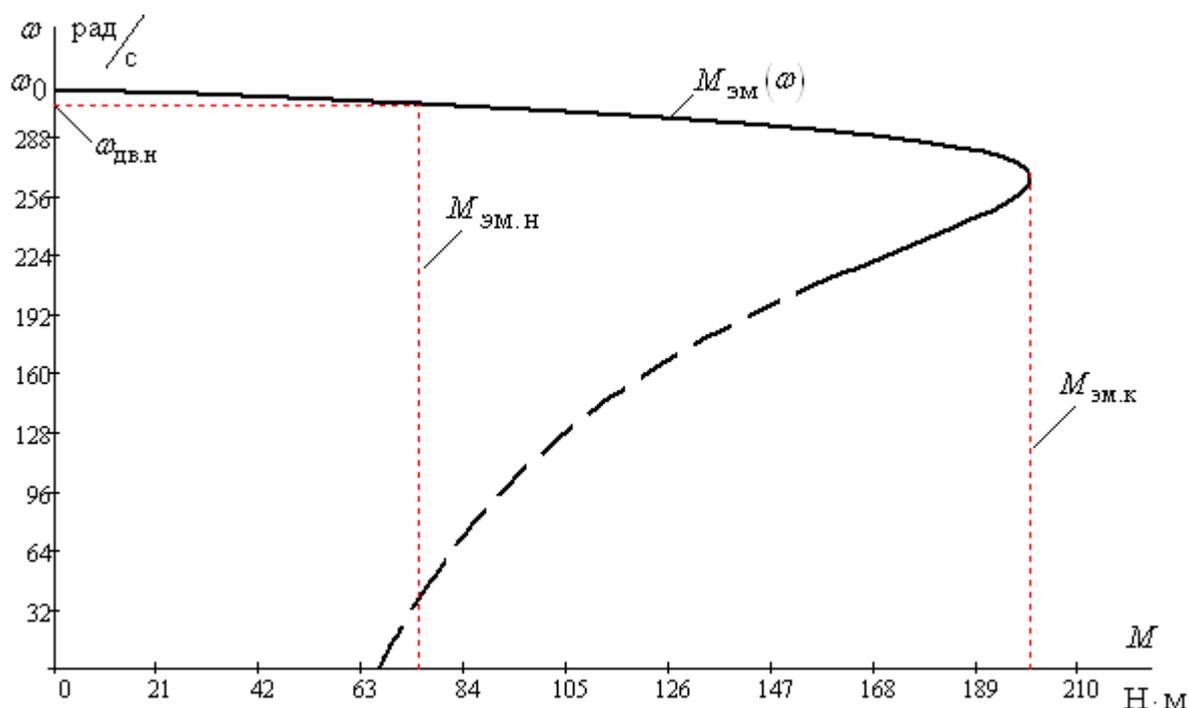


Рисунок 10. Естественная механическая характеристика приводного электродвигателя АИР180S2

Действующее значение тока холостого хода электродвигателя

$$I_0 = \frac{U_{1ФН}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\delta} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.156^2 + (0.418 + 18.119)^2}} = 11.67 \text{ А.}$$

Естественные электромеханические характеристики $I_1(s)$ и $I_2'(s)$ электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1н} = 50$ Гц по выражениям:

– действующее значение фазного тока двигателя

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} = \sqrt{11.67^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot 11.67 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)},$$

$$\text{где } \sin(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} = \frac{0.984}{\sqrt{\left(0.156 + \frac{0.153}{s}\right)^2 + 0.984^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.119}\right)^2}}.$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0.156 + \frac{0.153}{s}\right)^2 + 0.984^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.119}\right)^2}}$$

По результатам расчета строятся электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$ (см. рисунок 11), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению $\omega = \omega_0 \cdot (1-s) = 314 \cdot (1-s)$.

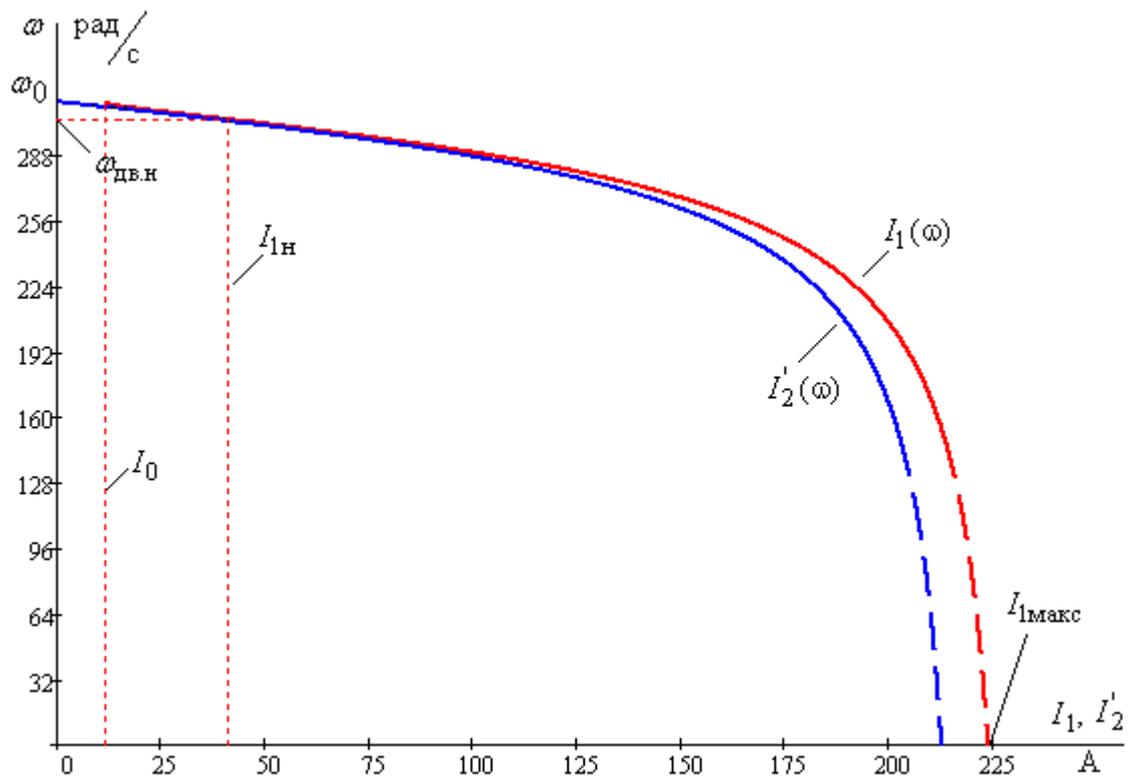


Рисунок 11. Естественные электромеханические характеристики приводного электродвигателя АИР180S2

Значения расчетных параметров характерных точек естественных характеристик двигателя:

$$M_{\text{МИН}} = m_M \cdot M_{\text{дв.н}} = 1.9 \cdot 71.98 = 136.76 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{МАКС}} = m_K \cdot M_{\text{дв.н}} = 2.7 \cdot 71.98 = 194.35 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{ПУСК}} = m_{\text{П}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 2 \cdot 71.98 = 143.96 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$I_{\text{ПУСК}} = k_{\text{дв}} \cdot I_{\text{лн}} = 7 \cdot 41.39 = 289.73 \text{ А}.$$

Сравнив значения расчетных параметров точек естественных характеристик приводного электродвигателя с его справочными данными, видим, что рассчитанные характеристики на рабочих участках примерно соответствуют каталожным параметрам приводного двигателя. Следовательно, полученные расчетные параметры схемы замещения двигателя (таблица 3) адекватны и могут быть использованы для расчета искусственных статических характеристик и имитационного моделирования динамических процессов частотно-регулируемого электропривода *FP129/5*.

4. СИЛОВАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА

4.1. Выбор преобразователя частоты

Предварительно выберем для управления погружным насосом *P129/5* преобразователь частоты марки *VLT5032* фирмы «*Danfoss*», который по рекомендациям фирмы соответствует электродвигателю с максимальной мощностью 22 кВт.

Выбираем преобразователь по номинальному (длительно допустимому) току $I_{\text{ИН}}$ и максимальному (кратковременно допустимому) току $I_{\text{ИМАКС}} = I_{\text{ИН}} \cdot k_{\text{И}}$, где $k_{\text{И}}$ – коэффициент допустимой перегрузки инвертора по току, по следующим условиям:

– в однозонном электроприводе:

$$\begin{aligned} I_{\text{ИН}} &\geq I_{\text{1ЛН}} = 41.39 \text{ А}; \\ 44 \text{ А} &\geq 41.39 \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{ИМАКС}} &\geq I_{\text{1ЛН}} = 41.39 \text{ А}; \\ 70.4 \text{ А} &\geq 41.39 \text{ А}. \end{aligned}$$

Исходя из технических требований к регулируемому электроприводу погружного насоса *FP129/5* и разработанной функциональной схемы, принимаем способ управления – скалярное управление без датчика скорости с квадратичным законом с разомкнутой системой, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики.

Согласно выбранному способу управления выбираем ПЧ с возможностью скалярного управления.

Из проверки предварительно выбранного преобразователя частоты марки *VLT5032* фирмы «*Danfoss*» по номинальному и максимальному току видим, что данный ПЧ подходит для работы с двигателем АИР180S2.

Параметры выбранного ПЧ сведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры преобразователя частоты

| Тип | Параметры питающей сети | | Выходное напряжение U_H , В | Выходная частота f_H , Гц | Выходной ток | | Рекомендуемая мощность P_2 , кВт |
|----------------------|-------------------------|------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------------------|
| | $U_{1Л}$, В | f_c , Гц | | | $I_{VLT.H}$, А | $I_{VLT.макс}$, А | |
| VLT5032 «Danfoss» | 3×(380÷ 440) | 50 | 380 | 0.2-132 | 44 | 70.4 | 22 |

где $I_{ин} = I_{VLT.H}$ и $I_{ИМАКС} = I_{VLT.макс}$.

Несущая частота инвертора ПЧ марки VLT5032 $f_{ШИМ} = 3 \div 10$ кГц.

Принимаем несущую частоту инвертора $f_{ШИМ} = 5$ кГц.

Виды защит [2]:

- электронная тепловая защита двигателя от перегрузки;
- температурный контроль радиатора;
- защита преобразователя от короткого замыкания на клеммах двигателя;
- защита от потери фазы отключением преобразователя;
- постоянный контроль напряжения промежуточной цепи постоянного тока;
- защита от неисправности заземления на клеммах двигателя.

Степень защиты корпуса преобразователя IP20.

4.2. Расчет искусственных механических и электромеханических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель

Для обеспечения пусковой характеристики принимаем минимальную частоту инвертора $f_{1мин} = 3$ Гц.

Минимальная рабочая частота инвертора соответствует скорости $\frac{\omega_{\text{дв.н}}}{2} = \omega_{\text{р.мин}} = \frac{305.65}{2} = 152.83 \text{ рад/с}$ (по техническим требованиям к электроприводу), следовательно $f_{\text{р.макс}} = 25 \text{ Гц}$.

А максимальная частота инвертора, соответствующая номинальному режиму работы погружного насоса поз. P129/5 $\omega_{\text{НАС}} = 305.65 \text{ рад/с}$, определяется исходя из заданного значения максимальной скорости электропривода:

$$f_{\text{1макс}} = f_{\text{1н}} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.макс}}}{\omega_{\text{НАС}}} = 50 \cdot \frac{305.65}{305.65} = 50 \text{ Гц}.$$

При скалярном управлении электроприводом FP129/5 следует рассчитать и построить семейство механических характеристик электродвигателя в диапазоне частот от 3 Гц до 50 Гц.

1. Произведем расчет и построение искусственных механических характеристик.

Искусственная механическая характеристика $M_{\text{эм}}(s)$ электродвигателя для частоты f_1 при законе управления $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ рассчитывается по выражению:

$$M_{\text{эм}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{\text{1фн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{\text{1н}}} \right)^2 \right)^2 \cdot R_2'}{\omega_0(f_1) \cdot s \cdot \left[\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{\text{1н}}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{\text{1н}}}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot \left(220 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 \cdot 0.153}{\omega_0(f_1) \cdot s \cdot \left[\left(0.984 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(0.156 + \frac{0.153}{s} \right)^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.199 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right]},$$

где $\omega_0(f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{\text{1н}}} = 314 \cdot \frac{f_1}{50}$.

По результатам расчета строятся механические характеристика $\omega(M_{эм})$ для частоты f_1 (см. рисунок 12), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению $\omega = \omega_0(f_1) \cdot (1-s)$. На рисунке 12 изображены искусственные механические характеристики соответствующие частотам $f_1 = 10 \text{ Гц}, 15 \text{ Гц}, 20 \text{ Гц}, 30 \text{ Гц}, 40 \text{ Гц}, 50 \text{ Гц}$.

Анализ приведенных механических характеристик электропривода FR129/5 и нагрузки в виде погружного насоса на рисунке 12 показывает, что при законе управления $\frac{U}{f^2} = const$ не удастся обеспечить пуск электропривода даже при частоте 15 Гц.

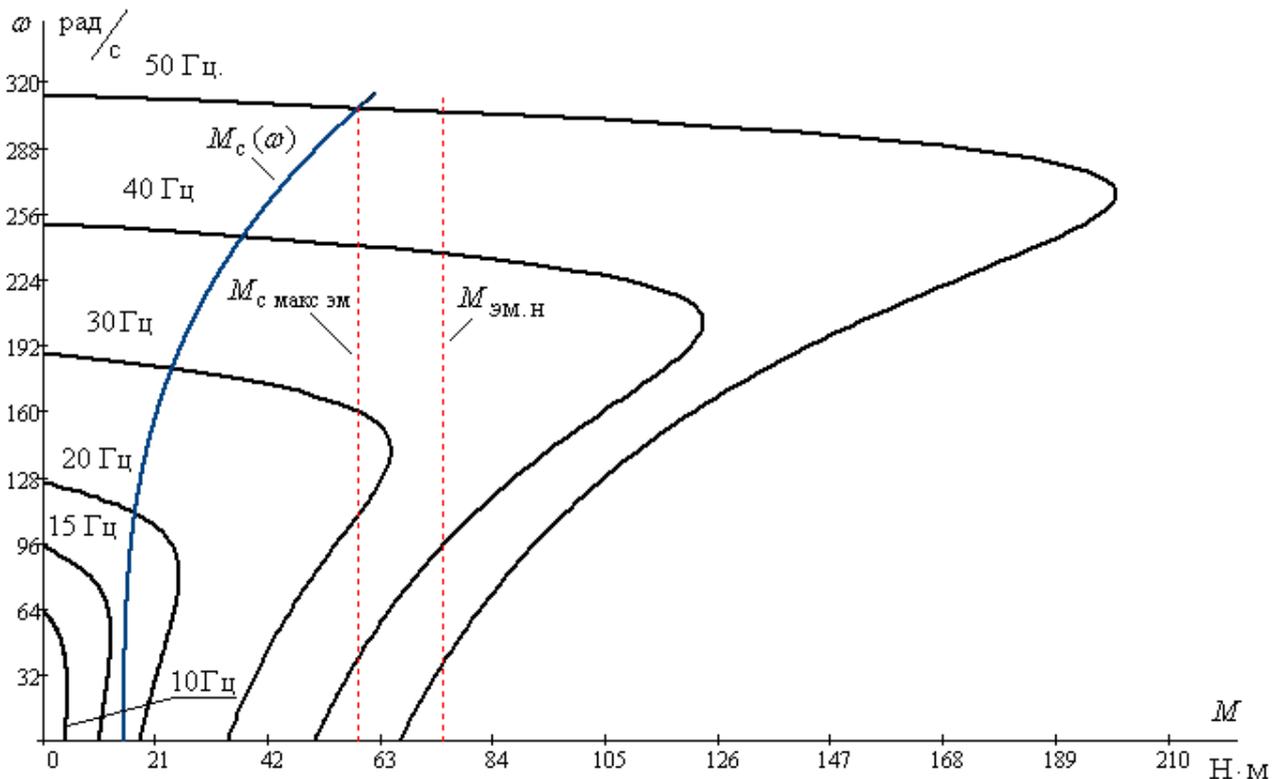


Рисунок 12. Искусственные механические характеристики системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель без коррекции вольт-частотной характеристики

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выберем параметры начального участка вольт-частотной характеристики ПЧ (см. рисунок 13).

Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования [2].

Для вольт-частотной характеристики выбрано следующее значение начального напряжения: $U_{1\text{мин}} = 10.5 \text{ В}$.

В результате вольт-частотная характеристика представлена зависимостью:

$$U_1(f_1) = U_{1\text{мин}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = 10.5 + (220 - 10.5) \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2.$$

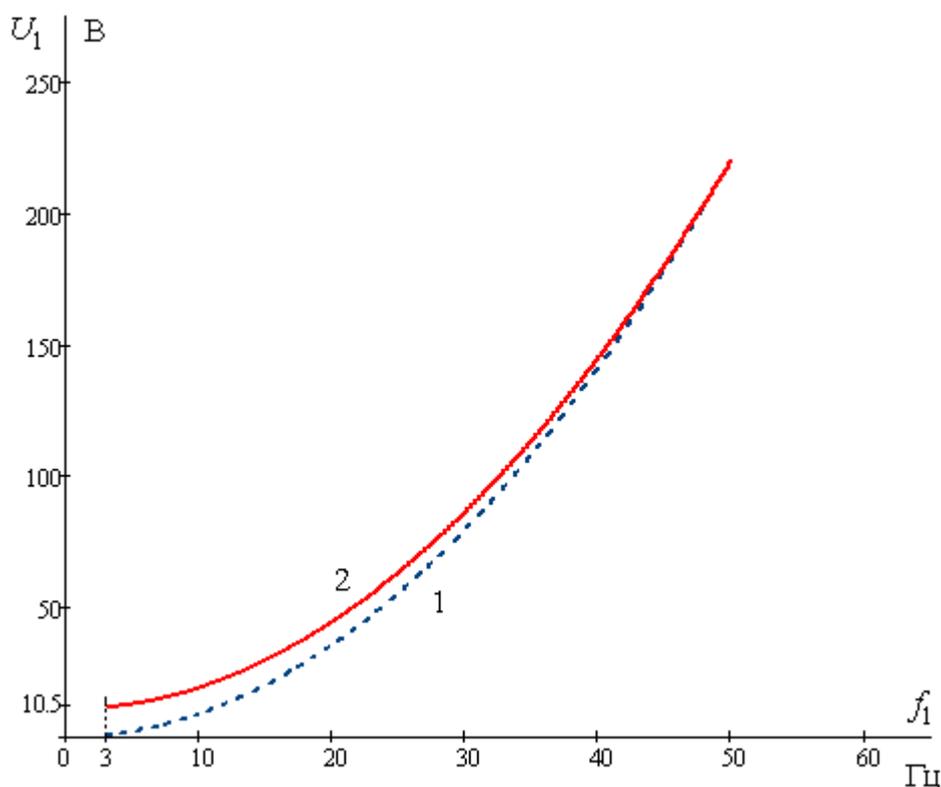


Рисунок 13. Вольт-частотная характеристика при законе управления $\frac{U}{f^2} = const$:

1 – без коррекции вольт-частотной характеристики; 2 – с коррекцией вольт-частотной характеристики

Теперь механические характеристики системы ПЧ-АД с учетом выбранной настройки вольт-частотной характеристики при законе управления $\frac{U}{f^2} = const$ приведены на рисунке 14. Видим, что при законе управления $\frac{U}{f^2} = const$ и настройке вольт-частотной характеристики удается обеспечить пуск электропривода при $f_{\text{мин}} = 3$ Гц.

Также рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого момента электродвигателя $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$, где $k = 0.7$ – значение коэффициента вентиляции для двигателей с самовентиляцией (которым и является АИР180S2):

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{эм.н}} \cdot \left(k + \frac{(1-k) \cdot 2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) = 74.75 \cdot \left(0.7 + \frac{(1-0.7) \cdot 2 \cdot \omega}{305.65} \right), \text{ при}$$

$$\omega \leq 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$\omega \leq 0.5 \cdot 305.65.$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{эм.н}} = 74.75 \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ при } \begin{matrix} \omega \leq 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ \omega \leq 0.5 \cdot 305.65. \end{matrix}$$

Исходя из рисунка 14, можно сделать вывод, что заданный диапазон регулирования скорости электропривода FP129/5 будет поддерживаться, так как $M_{\text{с макс эм}} < M_{\text{эм.н}}$

На рисунке 14 изображены искусственные механические характеристики соответствующие частотам $f_1 = 3\text{Гц}, 5\text{Гц}, 10\text{Гц}, 15\text{Гц}, 20\text{Гц}, 30\text{Гц}, 40\text{Гц}, 50\text{Гц}$.

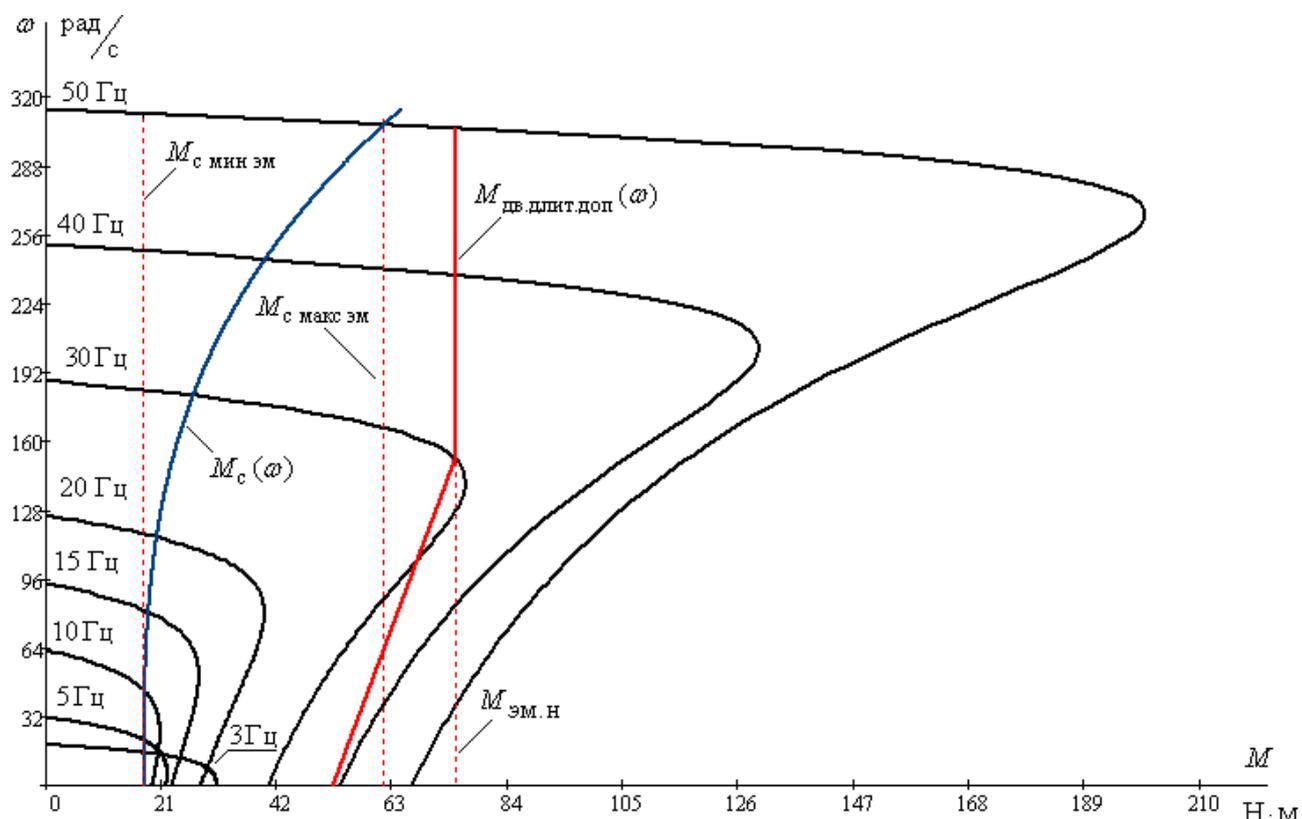


Рисунок 14. Искусственные механические характеристики системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с коррекцией вольт-частотной характеристики

2. Произведем расчет и построение искусственных электромеханических характеристик.

Искусственные электромеханические характеристики $I_1(s)$ и $I_2'(s)$ электродвигателя для частоты f_1 после настройки вольт-частотной характеристики рассчитываются по выражениям:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \phi_2(s, f_1)} ;$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}} = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{0.156^2 + (0.418 + 18.119)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)}};$$

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

$$= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(0.156 + \frac{0.153}{s}\right)^2 + 0.984^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.199} \cdot \frac{50}{f_1}\right)^2}};$$

$$\sin \phi_2(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{KH})^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1}\right)^2}} =$$

$$= \frac{0.984 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)}{\sqrt{\left(0.156 + \frac{0.153}{s}\right)^2 + 0.984^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{0.156 \cdot 0.153}{s \cdot 18.199} \cdot \frac{50}{f_1}\right)^2}}.$$

По результатам расчета строятся электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ для частоты f_1 , где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению $\omega = \omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot (1-s) = 314 \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right) \cdot (1-s)$.

Также рассчитывается и строится зависимость длительно допустимого тока электродвигателя $I_{дв.длит.доп}(\omega)$, где $k=0.7$ – значение коэффициента вентиляции для двигателей с самовентиляцией (которым и является АИР180S2):

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{1\phi H} \cdot \left(k + \frac{(1-k) \cdot 2 \cdot \omega}{\omega_{дв.н}}\right) = 41.39 \cdot \left(0.7 + \frac{(1-0.7) \cdot 2 \cdot \omega}{305.65}\right), \text{ при}$$

$$\omega \leq 0.5 \cdot \omega_{дв.н};$$

$$\omega \leq 0.5 \cdot 305.65.$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{1\phi H} = 41.39 \text{ А, при } \begin{matrix} \omega \leq 0.5 \cdot \omega_{дв.н}; \\ \omega \leq 0.5 \cdot 305.65. \end{matrix}$$

Рассчитываются и строятся зависимости статического тока нагрузки $I_{смакс}(\omega)$, $I_{эпмакс}(\omega)$ и $I_{с1}(\omega)$, соответствующие насосной нагрузке

$M_c(\omega) = \Delta M_{снас} + (1 + b_H) \cdot M_{пол} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3$ для частоты f_1 . Для этого необходимо на

естественной характеристике $M(\omega)$ определить соответствующее

$M_c(\omega) = 18.35 + (1 + 0.48) \cdot 32.46 \cdot \left(\frac{\omega}{314}\right)^3$ значение скольжений s_1 , s_2 и s_3 , численно

решив относительно s совместное уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2 \right]} =$$

$$= \Delta M_{снас} + (1 + b_H) \cdot M_{пол} \cdot \left(\frac{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1-s)}{\omega_{дв.н}}\right)^3$$

– Для $I_{смакс}(\omega)$ нужно рассчитать значение тока $I_{смакс} \Big|_{f_{и}=f_{1H}}$ и скорости

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot (1 - s_1) .$$

Зависимость $I_{смакс}(\omega)$ рассчитывается по выражениям:

$$I_{смакс}(\omega) = I_{смакс} \Big|_{f_{и}=f_{1H}} \quad \text{при } \omega \leq \omega_1 .$$

Решив уравнение относительно s , получаем $I_{смакс}(\omega_1) = 33.72 \text{ А} .$

– Для $I_{эпмакс}(\omega)$ нужно рассчитать значение тока $I_{эп.макс} \Big|_{f_{и}=f_{1H}}$ и скорости

$$\omega_2 = \omega_0 \cdot (1 - s_2) .$$

Зависимость $I_{эп.макс}(\omega)$ рассчитывается по выражениям:

$$I_{эп.макс}(\omega) = I_{эп.макс} \Big|_{f_{и}=f_{1H}} \quad \text{при } \omega \leq \omega_2 ;$$

Решив уравнение относительно s , получаем $I_{эп.макс}(\omega_2) = 61.77 \text{ А} .$

По результатам расчетов на рисунке 15 построено семейство искусственных электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ системы ПЧ-АД.

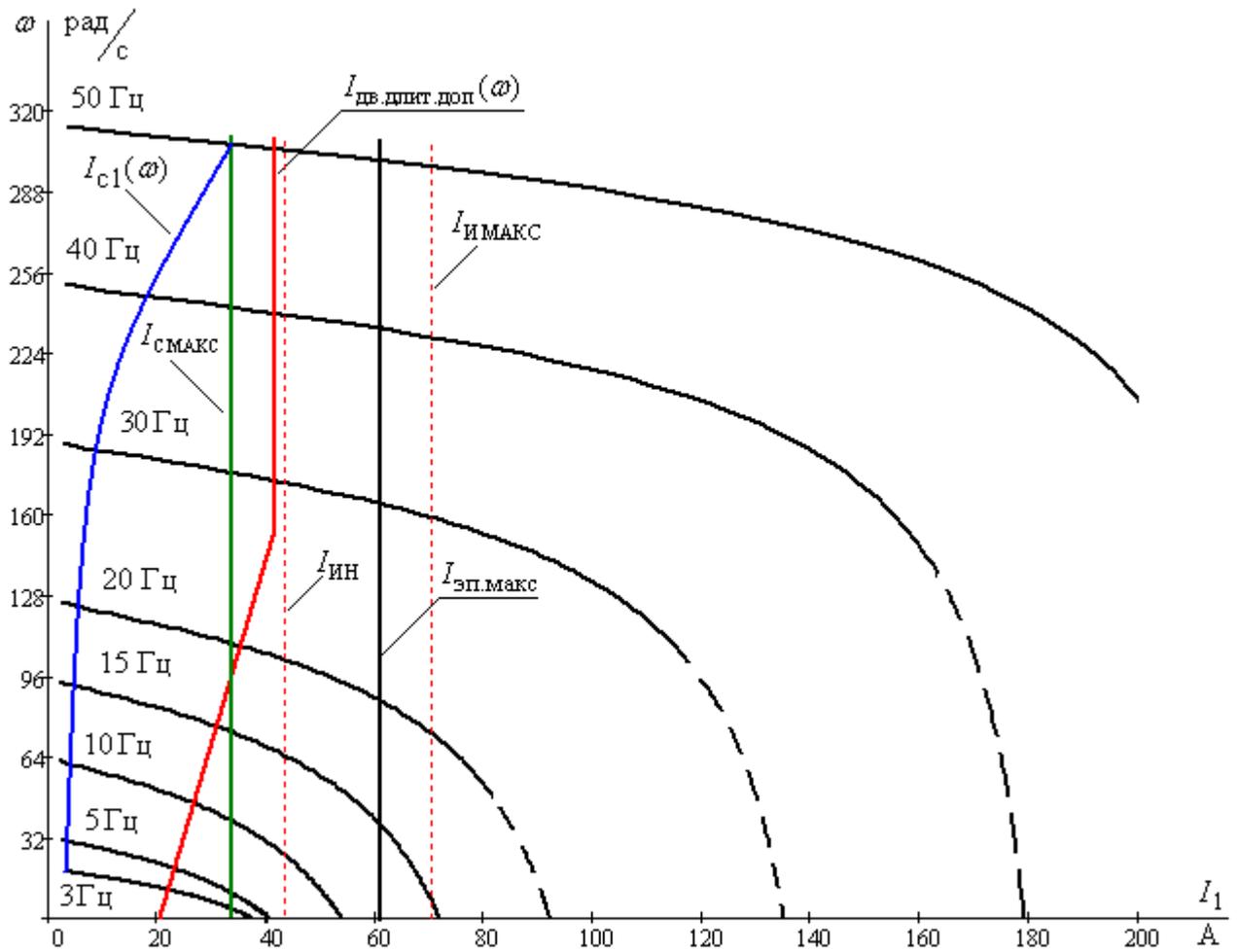


Рисунок 15. Искусственные электромеханические характеристики системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель с коррекцией вольт-частотной характеристики

Анализ приведенных на рисунках 14 и 15 характеристик электропривода FP129/5 и насосной нагрузки показывает, что при законе регулирования $\frac{U}{f^2} = const$, настройки вольт-частотной характеристики и начальной частоте инвертора $f_{\text{мин}} = 3$ Гц асинхронный привод обеспечивает пуск погружного насоса P129/5, заданный диапазон регулирования скорости и более чем

двукратную максимальную перегрузку во всём диапазоне регулирования скорости.

Проверка правильности выбора преобразователя:

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода (рисунок 15) проверяется правильность выбора преобразователя частоты по току:

– условие $I_{с\max}(\omega) \leq I_{и.н}$, имеем $33.72 \text{ A} < 44 \text{ A}$;

– условие $I_{эп.\max}(\omega) \leq I_{и.\max}$, имеем $61.77 \text{ A} < 70.4 \text{ A}$.

Следовательно, преобразователь частоты выбран правильно.

4.3. Принципиальная электрическая схема регулируемого электропривода.

Выбор силового электрооборудования

На рисунке 16 приведена схема силовой части частотно-регулируемого асинхронного электропривода погружного насоса *FP129/5*, которая включает в себя входные силовые цепи подключения преобразователя частоты к сети, схему силовой части преобразователя частоты с инвертором напряжения, а также выходные силовые цепи подключения приводного электродвигателя к преобразователю.

В состав схемы реализации силовой части преобразователя частоты *VLT5032* фирмы «*Danfoss*» входят следующие основные компоненты:

1. Неуправляемый выпрямитель, который предназначен для формирования пульсирующего выпрямленного напряжения. Схема выпрямления: трехфазная мостовая 6-ти пульсная.

2. Промежуточная цепь, представляющая собой фильтр, содержащий в случае использования инвертора напряжения только конденсатор, и сглаживающая выпрямленное напряжение. Индуктивность L в цепи

постоянного тока представляет собой коммутационный, а не сглаживающий дроссель [2].

3. Инвертор напряжения, который предназначен для формирования выходного напряжения с необходимыми значениями амплитуды и частоты, то есть требуемой формы.

Произведем выбор силового электрооборудования.

1. Автоматический выключатель (АВ) предназначен для отключения электрической цепи, непосредственно, при нормальных режимах – включений и отключений номинальных токов нагрузки и аварийных режимах – перегрузках, коротких замыканий, чрезмерном понижении напряжения питания, изменения направления мощности.

Произведем выбор АВ для электропривода погружного насоса *FP129/5*.

Максимальный потребляемый ток двигателя АИР180S2 при прямом пуске

$$I_{\text{макс}} = k_{\text{идв}} \cdot I_{\text{лн}} = 7 \cdot 41.39 = 289.73 \text{ А.}$$

Выбор автоматический выключатель производится:

– по соотношению номинальных напряжений выключателя и питающей сети $U_{QF} \geq U$.

– по соотношению номинального тока выключателя и пускового тока двигателя $I_{QF} \geq I$.

К установке принимаем автоматический трехфазный выключатель типа ВА52-300 с номинальным током отключения 300 А.

Каталожные данные АВ сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Выбор АВ электропривода погружного насоса *FP129/5*

| Исходные и расчетные данные | Каталожные данные [9] |
|--------------------------------------|--|
| | Автоматический выключатель ВА52-300 |
| $U = 380 \text{ В}$ | $U_{QF} = 380 \text{ В}$ |
| $I_{\text{макс}} = 289.73 \text{ А}$ | $I_{QF} = 300 \text{ А}$ |

2. Контактор – это электромагнитный аппарат, направленный на дистанционное включение-выключение силовых электрических сетей. Данный электромагнитный аппарат позволяет в нормальном режиме работы без перерыва производить бесконтактное включение-выключение электрических сетей, содержит: электромагнитную систему, контактную систему, состоящую из подвижных и неподвижных контактов, дугогасящую систему, систему блок-контактов (вспомогательные контакты, переключающие цепи сигнализации и управления при работе контакторов).

Произведем выбор главного контактора для коммутации электрической цепей частотно-регулируемого асинхронного электропривода погружного насоса *FP129/5*.

Выбор контактора производится по $I_{лн}$:

$$I_{KM} \geq I_{лн} ;$$

$$I_{KM} \geq 41.39 \text{ А}.$$

Тогда к установке в качестве контактора принимаем магнитный пускатель без теплового реле типа ПМА-63 с номинальным током коммутации 63 А.

Каталожные данные ПМА-63 сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Выбор главного контактора привода погружного насоса *FP129/5*

| Исходные и расчетные данные | Каталожные данные [9] |
|-----------------------------|---|
| | Магнитный пускатель ПМА-63 |
| $U = 380 \text{ В}$ | $U_{KM} = 380 \text{ В}$ |
| $I_{лн} = 41.39 \text{ А}$ | $I_{KM} = 63 \text{ А}$ |
| — | Количество вспомогательных контактов: 2з+2р |

3. Помехоподавляющий входной фильтр совместно с сетевыми коммутационными дросселями уменьшают напряжение помехи, создаваемой преобразователем. Также входной фильтр предназначен для выполнения требований стандартов электромагнитной совместимости [2].

Для электропривода погружного насоса *FP129/5* принимаем помехоподавляющий входной фильтр фирмы *MITSUBISHI ELECTRIC* марки *FR-A (F) 740-00310-00380* с номинальным током 55 А.

Условия выбора:

$$I_{Z1} \geq I_{1нн};$$

$$55 \text{ А} \geq 41.39 \text{ А}.$$

Параметры помехоподавляющего входного фильтра марки *FR-A (F) 740-00310-00380* для электропривода погружного насоса *FP129/5* сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Каталожные данные фильтра марки *FR-A (F) 740-00310-00380* [10]

| Номинальный ток, А | Ток утечки, А | Потери, Вт | Мощность подключаемого двигателя, кВт |
|--------------------|---------------|------------|---------------------------------------|
| 55 | <30 | 27.1 | 22 |

4. Питающая сеть подвержена воздействиям нелинейных приемников, которые вызывают деформации протекания синусоидального напряжения, следовательно, увеличивают потери, а также создают помехи для работы других машин и приборов, питающихся от сети. Применение коммутационных дросселей позволяет решить множество проблем. Коммутационные дроссели:

- ограничивают возникновение гармоник в сети;
- гасят коммутационные перенапряжения;
- в случае короткого замыкания уменьшают ток установившегося короткого замыкания.

Сетевые коммутационные дроссели являются двухсторонним буфером между приводом и сетью, снижая вредные воздействия одного на другое.

Для электропривода погружного насоса *FP129/5* принимаем сетевой трехфазный дроссель фирмы *MITSUBISHI ELECTRIC* марки *FR-BAL-B-11k/-15k*.

Условия выбора:

$$I_{L1} \geq I_{1\text{лн}};$$

$$42 \text{ A} \geq 41.39 \text{ A}.$$

Параметры сетевого коммутационного трехфазного дросселя марки *FR-BAL-B-11k/-15k* номинальным током 42 А для частотно-регулируемого электропривода поз. *FP129/5* сведены в таблицу 8.

Таблица 8. Каталожные данные трехфазного дросселя *FR-BAL-B-11k/-15k* [10]

| Номинальный ток, А | Индуктивность, мГн | Потери, Вт | Мощность подключаемого двигателя, кВт |
|--------------------|--------------------|------------|---------------------------------------|
| 42 | 0.667 | 68 | 22 |

5. Выходной дроссель компенсирует емкостные токи заряда/разряда в длинных соединительных кабелях и в некоторой степени ограничивает импульсные перенапряжения и dU/dt на клеммах двигателя, возникающие из-за эффекта отражения [2].

Для электропривода погружного насоса *FP129/5* принимаем выходной дроссель марки *6SE6400-3TC05-4DD0* фирмы «*Siemens*» с номинальным током 68 А.

Условия выбора:

$$I_{L2} \geq I_{1\text{лн}};$$

$$68 \text{ A} \geq 41.39 \text{ A}.$$

Параметры выходного дросселя марки *6SE6400-3TC05-4DD0* для электропривода погружного насоса *FP129/5* сведены в таблицу 9.

Таблица 9. Каталожные данные выходного дросселя 6SE6400-3TC05-4DD0 [11]

| Номинальный ток, А | Импульсная частота, кГц | Максимально допустимая длина кабеля между дросселем и двигателем, м | Мощность подключаемого двигателя, кВт |
|--------------------|-------------------------|---|---------------------------------------|
| 68 | 4 | 300 (неэкр.) | 22 |

6. Синусоидальные фильтры меняют импульсное напряжение инвертора ШИМ на синусоидальное напряжение, эффективно ограничивают негативное влияние преобразователя частоты на приводной электродвигатель и питающий кабель. Синусоидальный фильтр снижает выходное напряжение инвертора, ограничивает максимальную выходную частоту инвертора [2].

Для асинхронного частотно-регулируемого электропривода *FP129/5* принимаем синусоидальный фильтр марки *MCC 101* фирмы «Danfoss» с номинальным током 44 А.

Условия выбора:

$$I_{Z2} = I_{VLT.H} \geq I_{1лн};$$

$$44 \text{ А} = 44 \text{ А} \geq 41.39 \text{ А}.$$

Параметры синусоидального фильтра марки *MCC 101* фирмы «Danfoss» для привода погружного насоса *FP129/5* сведены в таблицу 10.

Таблица 10. Каталожные данные синусоидальный фильтр марки *MCC 101* [2]

| Номинальный ток $I_{MCC.H}$, А | Параметры питающей сети | | Выходное напряжение U_H , В | Рекомендуемая мощность P_2 , кВт |
|---------------------------------|---------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | $U_{1л}$, В | f_c , Гц | | |
| 44 | $3 \times (380 \div 440)$ | 50 | 380 | 22 |

7. Для удобства и безопасного измерения тока статора электродвигателя АИР180S2 воспользуемся трансформаторами тока.

Трансформаторы тока, в данном случае, являются промежуточным звеном и гальванической развязкой для согласования токов цепи статора двигателя и датчиков тока.

Выберем для установки 3 однофазных трансформатора тока марки ТК-120 с номинальным током 50 А.

Условие выбора выполняется:

$$I_{TT} \geq I_{лн};$$
$$50 \text{ А} \geq 41.39 \text{ А}.$$

Параметры трансформаторов тока ТК-120 для привода погружного насоса *FP129/5* сведены в таблицу 11.

Таблица 11. Каталожные данные трансформаторов тока ТК-120 [9]

| Номинальное напряжение, В | Номинальный первичный ток, А | Номинальный вторичный ток, А |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 380/660 | 50 | 5 |

4.4. Структурная схема силового канала регулируемого электропривода

Современные методы расчета и проектирования в сочетании с компьютерными и информационными технологиями позволяют решать задачу разработки, проектирования и настройки различных электромеханических комплексов в целом, и в частности, частотно-регулируемых асинхронных электроприводов со скалярным управлением. Поэтому для модернизации электропривода погружного насоса *FP129/5* и последующего его исследования выбрана структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат.

Структурная схема АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β и насосной нагрузкой приведена на рисунке 17.

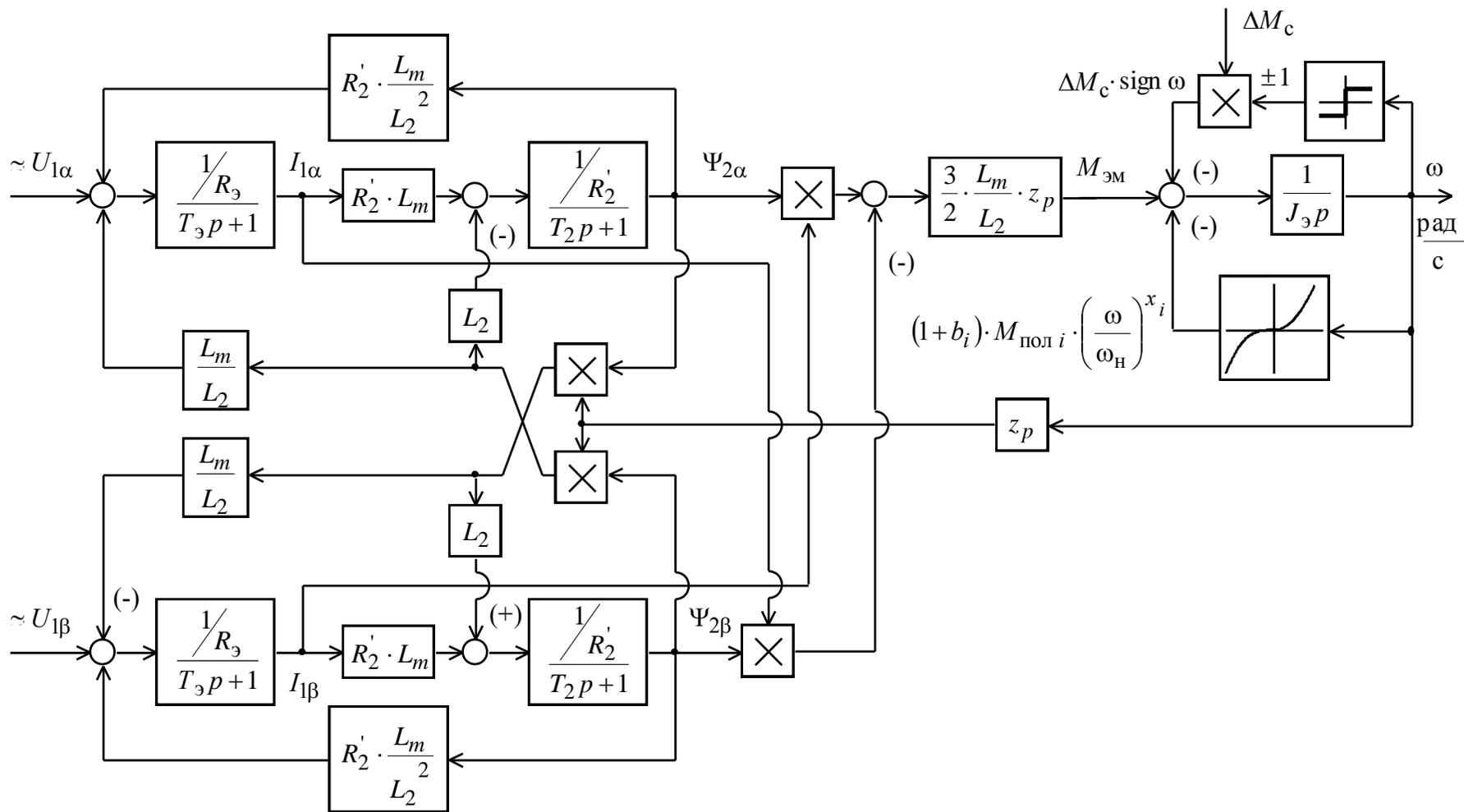


Рисунок 17. Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α , β

Входными величинами на структурной схеме рисунок 17 являются напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток приводного двухфазного асинхронного электродвигателя:
 $U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$ и $U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$.

4.5. Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Найдем параметры преобразователя частоты.

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции $T_{\text{ШИМ}}$.

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = 0.0002 \text{ с} ,$$

где $f_{\text{ШИМ}} = 5 \cdot 10^3$ Гц – несущая частота инвертора (частота ШИМ).

Максимальное значение амплитудного фазного напряжения электродвигателя

$$U_{1\text{фм}} = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311.13 \text{ В} .$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду параметры преобразователя выбираются в соответствии с приведенными ниже выражениями.

Для питания выбранного преобразователя частоты требуется напряжение сети находящееся в диапазоне 380÷440 В. Как правило, нехватка напряжения питающей сети может существенно сказаться на требуемые показатели проектируемого электропривода [2]. На начальном этапе проектирования примем напряжение питающей сети $U_c = 420$ В, с учетом того что имеется повышающий трансформатор.

Напряжение звена постоянного тока ПЧ

$$U_{d0} = 1.35 \cdot U_c = 1.35 \cdot 420 = 567 \text{ В.}$$

Условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1н}}{\gamma_{\text{макс}}} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0.96} \geq 561.34 \text{ В,}$$

где $\gamma_{\text{макс}} < 1$ – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора. Примем $\gamma_{\text{макс}} = 0.96$.

Тогда, $567 \text{ В} > 561.34 \text{ В}$. Следовательно, напряжения преобразователя и двигателя согласованы.

Коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{1\phi m}}{U_{\text{упмакс}}} = \frac{U_{1\phi m}}{10} = 327.36,$$

где $U_{\text{упмакс}} = 10 \text{ В}$ – максимальное значение напряжения управления.

Малая постоянная времени цепи обратной связи контура тока

$$T_{\mu\text{то}} = T_{\text{ос.т}} + T_{\text{ф.от}} = 0.0002 + 0 = 0.0002 \text{ с,}$$

где $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}$ – интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока;

$T_{\text{ф.от}} = 0 \text{ с}$ – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока.

Найдем параметры звеньев структурной схемы двигателя.

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 1.331 \cdot 10^{-3} + 0.058 = 0.059 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_{\mu} = 1.803 \cdot 10^{-3} + 0.058 = 0.06 \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния магнитного поля

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{0.058^2}{0.059 \cdot 0.06} = 0.05.$$

Эквивалентное активное сопротивление цепи статора (без учета сопротивления соединительных проводов)

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2'^2} = 0.156 + 0.153 \cdot \frac{0.058^2}{0.06^2} = 0.299 \text{ Ом}.$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0.05 \cdot 0.059}{0.299} = 9.866 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$T_2 = \frac{L_2'}{R_2'} = \frac{0.06}{0.153} = 0.392 \text{ с}.$$

5. РАСЧЕТ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА. ВЫБОР ДАТЧИКОВ

Произведем расчет каналов измерения координат частотно-регулируемого электропривода, по которым замыкаются обратные связи, то есть произведем выбор датчиков тока и давления.

1. Выбираем 3 трансформаторных датчика тока CR4110-5 компании CR «Magnetics», позволяющих измерить действующее значение переменного тока до 5 А с повышенным содержанием гармоник, так как они обладает рядом преимуществ:

- обеспечивают гальваническую развязку между обмотками, поэтому измерительная схема не находится под высоким потенциалом;
- их параметры практически не изменяются во времени и не зависят от температуры.

Условие выбора выполняется, когда номинальный измеряемый ток датчиков тока равен номинальному вторичному току трансформаторов тока:

$$I_{дт} = I_{тТ2};$$
$$5 \text{ А} = 5 \text{ А}.$$

Параметры трансформаторных датчика тока CR4110-5 компании CR «Magnetics» для привода погружного насоса FP129/5 сведены в таблицу 12.

Таблица 12.Каталожные данные датчиков тока CR4110-5 [12]

| Номинальный измеряемый ток, А | Номинальный выходной потенциал, В | Напряжение питания, В | Полоса рабочих частот, кГц | Быстродействие, мс |
|-------------------------------------|---|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 5 | 0...5 | 24 | 0.02...5 | 250 |

2. Выбираем в качестве датчика давления – датчик Метран-100-ДИ-1162.

Данный датчик предназначен для непрерывного преобразования значений давления жидкостей в унифицированный токовый сигнал в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами.

Условие выбора выполняется:

$$P_{ДД} \geq P;$$

$$P_{ДД} \geq 21.5 \cdot 100 \cdot 10^{-3} [\text{МПа}];$$

$$2.5 \text{ МПа} \geq 2.15 \text{ МПа},$$

где $100 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент для перевода значения давления из $\text{кг} \cdot \text{с} / \text{см}^2$ в МПа.

Параметры датчика давления Метран-100-ДИ-1162 для привода погружного насоса *FP129/5* сведены в таблицу 13.

Таблица 13. Каталожные данные датчика давления Метран-100-ДИ-1162 [13]

| Номинальный давление, МПа | Номинальный выходной ток, мА | Напряжение питания, В | Сопротивление нагрузки, Ом |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 2.5 | 4...20 | 12...42 | ≤ 42 |

6. ИМИТАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОГРУЖНОГО НАСОСА

6.1. Имитационная модель для исследования регулируемого электропривода

6.2. Имитационное исследование работоспособности регулируемого электропривода

6.3. Имитационное исследование работы регулируемого электропривода в режиме токоограничения

7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Более 60% вырабатываемой электроэнергии в настоящее время потребляется электрическими двигателями. Среди них наиболее распространенными являются электродвигатели переменного тока, среди которых главную роль занимает асинхронный двигатель, отличающийся своей простотой и надежностью.

Очевидно, что повышение отказоустойчивости неразрывно связано с живучестью электроприводов, обеспечивающих функциональные свойства технологического оборудования в заданных пределах. Обеспечить свойство живучести возможно на основе технологии построения избыточных систем, используя комбинацию следующих видов резервирования: структурного, функционального, временного, информационного и нагрузочного. Построение таких электроприводов невозможно без проведения экспериментальных исследований, разрабатываемых установок.

7.1 Планирование работ и их временных оценок.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой входит : научный руководитель и инженер. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. Структура работ приведена в таблице 1:

Таблица 1 –Перечень работ и оценка времени их выполнения

| № | Наименование работы | Количество исполнителей | Продолжительность, дн. |
|----|--|-------------------------|------------------------|
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Инженер 10р. НР 16р. | 1 |
| 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Инженер 10р. | 20 |
| 3 | Выбор направления исследований | Инженер 10р. НР 16р. | 2 |
| 4 | Календарное планирование работ по теме | Инженер 10р. | 3 |
| 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Инженер 10р. | 11 |
| 6 | Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов | Инженер 10р. | 9 |
| 7 | Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными | Инженер 10р. | 7 |
| 8 | Оценка эффективности полученных результатов | Инженер 10р. НР 16р. | 3 |
| 9 | Составление пояснительной записки | Инженер 10р. | 30 |
| 10 | Публикация полученных результатов | Инженер 10р. | 2 |

Всего 87 дн., в том числе НР 15 дн.

НР участвует в проекте 6%.

Календарное планирование в управлении проектами – это ключевой и важный процесс, результатом которого является утвержденный руководством компании календарный план проекта (часто его называют еще планом-графиком, календарным графиком, планом управления проектом).

Цель календарного планирования – получить точное и полное расписание проекта с учетом работ, их длительностей, необходимых ресурсов, которое служит основой для исполнения проекта.

Календарный план-график приведен в таблице 2.

Таблица 2 –Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| № работ | Вид работ | Исполнители | Продолжительность выполнения работ | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--|--------------------------------|------------------------------------|---|--------|---|---|---------|---|---|------|---|--------|---|---|--|---|
| | | | декабрь | | январь | | | февраль | | | март | | апрель | | | | |
| | | | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | | |
| 1 | Составление и утверждение технического задания | Научный руководитель и инженер | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Научный руководитель и инженер | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Выбор направления исследований | Научный руководитель и инженер | | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Календарное планирование работ по теме | Инженер | | | ■ | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Инженер | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| 6 | Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов | Научный руководитель и инженер | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| 7 | Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными | Инженер | | | | | | | | | | | ■ | | | | |
| 8 | Оценка эффективности полученных результатов | Научный руководитель и инженер | | | | | | | | | | | | ■ | | | |
| 9 | Составление пояснительной записки | Инженер | | | | | | | | | | | | | ■ | | |
| 10 | Публикация полученных результатов | Инженер | | | | | | | | | | | | | | | ■ |

График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу

7.2 Расчет сметы затрат на исследование.

При планировании бюджета научно-технического исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИИ используется следующая группировка затрат. Представлена общая формула (4.1).

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} \quad (4.1)$$

- (K_{mat}) материальные затраты;
- ($K_{ам}$) амортизация;
- ($K_{з/пл}$) затраты на заработную плату;
- ($K_{с.о}$) затраты на социальные нужды;
- ($K_{пр}$) прочие затраты;
- ($K_{накл}$) накладные затраты.

7.3 Расчёт материальных затрат.

Принимаем K_{mat} в размере 1000руб. на канцелярские товары;

7.4 Расчёт затрат амортизации.

Амортизация ($K_{ам}$) – это процесс переноса стоимости основных средств, на стоимость произведенной и проданной конечной продукции по мере их износа, как материального, так и морального. Расчёт производится по формуле (4.2).

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}} \quad (4.2)$$

где $T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники;

$T_{кал}$ – календарное время (365 дней);

$C_{кт}$ – цена компьютерной техники (30000 руб);

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет).

$$K_{ам} = \frac{92}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{5} = 1536 \text{ руб}$$

7.5 Расчёт затрат на заработную плату.

Подразумевает вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату ($Kз/нл$) для инженера и НР, расчёт осуществляется по формулам (4.3 – 4.5):

Месячная зарплата :

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n$$

$$ЗП_{мес} = ЗП_о * K_1 * K_2 \quad (4.3)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%);

K_2 – районный коэффициент (1,3=30%);

$ЗП_о$ – месячный оклад (инж = 17 000, науч.рук = 30 000руб);

$$ЗП_{мес \text{ инж}} = 17\,000 * 1,1 * 1,3 = 24\,310 \text{ руб};$$

$$ЗП_{мес \text{ н.р}} = 30\,000 * 1,1 * 1,3 = 42\,900 \text{ руб.}$$

Зарплата за фактическое отработанное время:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{мес}}{21} \cdot n \quad (4.4)$$

где 21 – число рабочих дней в месяц;

n – фактическое число дней в исследовании научной работы.

$$ЗП_{\phi \text{ инж}} = \frac{24310}{21} * 150 = 173\,642 \text{ руб};$$

$$ЗП_{\phi \text{ н.р}} = \frac{42900}{21} * 15 = 30\,642 \text{ руб.}$$

Заработная плата инженера/ научного руководителя:

$$Kз / пл = ЗПинж + ЗПнр \quad (4.5)$$

$$Kз/пл = 173\,642 + 30\,642 = 204\,284 \text{ руб}$$

7.6 Затраты на социальные отчисления.

Затраты на социальные отчисления (*Кс.о.*) – затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непромышленной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством. Рассчитывается по формуле (4.6)

$$Kс.о = \frac{Kз/пл \cdot 30\%}{100} \quad (4.6)$$

где, затраты на социальные нужды (отчисления) 30% от *Кз/пл*.

$$Kс.о = \frac{204284 \cdot 30}{100} = 61\,285 \text{руб}$$

$$Kнр = \frac{Kмат + Kам + Kзпл + Kс.о}{100\%} \cdot 10\% \quad (4.7)$$

где *Кнр* принимаются в размере 10% от (*Кмат + Кам + Кз/пл + Кс.о*).

$$Kнр = \frac{1000 + 1095 + 204284 + 61285}{100} \cdot 10 = 26\,766 \text{руб}$$

7.7 Накладные расходы.

Затраты на накладные ($K_{накл}$), не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др. Рассчитываются по формуле (4.8)

$$K_{накл} = \frac{K_{зп/пл} \cdot 200\%}{100} \quad (4.8)$$

где $K_{накл}$, принимаются в размере 200% от $K_{зп/пл}$.

$$K_{накл} = \frac{204284 \cdot 200}{100} = 408\,568 \text{ руб.}$$

7.8 Определение общего бюджета затрат на научно-исследовательскую работу.

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Процесс формирования бюджета, планируемых затрат представлен в формуле (4.1) и таблице 3.

$$K_{пр} = 1000 + 1095 + 204\,284 + 61\,285 + 26\,766 + 408\,568 = 702\,998 \text{ руб.}$$

Таблица 3 – Результаты полученных данных.

| № | Элементы затрат | Стоимость, руб. |
|---|----------------------------------|-----------------|
| 1 | Материальные затраты | 1000 |
| 2 | Амортизация компьютерной техники | 1095 |
| 3 | Затраты на заработную плату | 204 284 |
| 4 | Затраты на социальные нужды | 61 285 |
| 5 | Прочие затраты | 26 766 |
| 6 | Накладные расходы | 408 568 |
| | Итого: | 702 998 |

7.9 Смета необходимых материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования.

Любой план действий должен сопровождаться сметой расходов – составлением бюджета, который является количественным воплощением плана, характеризуя доходы и расходы на конкретный период и определяя потребность в ресурсах для достижения заданных планом целей. В таблице – 9 приведена смета затрат на выполнение исследовательской работы.

Таблица 9 – Смета затрат на оборудование

| № | Вид оборудования | Стоимость, руб |
|--------------|------------------|----------------|
| 1 | Компьютер | 30000 |
| 2 | Бумага А4 | 500 |
| 3 | ПО MatlabR2014a | 107500 |
| Итого | | 138 000 |

В данной главе произведен расчет стоимости ресурсов научно-технического исследования (НТИ), оценки инновационного потенциала НТИ, а также произведено описание «портрета» потребителя результата НТИ, составлен план выполнения работ.

Практическая реализация данного научного исследования должна привести к снижению затрат нустойки в таких отраслях как: химическая, металлургическая, электроэнергетическая, что принесет существенный экономический эффект, повысит показатели энергоэффективности и даст возможность к новому толчку наращивания производственных мощностей.

Осуществление этого проекта по модернизации электропривода погружного насоса *FP129/5* позволит увеличить срок службы технологического оборудования, а также оптимизировать и автоматизировать работу системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена.

8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ.

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения необходимых условий труда и безопасности в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам экологической безопасности. В связи с тем, что в нашей выпускной квалификационной работе рассматривается проблема модернизации электропривода погружного насоса *FP129* системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена, который, в свою очередь, является составной частью линии экструзии *P129* предприятия ООО «Томскнефтехим, вопросы производственной и экологической безопасности будут рассмотрены в пределах данной технологической системы.

Также важно отметить, что предприятия ООО «Томскнефтехим входит в государственный реестр особоопасных производственных объектов (ОПО) РФ, так как является взрывопожароопасным производством.

8.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Линия экструзии *P129* относится к опасным производственным объектам. Пыль полипропилена и стабилизаторов могут образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Открытое пламя, электрическая искра, разряд статического электричества могут быть причиной взрывов и пожаров на производстве. При нарушении требований охраны труда, эксплуатации оборудования, норм технологического режима могут возникать ситуации, приводящие к авариям и травмам.

Опасные и вредные факторы, воздействующие на работающего на линии экструзии *P129*, по природе действия подразделяются на следующие группы: физические, химические, факторы трудового процесса.

А) Физические опасные и вредные производственные факторы:

1) Движущиеся механизмы, незащищенные подвижные элементы оборудования.

Движущееся и вращающееся оборудование, используемое на линии (насосы, вентиляционные установки, экструдеры, грануляторы и т.д.) являются потенциальными источниками механических травм при нарушении правил обслуживания, эксплуатации и при отсутствии ограждений. Все вращающиеся и движущиеся части механизмов должны быть ограждены защитными решетками и различными ограждениями, кожухами, исправность которых необходимо проверять перед началом работы оборудования.

2) Повышенная загазованность и запыленность воздуха рабочей зоны.

При нагреве полипропилена и его сополимеров до температуры выше 150 °С возможно выделение в воздух рабочей зоны летучих продуктов термоокислительной деструкции, содержащих органические кислоты, карбонильные соединения, в том числе, вредные для организма человека вещества, формальдегид, ацетальдегид и окись углерода.

3) Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов и повышенная температура в рабочей зоне.

В качестве теплоносителя на линии используется пар низкого давления 0.45 МПа (4.5 кгс/см²) с температурой до 165 °С, диатермическое масло с температурой до 300 °С. В местах отсутствия изоляции на трубопроводах и рубашках аппаратов, а также при нарушении герметичности оборудования существует опасность получения термического ожога.

4) Повышенные уровни вибрации, производственного шума на рабочем месте.

Шум на рабочем месте оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека и результаты его деятельности. Для защиты органов слуха необходимо применять соответствующие шуму наушники или противозумные вкладыши, беруши.

Б) Группа факторов трудового процесса определяет тяжесть труда, нап-

ряженность труда.

В) Группа химических опасных и вредных производственных факторов подразделяется по характеру действия на организм человека: на общетоксические, раздражающие, сенсибилизирующие, канцерогенные, мутагенные и влияющие на репродуктивную функцию, действующие через дыхательные пути, пищеварительную систему, кожный покров.

На линии применяются вещества, которые при длительном вдыхании при превышении ПДК в воздухе рабочей зоны могут оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека (стабилизаторы, пыль полипропилена, добавки и т.д.). Например, стеарат кальция: взрывоопасен, оказывает раздражающее действие на слизистые оболочки. ПДК в воздухе рабочей зоны равно 3 мг/куб.м. Нижний концентрационный предел взрываемости равна 17.6 г/ куб. м.; температура плавления 125-147 °С.

Г) Также при нарушениях нормального технологического режима, разгерметизации оборудования возможно:

- загазованность рабочих помещений и близлежащих территорий, что может привести к взрыву, пожару, отравлениям;

- термические ожоги горячими газами, водяным паром, горячей водой и конденсатом;

- химические ожоги при попадании на тело человека химических веществ.

Д) Опасности при нарушениях правил безопасности:

- 1) Поражение электрическим током при неисправностях электрооборудования и электрических сетей, а также в результате несоблюдения правил электробезопасности;

Для осуществления технологического процесса на установке используется электроэнергия. При неисправности электрооборудования, электрических сетей, а также при несоблюдении правил электробезопасности существует опасность поражения электрическим током. Во избежание этого необходимо перед началом работ проверить состояние всех электрических

кабелей и заземлений. Кабеля не должны иметь повреждений, распределительные коробки и места присоединения кабелей к оборудованию и электродвигателям должны быть закрытыми, заземления целыми и прочно соединены с оборудованием.

2) Механические травмы при неправильном обслуживании механизмов и другого оборудования, без защитных средств или неисправных СИЗ;

3) Загорание смазочных и уплотнительных масел и обтирочных материалов при несоблюдении правил хранения их и нарушений противопожарных норм.

Е) Опасности, связанные с эксплуатацией оборудования, работающего под высоким давлением, выполнением работ на высоте, в заглубленных емкостях (из-за скопления в них взрывоопасных и токсичных веществ и низкого содержания O_2 (ниже 18%)).

8.2. Производственная санитария

1. Метеорологические условия внешней среды.

В помещениях, в которых находятся линии экструзии при выполнении работ по производству гранулированного полипропилена, связанных с нервно-эмоциональным напряжением, должны поддерживаться комфортные метеорологические условия внешней среды: температура, влажность, скорость движения воздуха, освещенность.

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается на линии экструзии *P129*, в соответствии с [18] следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная с центробежными вентиляторами (кратность воздухообмена 1);
- системы местных отсосов для удаления вредных, пожароопасных и взрывоопасных веществ от мест их образования и выделения;
- системы воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;
- герметизация технологического оборудования.

Допустимые параметры микроклимата, на основании [18], приведены в таблице 22.

Таблица 22. Допустимые параметры микроклимата

| Показатели | Холодное время года | Тёплое время года |
|---|---------------------|-------------------|
| 1. Температура воздуха, °С | | |
| – диапазон ниже оптимальных величин | 19.0-20.9 | 20.0-21.9 |
| – диапазон выше оптимальных величин | 23.1-24.0 | 24.1-28.0 |
| 2. Относительная влажность, % | 15-75 | 15-75 |
| 3. Удельный расход воздуха, м ³ /ч | 8.5 | 8.5 |
| 4. Скорость движения воздуха, м/с | | |
| – для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более | 0.1 | 0.1 |
| – для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более | 0.2 | 0.3 |
| 5. Температура поверхностей, °С | 18.0-25.0 | 19.0-29.0 |

Оптимальные параметры микроклимата, согласно [18], приведены в таблице 23.

Таблица 23. Оптимальные параметры микроклимата

| Показатели | Холодное время года | Тёплое время года |
|---|---------------------|-------------------|
| 1. Температура воздуха, °С | 21-23 | 22-24 |
| 2. Относительная влажность, % | 60-40 | 60-40 |
| 3. Удельный расход воздуха, м ³ /ч | 8.5 | 8.5 |
| 4. Скорость движения воздуха, м/с | 0.1 | 0.1 |
| 5. Температура поверхностей, °С | 20-24 | 21-25 |

При обеспечении допустимых величин микроклимата на рабочем месте технологического и обслуживающего персонала должны соблюдаться условия:

- перепад температуры воздуха по высоте не более 3 °С;
- перепад температуры воздуха по горизонтали и изменение в течение смены – 4 °С.

Оптимальная для работы температура составляет: 25 °С.

2. Производственный шум и вибрации.

Источниками производственного шума и вибрации на линиях экструзии являются насосы, вентиляторы, центробежные сушилки, грануляторы.

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 и вибрации по СанПиН 2.2.4/2.1.8.566- 96 предусматриваются и имеется на линиях экструзии:

- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы);
- а также, обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;

Таблица 24. Предельно допустимые уровни шума при работе линий экструзии

[3]

| Рабочее место | Уровни звукового давления, дБ | | | | | | | | | По шкале |
|----------------------|-------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----------|
| | 31.5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| Линия экструзии Р129 | 107 | 95 | 87 | 82 | 78 | 75 | 73 | 71 | 69 | 80 |
| ЦПУ Q-2 | 96 | 83 | 74 | 68 | 63 | 60 | 57 | 55 | 54 | 65 |

3. Освещение.

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность [20]. Освещение должно быть достаточное, равномерное, без слепящего действия.

В помещении корпуса 111 предприятия ООО «Томскнефтехим», в котором находятся линии экструзии, предусматривается освещение в соответствии со СНиП 23 – 05 – 95:

- искусственное освещение, комбинированная система (источники освещения: лампы накаливания, лампы газоразрядные);

- рабочее освещение, для освещения помещения в соответствии с характером выполняемых работ применяют люминесцентные лампы низкого давления дневного света с исправленной цветностью ЛДЦ, и дневного света ЛД со светильниками рассеянного света пылеводозащищённые типа ПВЛМ;

- аварийное, для продолжения работ при отключении рабочего освещения (питание от независимого источника энергии – аккумуляторных батарей) с лампами накаливания в универсальных светильниках прямого света типа «Астра», УПМ-15, светильник типа ПСХ;

- эвакуационное (по основным проходам и лестничным клеткам).

8.3. Расчет защитного заземления помещения линии экструзии Р129

Для установки нового оборудования проведем расчет заземляющего устройства.

Данные для расчёта заземления:

1. Заземление необходимо выполнить для линий, работающей под напряжением 380 В.

2. Для заземления используем трубы диаметром 4 мм и длиной 2.5 м и сталь полосовую 18x4 мм, т.е. $D=1.8$ см.

3. Заземлители должны располагаться ряд.

4. Характер грунта в месте установки заземления – глина. Глубина заложения заземлителей 2 м, а расстояние между трубами принимаем равной трём длинам заземлителей, т.е. $a=7.5$ м.

Верхние концы соединены с помощью полосовой стали. Определим, что для данного случая по нормам допускается сопротивление не более 4 Ом. Удельное сопротивление глины составляет $\rho_T = 0.6 \cdot 10^4$ Ом·см. Учитывая применение грунта зимой и просыхания его летом, определяем расчётные значения $\rho_{\mathcal{E}}$ и ρ_n при использовании трубчатых заземлителей и соединительной полосы:

$$\rho_{\mathcal{E}} = \rho_T \cdot \kappa_{\mathcal{E}} = 0.6 \cdot 10^4 \cdot 1.9 = 1.14 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см.}$$

где $\kappa_{\mathcal{E}} = 1.9$ – коэффициент для вертикальных электродов.

$$\rho_n = \rho_T \cdot \kappa_n = 0.6 \cdot 10^4 \cdot 5 = 3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см.},$$

где $\kappa_n = 5$ – коэффициент для горизонтальных электродов.

Определим величину сопротивлений одной забитой в землю трубы по выражению:

$$\begin{aligned} R_{\mathcal{E}} &= \frac{\rho_{\mathcal{E}}}{2 \cdot \pi \cdot l_m} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_m}{d} + 0.5 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_m + l_m}{4 \cdot h_m \cdot l_m} \right) = \\ &= \frac{1.14 \cdot 10^4}{2 \cdot 3.14 \cdot 250} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 250}{0.4} + 0.5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 200 + 250}{4 \cdot 200 \cdot 250} \right) = 51.81 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где $l_m = 250$ см – длина заземления (по данным расчета);

$d = 0.4$ см – диаметр заземления (по данным расчета);

$h_m = 200$ см – глубина заложения заземления (по данным расчета).

Необходимое число заземлителей

$$n = \frac{R_{\mathcal{E}}}{R_Z} = \frac{51.81}{4} = 12.95 \text{ шт.},$$

где $R_Z = 4$ Ом – нормативная величина сопротивление

Примем $n = 13$ шт.

Ток растекается через полосу, соединяющую трубы. Она может рассматриваться как дополнительный заземлитель, длиной:

$$l_{ml} = 1.05 \cdot a \cdot (n - 1) = 1.05 \cdot 7.5 \cdot (13 - 1) = 94.5 \text{ м}.$$

Размер помещения корпуса 111, в котором находятся линии экструзии 17x45 м, длина соединительной полосы вписывается в его размер.

Результирующее сопротивление (полосы и трубы)

$$R_c = \frac{R_{\text{э}} \cdot R_{\text{л}}}{R_{\text{э}} \cdot J_{\text{л}} + R_{\text{л}} \cdot J_{\text{э}} \cdot n} = \frac{51.81 \cdot 8.6}{51.81 \cdot 0.86 + 8.6 \cdot 0.85 \cdot 13} = 3.19 \text{ Ом},$$

где $R_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{T}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{мл}}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_{\text{мл}}^2}{h_{\text{м}} \cdot D} = \frac{0.6 \cdot 10^4}{2 \cdot 3.14 \cdot 945} \cdot \ln \frac{2 \cdot 945^2}{200 \cdot 1.8} = 8.6 \text{ Ом}$ – сопротивление

полосы,

$J_{\text{э}} = 0.85$ – коэффициент использования труб;

$J_{\text{л}} = 0.86$ – коэффициент использования полосы.

Таким образом, рассчитанный заземлитель соответствует требованиям [ГОСТ 12.1.030-81], ведь:

$$R_c \leq R_z ; \\ 3.19 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом}.$$

Данная величина удовлетворяет требованиям защитного заземления. Контроль заземления производится при приеме в эксплуатацию, а также периодически, в сроки, установленные правилами, при перекомпоновке оборудования и ремонте заземлителей.

Схема расположения устройства защитного заземления по отношению к зданию показана на рисунке 31.

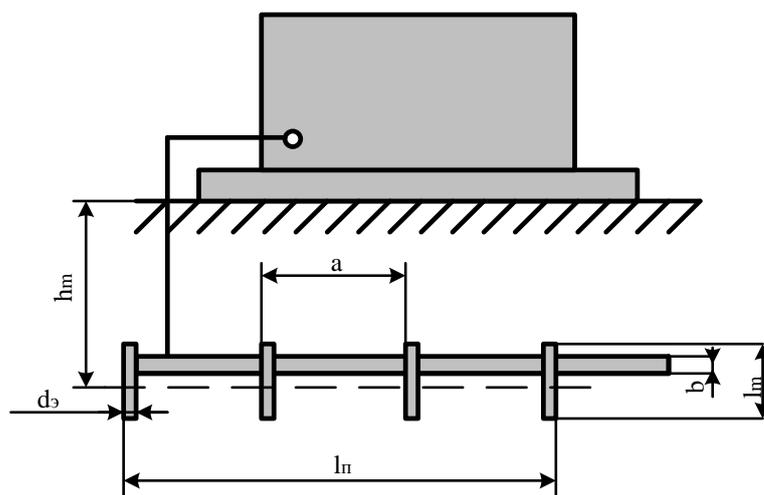


Рисунок 31. Схема защитного заземления помещения корпуса 111, в котором находятся линии экструзии

В данном случае выполняем выносное заземление. Заземлители располагаются на некотором удалении от здания. Поэтому заземление корпуса находится вне поля растекания и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли.

8.4. Пожарная безопасность

Причинами возникновения аварий и аварийных ситуаций, вызывающих пожар, является наличие утечек, свищей, неплотности фланцевых соединений оборудования, коммуникаций и нарушение герметичности мягких патрубков, разгерметизация оборудования, нарушение контура заземления оборудования, коммуникаций, неисправность системы «азотного дыхания».

В случае загорания продуктов, загазованности, разгерметизации оборудования, коммуникаций, мягких патрубков первый заметивший окриком оповещает окружающих о пожаре, сообщает об аварии (о пожаре) начальнику пожарной смены по телефону 70-33-02, по радиосвязи или селектору. Приступает к выводу посторонних, оказанию первой помощи

пострадавшим, локализации и ликвидации аварии и действует согласно «ПЛАС» (план ликвидации аварийных ситуаций) под руководством начальника смены.

Для тушения возможных загораний на линии применяются:

- песок;
- огнетушители ОП-5;
- вода;
- асбестовое полотно для тушения небольших возгораний на задвижках,

фланцах и другой арматуре.

Кроме этого предусмотрено автоматическое пожаротушение и пожарные краны.

Пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями. Системы пожарной безопасности должны выполнять следующие задачи:

- исключать возникновение пожара;
- обеспечивать пожарную безопасность людей;
- обеспечить пожарную безопасность материальных ценностей.

Также в помещениях, в которых находятся линии экструзии, должен быть разработан план эвакуации при пожаре, в котором должны быть отмечены все выходы из помещения.

План эвакуации при пожаре из корпуса 111, в котором находится линия экструзии P129, изображен на рисунке 32, где стрелочками нанесены пути, по которым следует производить эвакуацию.

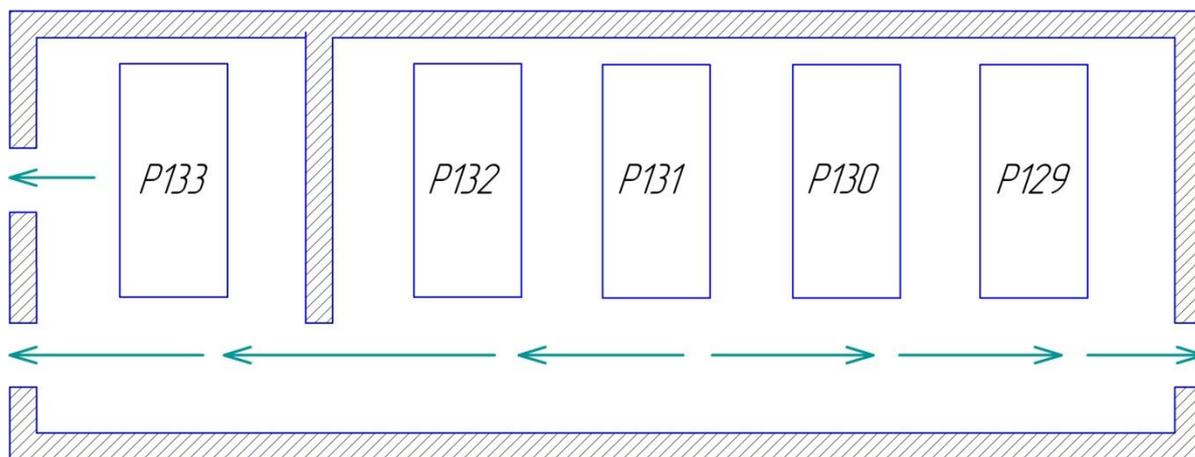


Рисунок 32. План эвакуации при пожаре корпуса 111, в котором находится линия экструзии *P129*

8.5. Охрана окружающей среды и экологическая безопасность

Для нормального дальнейшего развития любого производства необходимо проводить огромную работу по охране окружающей среды. [19].

Охрана окружающей среды основана на системе государственных, юридических, общественных, технических мероприятий, направленных на поддержание благоприятных условий среды обитания и рациональное использование материальных и энергетических ресурсов.

Охрана окружающей среды на ООО «Томкнефтехим» в целом, и на линии экструзии *P129* в частности, реализуется за счет высокого уровня технических решений действующих производств. Эффективную реализацию экологической политики обеспечивает эксплуатация специальных объектов природоохранного назначения. Это накопитель производственных отходов, локальные очистные сооружения, газопылеулавливающие установки, ливневые амбары и др. Организованная на ООО «Томскнефтехим» система управления в сфере природопользования и охраны окружающей среды также является залогом успешного и экологически чистого функционирования всех производств предприятия.

С 1983 г. на предприятии работает Отдел охраны окружающей среды, основная задача которого – организация производственной и хозяйственной деятельности подразделений в соответствии с требованиями природоохранного законодательства, обеспечение соблюдения установленных экологических нормативов, организация производственного контроля с целью минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

С целью реализации экологических целей, для повышения эффективности управления системой природопользования и экологической безопасности, снижения вероятности экологических рисков на предприятии ежегодно разрабатывается Целевая программа «Регулирование качества окружающей среды».

Контроль за состоянием окружающей среды в районе предприятия осуществляется аккредитованной Центральной лабораторией аналитического контроля промышленной санитарии и охраны окружающей среды (ЦЛАК ОСиПС) в соответствии с утвержденной программой производственного контроля за влиянием хозяйственной деятельности и мониторинга окружающей среды.

Фактический объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при работе линии экструзии *P129* не превышает нормативов, установленных в разрешении на выброс. Контроль качества атмосферного воздуха по 17 ингредиентам на границе санитарно-защитной зоны предприятия еженедельно осуществляет ЦЛАК ОСиПС. В год выполняется до 1700 анализов, с 2012 года по I кв. 2013 года превышений в контрольных точках не зарегистрировано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации произведена модернизация электропривода погружного насоса *FP129/5* установки гранулирования полипропилена системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена линии экструзии *P129*. А также, представлены предложения по интегрированию данного электропривода в автоматизированную систему по поддержанию производительности погружного насоса на уровне $Q=120$ м³/ч при давлении $p=21.5$ кг·с/см².

Тем самым, произведено обоснование выбора системы управления электроприводом погружного насоса и, на основании этого, разработан и исследован частотно-регулируемый однозонный электропривод с квадратичным скалярным законом управления, с корректировкой вольт-частотной характеристики и ограничением тока двигателя.

Имитационные исследования показали, что разработанный электропривод полностью удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к нему, и обеспечивает высокий уровень защиты электродвигателя. Переходные процессы в электроприводе погружного насоса протекают относительно плавно с ограничением динамического момента и тока приводного двигателя.

Практическими ценностями работы являются: функциональная схема регулируемого электропривода *FP129/5*, принципиальная электрическая силовая схема, имитационная модель для исследования параметров частотно-регулируемого привода в компьютерной среде *MATLAB-Simulink*.

В экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрены вопросы планирования и проведения электромонтажных и пуско-наладочных работ, составлена смета на проведение исследовательского проекта.

Рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности, пожарной безопасности и охраны окружающей среды при работе линии экструзии *P129*.

А также произведен расчет защитного заземления помещения корпуса 111 и разработан план эвакуации при пожаре из данного помещения.

Данная тема является актуальной, а работа может иметь практическое применение. Осуществление этого проекта по модернизации электропривода погружного насоса *FP129/5* позволит увеличить срок службы технологического оборудования, а также оптимизировать и автоматизировать работу системы охлаждения и транспортировки гранул полипропилена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Слесаренко В.В. Насосы и тягодутьевые машины тепловых электростанций: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2002. – 84 с.
2. Удут Л.С. и др. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 448 с.
3. Рабочая инструкция 102 – Р-2. Для машиниста гранулирования пластмасс 5, 6-го разрядов узла гранулирования полипропилена (по обслуживанию экструдеров и ЦПУ Q-2), 2011. – 202 с.
4. Браславский И.Я. и др. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 202 с.
5. Золотовский Д.В. Плавный пуск электродвигателя. – М.: Издательский центр «Академия». – 2008, с 85 с.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия. – 1973. – 400 с.
8. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 218 с.

9. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: учебное пособие. – Томск: Том. политехн. ун-т., 2005. – 168 с.
10. *MITSUBISHI ELECTRIC*. Каталог дополнительного оборудования для преобразователей частоты *FR-A 700* и *FR-F 700*. – 9 с.
11. Выходные дроссели – Силовые компоненты со стороны нагрузки // Каталог продукции департамента «Автоматизация и Приводы». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aqad.ru/index.php?tree=1000000&tree2=9990173&tree3=10007361&tree4=10008002&tree5=10035293&tree6=10035294&tree7=10035301&tree8=10035313>, свободный. – Загл. с экрана.
12. *CR 4110-5* датчик тока // Каталог // *T-WAY*: Электронные компоненты для серийного производства и разработок. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://t-way.ru/article.asp?articleName=CR4110-5&articleID=1964501>, свободный. – Загл. с экрана.
13. Датчики давления Метран-100. Руководство по эксплуатации СПГК.5070.000.00-01 РЭ. Версия 2.4., 2007. – 132 с.
14. Нормы проектирования. Электротехнические устройства. СНиП 3.05.06-85. – М.: Стройиздат, 1989, 53 с.
15. Стандартные решения «Данфосс». Экономия электроэнергии, сокращение капитальных затрат и увеличение срока службы. – М.: Издание *PE-MMSC*. 2012. – январь.
16. 7.2. Дополнительная заработная плата и порядок расчета ее составляющих // Электронное учебное пособие Бухгалтерский финансовый учет. Практикум. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eos.ibi.spb.ru/pluginfile.php/16931/mod_resource/content/0/8_4/15/15_P1_R1_T7.html#2, свободный. – Загл. с экрана.
17. ГОСТ Р 51757-2001. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В для механизмов собственных нужд тепловых

электростанций. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.

18. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997, 15 с.

19. Нормы проектирования. Вспомогательные здания и помещения промышленных предприятий. СНиП 11.92.-76. – М.: Стройиздат, 1982. – 36 с.

20. Назаренко О.Б. Безопасность жизнедеятельности. Расчёт искусственного освещения: методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 15 с.

Rationale for selection of electric submersible pump

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------|---------|------|
| 5ГМ5Б | Суровец Алексей Дмитриевич | | |

Консультант кафедры ЭПЭО:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|------------------------------|---------|------|
| Зав. кафедрой | Дементьев Ю.Н. | Кандидат технических наук | | |

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Баластов Алексей Владимирович | | | |

Rationale for the variable frequency drive

There are several factors that determine the need for electric submersible pump unregulated modernization FP129 / 5 cooling and transporting the pellets of polypropylene extrusion line R129 enterprise LLC "Tomskneftekhim":

I. This electromechanical system does not allow to maintain a certain pressure, designed to process pellets in the transportation process, the pipeline hydraulic transportation costs for different pumping of demineralized water. And also to maintain the performance of the submersible pump, pos. R129 / 5 at this pressure $p = 21.5 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$.

Therefore, it is necessary to create a regulated electric drive, which is constructed on the basis of autom atizirovannaya feedback system pressure to automatically maintain a given process variable.

The most advanced is the regulation by a frequency converter which enables to smoothly adjust the motor speed, thus regulate the submersible pump performance FP129 / 5, and to maintain a predetermined pressure $p = 21.5 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ in the hydraulic system at different costs pumped demineralized water . At low cost P129 / 5 drive motor will rotate at low speed required to maintain only nominal pressure. By increasing the flow of demineralized water inverter motor speed will increase, increasing the pump capacity P129 / 5, while maintaining a predetermined pressure.

Advantages of control by the frequency converter:

- Perhaps maintaining performance submersible pump P129 / 5 $Q = 120 \text{ m}^3 / \text{h}$ at a pressure of $p = 21.5 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ hydraulic transport in the pipeline, which is one of the technical requirements to the drive FP129 / 5;

- If necessary speed can be adjusted manually by the operator of the motor within a predetermined range;

- The efficiency of the mechanism poses. P129 / 5 in the control range is a maximum;

- Increased automation level, there is the prospect of integration into a higher level control system.

I. Submersible pump pos. R129 / 5 is selected based on the maximum capacity $Q = 120 \text{ m}^3 / \text{h}$ and is equipped with a non-regulated asynchronous electric pos. FR129 / 5, running at a constant speed. Nevertheless, R129 / 5 does not operate continuously at maximum load. This occurs: 1) as a result of changing modes of R129 extruder: in moments of starting and stopping, when switching to other brands of polypropylene granules (change of key performance extruder R129 from 2 t / h up to 3 t / h). 2) based on the level of demineralized water in a buried tank pos. R129 / 2 which leads to a significant loss of power.

The above leads to the need to regulate the performance R129 / 5 submersible pump.

Capacity Control Methods pumps:

1) Changing the network characteristics (increase or decrease the resistance in the pipeline hydraulic transport).

An example of the first method of regulation is choking - to change the flow cross section of hydraulic transport pipeline (increasing network resistance) due to movement of the valve or any other throttling device. But this method has significant drawbacks:

- The method is not economical;
- Efficiency-regulated plants are usually always lower than the efficiency at nominal conditions;
- Since the greatest pitch is achieved at full throttle, that this method only applies regulation to reduce feeding.

2) change in the characteristics of the pump unit, namely, the drive motor speed.

The second way is to change the speed of the impeller of the pump unit. This method avoids the overhead. Technically it can be implemented using a variable frequency drive or while the machine between the blade and the motor speed variator (e.g., hydraulic or electromagnetic clutch). But variators are of limited use because they are very unreliable, difficult to manufacture and significantly complicate the operation of the pumps.

Advantages of frequency control performance in that:

- Reduced energy consumption (as experience has shown, the use of variable frequency drive provides up to 30% savings in electricity [4]);
- Avoids throttling;
- There is an additional increase in productivity of the pump unit R129 / 5 with an increase in productivity R129 extruder during the transition to another brand variety of polypropylene granules.

III. Direct inclusion of the submersible pump R129 / 5 causes water hammer in the pipeline hydraulic transportation cooling and transport pellets. To prevent this, before starting the pump driver plastics granulation should close the front flap, then gradually open it, and to stop the pump - closed again that, in this case, increases the role of the human factor in the event of an emergency.

Shock mechanical load on the pump unit for direct start leads to an increase in the gaps in the mechanical connection between the engine premature wear of joints "motor - pump head" - the failure of the key to the shaft of the pump unit, premature wear of the bearings, clutch open or damage (deformation) of the impeller [5].

Also, direct start submersible pump motor creates a shock load on the three-way automatic valve pos. H3100V-A, stop valves, hydraulic transport pipeline, thereby reducing the service life of equipment and can be formed breakthroughs shabby areas of pipes and their joints (couplings, flanges), occur significant leak of

demineralized water, which will cause a breakdown of the process and significant costs of repairing equipment companies.

Ways to solve the problem of direct start:

1) Start the scheme "star - triangle".

Submersible pump mechanism R129 / 5 has a low moment of inertia, so the start-up based on a "star - triangle" is not very efficient, in other words even uneconomical. The fact that the diameter of the pump unit R129 / 5 small. Then the impeller mass is small, so small, and the moment of inertia. As a result, start-up and subsequent dispersal of R129 / 5 do rated speed is required no more than a couple of dozen periods of the mains voltage. It also means that the pump is switched off when a "star" configuration and before proceeding to the "triangle" (switching current) very quickly, almost immediately, stop [5], the rotational emf disappears and the motor will have to run a second time directly.

2) Using the SCP (soft starter) or IF.

SCP allows you to perform the following tasks:

- To limit the inrush current of the drive motor (in most cases at the level of $(3 \div 4.5) \cdot I_n$) and drawdown mains power depending on the power transformer and power characteristics of the connecting power rails;

- Optimize starting and stopping points of the drive motor for the unstressed acceleration and stops the submersible pump pos. R129 / 5 extend thus useful life of bearings, the pump mechanism;

- Emergency to protect the mains supply from overcurrent, jamming of the motor shaft.

- Excluded hammering in the pipeline hydraulic transportation cooling and transporting the pellets at launches and other transients submersible pump pos. R129 / 5;

IF solves all the above problems inherent in the SCP, and can also perform the following functions:

- As mentioned earlier, to regulate the engine speed in the steady state;

- To increase the starting torque of the drive motor submersible R129 / 5 of the pump relative to the nominal;

- Reduce motor starting current submersible pump R129 / 5 to less than that required to rotate the rotor at the time of launch.

Based on the foregoing, a simplified functional submersible pump control circuit Pos. R129 / 5 with a frequency converter with the prospect of creating an automated feedback system pressure is shown in Drawing 3.

The input signals are the system pressure setting and the actual pressure signal obtained from a pressure sensor mounted in the feedback loop. The deviation between the actual and the set pressure values are converted by the PID regulator in the frequency of the reference signal for the transmitter [6]. Under the influence of the IF reference signal changes the motor speed submersible pump R129 / 5 and seeks to bring the difference between the setpoint and actual value to zero. Thus, the pressure in the system is maintained at a predetermined pressure $p = 21.5 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ and does not depend on the flow of demineralized water.

2.2. Choice of Law and frequency regulation

Under the frequency control means the management of the AC electric motor by changing the amplitude and frequency of the supply voltage to the motor.

To carry out the process of the cooling process and transportation of polypropylene granules require a small range (less than 10) R129 / 5 control submersible pump speed. Also turbo machinery, which include all types of pumps do not require the provision of high multiplicity of starting and maximum points, but a smooth start is required. As coasting deceleration mode may be used, in which case the electric motor is disconnected from the mains by inertia and stops. But then the braking zone working with the actuator when switching to a higher speed and a lower speed should be performed without converting the mechanical energy of the rotating masses into electrical energy [2]. This method of braking causes the appearance of surge currents on which the request to the drive FR129 / 5 need to get rid of, so we choose the method of deceleration - controlled electrical braking.

A control method as select, cheaper open scalar correction current-frequency characteristic of a method of regulating the driving motor of the submersible pump speed.

This method of control allows to smoothly change the rotational speed of the impeller of the pump unit Pos. R129 / 5 in accordance with the technical requirements to the drive FR129 / 5 and increase the starting torque of the drive motor at low speeds to the desired values.

Then one of the two frequency control laws may be adopted, either. Square law is more complicated as compared with a linear, in implementation, but due to an additional voltage drop reduces the consumption of electric power network.

2.3. Functional diagram of the regulated electric

Choosing for a submersible pump drive parameters control the type of the frequency converter (inverter) - the intermediate DC link. Functional diagram of the DC power frequency converter with intermediate shown in Figure 4.

The frequency converter with an intermediate DC link voltage conversion is performed twice (energy) supply network: first, it is rectified by the rectifier UD, and then constant voltage with UZ inverter converted into the alternating voltage (or current). Between the rectifier and inverter is usually included the Z filter, smoothing the pulsation or the rectified voltage or rectified current.

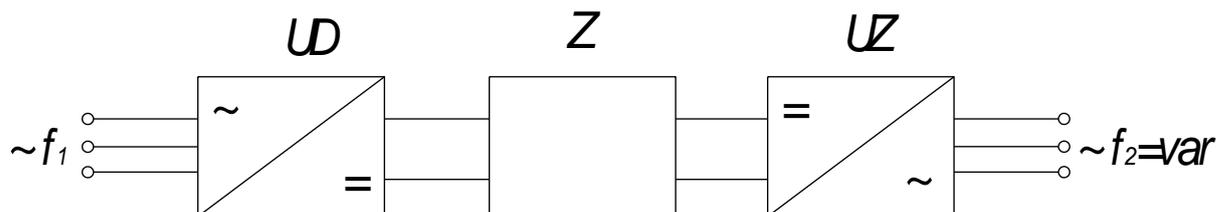


Figure 4. Functional diagram of the power part of the frequency converter with intermediate DC

The main advantages of the inverter with an intermediate DC link are, firstly, the ability to obtain at its output by autonomous inverter virtually any (desired in practice) variable in a wide range of frequency, regardless of the mains frequency, secondly, its relative cheapness at compared to many other inverter.

The main drawback - is double energy conversion, which reduces the efficiency and increases its weight and dimensions.

Based on the foregoing, the functional diagram of an implementation of asynchronous frequency-controlled electric submersible pump FR129 / 5 with scalar control without speed sensor with a quadratic control law is shown in Figure 5.

Functional scheme is based on a modular principle. The modules (card) expansion in its composition contain analog and digital inputs and outputs, as well as communication interfaces.

The main elements of the functional diagram of the submersible pump variable frequency drive FR129 / 5 with scalar control are:

- Asynchronous motor with cage rotor;
- Power of the frequency converter, an inverter which has a power key management driver;
- A converter control unit that includes a 3-phase generator system of control voltages, and shaper and 6-channel PWM signal;
- Shaper characteristics;
- Voltage inverter control unit Ud-correction of the actual value of the voltage DC link of the frequency converter functions;
- Connected to the stator winding of the motor current transformers TA (1 ... 3) phase motor current sensors;
- Comparison element allowable maximum value with the value of the current phase of the actual motor current and current limit control;
- Linear speed dial intensity.

Reliable operation of the frequency converter is largely determined by how the reliability of the key, and the organization of the correct management and protection of the power modules. These functions are provided and drivers. An intermediate driver interface device, in this case, between the inverter control unit and the power switches. Drivers are designed to generate a control signal in accordance with the commands of the converter control unit.

To increase the driving torque at low engine speeds the pump unit R129 / converter 5 has a function to increase the initial value of the output voltage (initial voltage of the current-frequency characteristic) for the correction of the modules used. The result is an increase in the starting torque of the engine.

Motor current limit by the sensor and the current controller is necessary in the short-term overload of the drive motor of a submersible pump, pos. R129 / 5. This will prevent the drive tripping FR129 / 5 by means of protective devices. To protect the frequency converter VLT5032 company «Danfoss» and drive motor AIR180S2 overcurrent and submersible pump P129 / 5 overload torque using negative current feedback, the so-called current cutoff. current limitation controller works only if the stator current exceeds the maximum allowable value. The output current limiting regulator can act as a signal to reduce the output voltage of the converter and the inverter to reduce the frequency. But it is advisable to reduce both the voltage and frequency of the inverter, thereby maintaining the constancy of the flux and torque of the engine.

To limit the torque in the start-up and braking modes of electric submersible pump FR129 / 5 applies intensity dial (VMS), which is mounted on the drive input speed in the channel assignment.

For electromechanical system (Figure 5) The adjustment parameters are: the type and parameters of the ZIS, the maximum current limit control current value of the minimum frequency inverter, the law regulation $\frac{U}{f^2}$ and correction of the voltage-frequency response.

