

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Филиал федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)» в г. Миассе  
Факультет «Электротехнический»  
Кафедра «Автоматика»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ С.С. Голошапов  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Моделирование системы управления электроприводом

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 270304.2018.022.00 ПЗ ВКР

Руководитель проекта  
доцент кафедры АиУ  
\_\_\_\_\_ Л.А. Озеров  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Автор проекта  
студент группы МиЭт-482  
\_\_\_\_\_ А.О. Столбов  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер  
кафедры АиУ  
\_\_\_\_\_ Т.А. Барбасова  
\_\_\_\_\_ 2018г.

Миасс 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	9
1 Описание технологического процесса .....	10
1.1 Описание технологического процесса .....	10
1.2 Технические характеристики системы .....	11
1.3 Требования к электроприводу и системе автоматики.....	13
1.4 Обоснование выбора рода тока и типа электропривода.....	14
2 Оценка экономической эффективности от внедрения преобразователей частоты .....	17
3 Выбор силового оборудования.....	22
3.1 Выбор электродвигателя .....	22
3.2 Выбор преобразователя частоты.....	28
3.3 Основные возможности частотного преобразователя CIMR–E7Z4015.....	32
4 Синтез системы регулирования .....	34
4.1 Функциональная схема регулирования .....	34
4.2 Расчет статических характеристик электропривода .....	35
4.3 Расчет параметров схем включения двигателя М1 (М2), обеспечивающих работу двигателя в заданных режимах работы.....	39
4.4 Настройка и наладка преобразователя частоты.....	42
4.5 Настройка контура регулирования давления .....	49
5 Система автоматики и защиты .....	52
5.1 Описание работы системы автоматизации насосной станции.....	52
5.2 Разработка алгоритма автоматизации управления механизмами объекта.....	53
5.3 Выбор элементной базы автоматизации и преобразователей технологической информации .....	64
5.4 Разработка функциональной схемы автоматизации .....	68
5.5 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизации.....	72

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	77

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

## ВВЕДЕНИЕ

В начале 21 века обострились все глобальные проблемы человечества. Их решение требует усилий всего мирового сообщества. На последних саммитах Большой Восьмерки, совещаниях ОБСЕ регулярно обсуждаются проблемы более эффективного внедрения энергосберегающих технологий. Проблема энергосбережения на сегодняшний день становится одной из главнейших задач современного человечества. В нашей стране, по сравнению с другими европейскими странами, проблема внедрения энергосберегающих технологий идет гораздо медленнее. Это обусловлено рядом объективных причин: физическим и моральным износом оборудования, отсутствием достаточного финансирования разработок в данной области.

Одним из путей решения задач энергосбережения является автоматизация.

За рубежом системы автоматизации применяются довольно широко и производятся с использованием высоких технологий. В нашей стране системы автоматизации производятся в недостаточном объеме. Поэтому в большом числе случаев промышленные предприятия используют зарубежные, наиболее доступные системы автоматизации.

В данной выпускной работе используется одна из известных зарубежных разработок систем автоматизации – интеллектуальное реле MOELLER. Система позволяет упростить работу оператора, сократить время на поиски неисправностей, а также существенно повысить энергосбережение.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

# 1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

## 1.1 Описание работы технологического процесса

Насосная станция подает воду из центрального водовода потребителям населенного пункта. Функциональная схема насосной установки представлена на рисунке 1.1. Вода поступает из центрального водовода и через впускной вентиль (1) всасывается насосом (6) либо насосом (7). В системе работает только один насос, второй служит резервным. Далее через обратный клапан (10) вода подается в городскую водопроводную сеть. Контроль давления во всасывающем трубопроводе осуществляется при помощи реле давления (2). Производительность насосов станции регулируется величиной давления воды в сети потребителей при помощи датчика давления (11).

В данной системе для энергосбережения требуется реализовать два режима работы насосной станции: режим «день» и режим «ночь». В режиме «день» насосный агрегат будет работать с 6-00 до 24-00 ч. по местному времени. Давление после вентилей (8,9) в этом режиме равняется 4 атм. (соответствует напору 40 м.). Соответственно в режиме «ночь» насос будет работать с 24-00 до 6-00 ч. утра. Давление же в этом режиме должно равняться величине в 3 атм. (соответствует напору 30 м.).

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

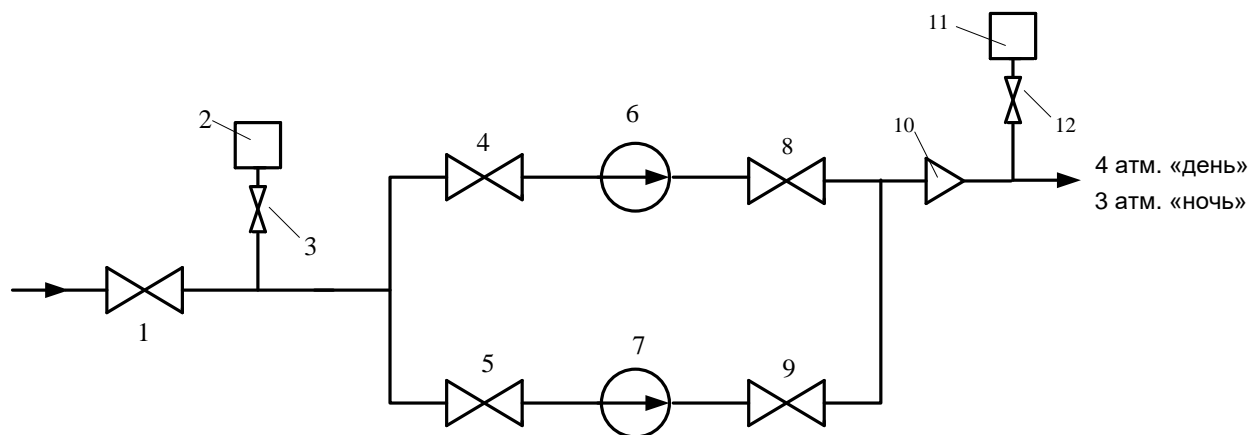


Рисунок 1.1 – Функциональная схема насосной установки

На рисунке 1.1 показано: 1– впускной вентиль; 2– реле давления; 3– вентиль для включения и отключения реле давления; 4, 5, 8, 9– вентили; 6, 7– насосные установки; 10– обратный клапан; 11– датчик давления; 12– вентиль для снятия и установки давления.

## 1.2 Технические характеристики системы

Основной характеристикой сети, на которую работает насосная станция, является зависимость между напором  $H$  (давлением  $P$ ) от времени  $t$ . Потребление воды в сети изменяется во времени в течение дня (рисунок 1.2).

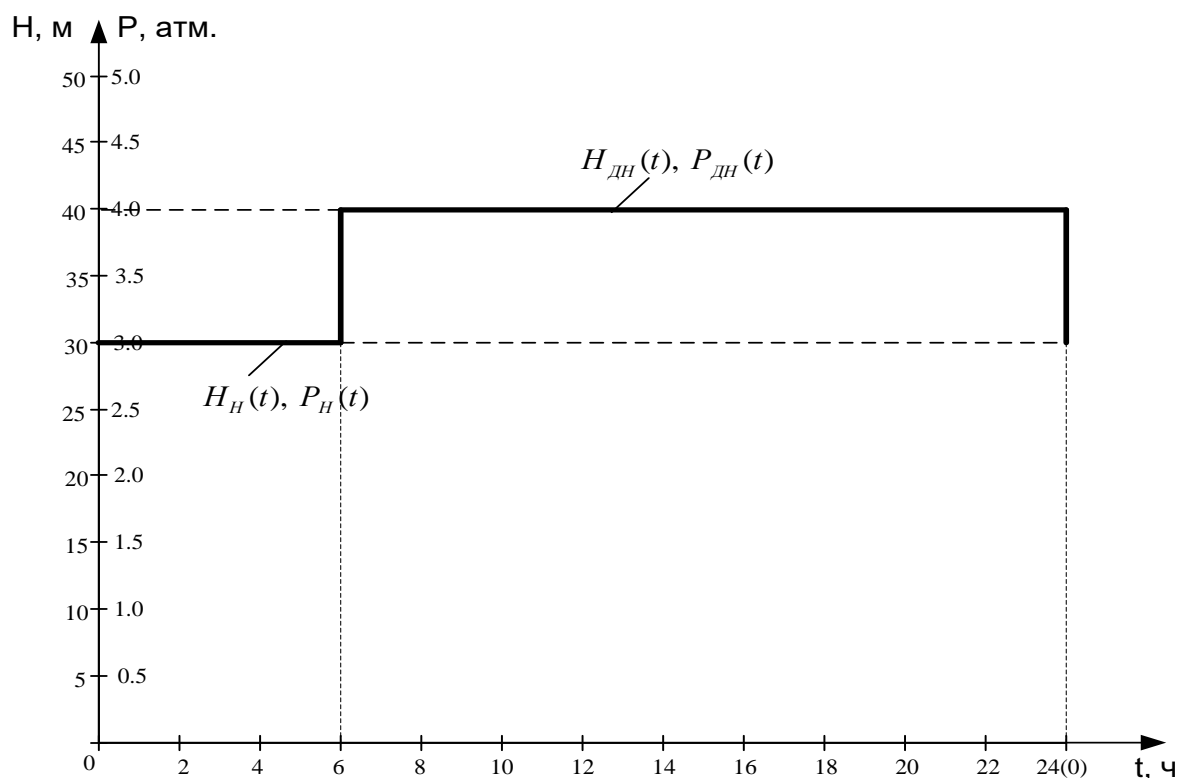


Рисунок 1.2 – Зависимость напора  $H$  (давления  $P$ ) от времени  $t$  в течении суток

На данной насосной станции установлены насосные агрегаты типа КМ-80-50-200 в количестве двух штук. Насосы типа КМ- центробежные, консольные, моноблочные, одноступенчатые с односторонним подводом жидкости к рабочему колесу, применяются на насосных станциях городского, промышленного и сельского водоснабжения – для осушения, ирригации и орошения земельных угодий, для перекачивания воды и нейтральных жидкостей; в топливораздаточных системах автозаправочных станций (АЗС).

Консольный насос типа КМ, с точки зрения гидравлики, является типичным центробежным насосом, рабочим органом которого является центробежное колесо. При вращении колеса на каждую частицу жидкости, находящуюся внутри колеса, действует центробежная сила, прямо пропорциональная расстоянию частицы от центра колеса и квадрату угловой скорости вращения колеса. Под действием этой силы жидкость выбрасывается в напорный трубопровод из рабочего колеса, в результате чего в центре колеса создается разрежение, а в

периферийной его части - повышенное давление. Движение жидкости по всасывающему трубопроводу происходит вследствие разности давлений над свободной поверхностью жидкости в приемном резервуаре и в центральной области колеса, где имеется разрежение.

Номинальные параметры насосных агрегатов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры насосных агрегатов

№ п/п	Параметр	Насос М1	Насос М2
1	Тип насоса	КМ80-50-200	КМ80-50-200
2	$P_H$ , кВт	15	15
3	$n_H$ , об/мин	3000	3000
4	$H$ , м (днем)	40	40
5	$H$ , м (ночью)	30	30
6	$P$ , атм. (днем)	4	4
7	$P$ , атм. (ночью)	3	3
8	Срок использования в течение года, ч	8760	8760

### 1.3 Требования к электроприводу и системе автоматики

На основании технических характеристик системы можно сформулировать основные требования к системе электропривода насосной станции:

- должна быть обеспечена заданная производительность механизма;
- при изменении расхода воды в сети, электропривод должен изменять производительность насосов, поддерживая рабочее давление в сети;
- система управления электроприводами должна обеспечивать требуемый диапазон регулирования;



– регулирование производительности насосов должно быть плавным, во избежание гидравлических ударов в сети потребителей;

– экономичность системы электропривода должна быть максимальной, обеспечивающей минимум капитальных затрат и минимум потерь энергии;

– двигатель должен выдерживать возникающие кратковременные перегрузки;

– преобразовательные устройства должны иметь следующие устройства защиты:

1. защиту от внутренних коротких замыканий;

2. максимально-токовую защиту;

3. защиту от внутренних неисправностей элементов схемы и несоответствия режимов;

4. защиту от «провалов» напряжения;

5. защиту от токов короткого замыкания и от перегруза;

6. защиту от перенапряжений внешней сети, внутренних перенапряжений;

– конструктивное исполнение должно учитывать повышенную влажность помещения насосной станции.

Требования к системе автоматики:

– система управления должна иметь возможность переключения с автоматического на ручной режим работы, необходимый при наладке, ремонтах, устранении аварийных ситуаций и др;

– в автоматическом режиме система автоматики должна управлять процессом работы насосной станции, а также формировать сигналы при появлении аварийной ситуации.

#### 1.4 Обоснование выбора рода тока и типа электропривода

Основным видом регулируемого электропривода в настоящее время является электропривод постоянного тока. Вместе с тем в последнее десятилетие

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

расширяется применение регулируемых электроприводов переменного тока, которые имеют ряд определенных преимуществ.

Прежде всего, электроприводы на базе электродвигателей переменного тока оказываются более выгодными в эксплуатации. Отсутствие коллектора и требующего постоянного внимания щеточно-контактного узла позволяет резко снизить объёмы и периодичность, следовательно, и стоимость технического обслуживания электроприводов переменного тока. Бесконтактное исполнение электродвигателей переменного тока позволяет беспрепятственно и эффективно применять их в случаях, когда использование электродвигателей постоянного тока практически невозможно из-за тяжёлых условий работы (металлургия, транспортные средства).

Далее, электродвигатели переменного тока имеет меньшую стоимость, чем электродвигатель постоянного тока. Коллектор электрических машин постоянного тока содержит много медных пластин, разделенных прослойками слюды, и требует тщательного изготовления. Электрические машины переменного тока имеют более простую конструкцию и технологию изготовления. Например, асинхронные короткозамкнутые электродвигатели, часто выполняются с алюминиевой литой обмоткой на роторе, которая не изолируется от пластин сердечника ротора. Такой двигатель имеет малый момент инерции ротора, может долго работать при повышенных температурах и угловых скоростях вращения.

При проектировании электродвигателей постоянного тока приходится учитывать ограничения по допустимым току и напряжения на якоре. В результате невозможно выполнить электрические машины постоянного тока выше так называемой предельной мощности. В электрических машинах переменного тока эти ограничения отсутствуют, что позволяет иметь агрегаты большой единичной мощности, на прокатных станах перейти от дорогих двух и трёхъякорных электрических машин к одноякорным, на экскаваторах добиться больших ускорений при внезапном стопорении ковша, металлообработке получить

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

сверхвысокую чистоту поверхности при обработке деталей с угловой скоростью вращения до 50...100 тысяч об/мин [4].

Выбор рода тока и типа электропривода целесообразно производить на основе рассмотрения и сравнения технико-экономических показателей ряда вариантов, удовлетворяющих техническим требованиям данной рабочей машины.

На основании исходных данных и требований, предъявляемых к электроприводу, необходимо выбрать вариант электропривода, способный полностью выполнить требования и быть одновременно максимально экономичным.

В учебной литературе рекомендуют начинать процесс выбора рода тока с двигателя переменного тока [3].

Двигатели переменного тока проще по конструкции, стоимость их ниже, обслуживание тоже требует меньших затрат.

Для регулируемого привода задача выбора типа привода решается сложнее. В зависимости от диапазона и плавности регулирования скорости, требований к качеству переходных процессов могут быть применены как системы реостатного регулирования скорости, так и системы с индивидуальными преобразователями [5].

Конкурентными по отношению к двигателям переменного тока по своим свойствам являются приводы с частотным и частотно – токовым управлением.

Преимущества приводов с асинхронными двигателями: простота конструкции и повышенная надёжность двигателей, возможность их изготовления в поточном производстве.

Существующий асинхронный электродвигатель удовлетворяет начальным условиям выбора рода тока и типа электродвигателя. Асинхронный двигатель из краново-металлургической серии на переменном токе должен подходить для привода насосной установки, так как полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электроприводу в данном технологическом процессе [5].

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

## 2 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Определение экономической эффективности, которую можно получить от внедрения преобразователей частоты является насущной проблемой. Потребителю хотелось бы до приобретения ПЧ иметь гарантии, что средства будут израсходованы не зря: общие утверждения о том, что экономия электроэнергии составит 30-80%, требуют подтверждения. К сожалению, универсальной методики на все случаи применения ПЧ нет и быть не может, так как объем экономии зависит от многих факторов, характерных для данной конкретной установки. Однако существуют большое количество типовых решений, применяемых в народном хозяйстве, например системы отопления и горячего и водоснабжения на центральных тепловых пунктах (ЦТП). Московским энергетическим институтом (МЭИ) разработана методика оценки экономической эффективности применения частотного электропривода в системах водоснабжения зданий, разработана Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода, согласованная с Главгосэнергонадзором и утвержденная Минтопэнерго. Указанная методика взята за основу разработанной в МЭИ компьютерной программы по оценке экономической эффективности частотно-регулируемого электропривода насосов.

Теоретические вопросы экономии электроэнергии достаточно хорошо отражены в литературе. Однако в некоторых статьях и рекламных проектах типа: «Вы можете сами посчитать экономию вашей электроэнергии при использовании ПЧ» - формулы для расчета экономии электроэнергии вызывают недоумение. Более того, зачастую сами авторы пишут, что расчетная экономия составляет, скажем, 20%, а фактическая оказывается больше (30-40%). Основная ошибка заключается в том, что для расчета экономии, во многих проспектах используется следующая формула:

$$P = r \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.1)$$

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

где  $Q$  – расход;

$H$  – напор;

$P$  – потребляемая мощность;

$g$  – ускорение свободного падения.

То есть снижение потребляемой мощности пропорционально потере напора при дросселировании. Однако здесь не учтено то, что при снижении напора насоса частотным регулированием меняются характеристики и самого насоса – при варианте убирающегося сопротивления в сети.

Правильнее для вычисления величины снижения потребляемой мощности пользоваться законами подобия насосов [2] (для насосов среднего и низкого давлений с пологой характеристикой, типичных в сетях теплоснабжения), а именно:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2};$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3},$$

(2.2)

где  $H_1, H_2$  – напоры насоса при частоте вращения электродвигателя  $n_1$  и  $n_2$  соответственно;

$P_1, P_2$  – потребляемые мощности электродвигателя при тех же  $n_1$  и  $n_2$ .

То есть снижение потребляемой мощности пропорционально снижению оборотов двигателя в кубе. Пример, приведенный далее показывает, что даже в системах с постоянным расходом можно получить эффект от применения ПЧ.

На основании анализа экономической эффективности, приведенного в литературе [1, 7] можно сформулировать основные выводы:

1. Суммарное снижение потребления электроэнергии при использовании преобразователей частоты может достигать 50% и даже при идеально подобранных насосах, работающих на сеть с переменным расходом.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

2. Для обеспечения максимального эффекта экономии от применения ПЧ необходимо предварительно провести обследование и изучение сети. Сейчас это достаточно просто – есть переносные ультразвуковые расходомеры, позволяющие быстро и точно определить фактические характеристики сети и насосного агрегата.

3. Все здесь сказанное относится к работе сетей с рациональным подбором насосов. Как правило, насосы для сети подбираются с «запасом», запас при применении ПЧ не теряется, при нештатном увеличении расхода ПЧ с таким насосом обеспечит и нештатный режим.

4. После внедрения ПЧ на электродвигателе насосного агрегата необходимо заново производить настройку и регулировку работы сети для максимального снижения потребления электроэнергии, в противном случае экономический эффект от внедрения ПЧ будет неполным.

Для оценки экономической эффективности от применения преобразователей частоты в любом случае необходимо организовать установку приборов учета электрической энергии и произвести замеры электропотребления до установки ПЧ и после его установки. Кроме установки ПЧ нужно провести все необходимые регулировки и настройки в работе системы.

Далее приведен примерный (без учета различного рода потерь) расчет экономии электроэнергии при использовании частотно-регулируемого электропривода в рассматриваемой нами насосной станции:

1) Расчет расхода электроэнергии за период  $T$  при дросселировании:

$H_{МАКС} = 50м$  – максимальный напор насосного агрегата;

$P_{ДВ} = 15 кВт$  – мощность электродвигателя насоса;

$H_{ДН} = 40м$  – дневной напор воды, который должна обеспечивать насосная станция с 6-00 до 24-00 ч;

$H_{Н} = 30м$  – ночной напор воды, который должна обеспечивать насосная станция с 24-00 до 6-00 ч;

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

$T = 8760 \text{ ч}$  – срок использования насосного агрегата в течение года;  
 $T_1 = 6570 \text{ ч}$  – срок использования насосного агрегата в режиме «день» в течение года;

$T_2 = 2190 \text{ ч}$  – срок использования насосного агрегата в режиме «ночь» в течение года;

Количество электроэнергии, потребляемой за год при дросселировании, определим по формуле:

$$W_{DP} = P_{ДВ} \cdot g \cdot T = 15 \cdot 8760 \cdot g = 131400 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2.3)$$

где  $W_{DP}$  – расход электроэнергии за период  $T$  при дросселировании.

## 2) Расчет расхода электроэнергии при внедрении ПЧ:

Из законов подобия насосов (соотношение 2.2) следует:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}}; \frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \cdot \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \Rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot H_2 \cdot \sqrt{H_2}}{H_1 \cdot \sqrt{H_1}}. \quad (2.4)$$

Потребляемая мощность электродвигателя при работе насосной станции в режиме «день»:

$$P_{ДН} = \frac{P_{ДВ} \cdot H_{ДН} \cdot \sqrt{H_{ДН}}}{H_M \cdot \sqrt{H_M}} = \frac{15 \cdot 40 \cdot \sqrt{40}}{50 \cdot \sqrt{50}} = \frac{3794,73}{353,6} = 10,73 \text{ кВт}, \quad (2.5)$$

Потребляемая мощность электродвигателя при работе насосной станции в режиме «ночь»:

$$P_H = \frac{P_{ДВ} \cdot H_H \cdot \sqrt{H_H}}{H_M \cdot \sqrt{H_M}} = \frac{15 \cdot 30 \cdot \sqrt{30}}{50 \cdot \sqrt{50}} = \frac{2464,75}{353,6} = 6,97 \text{ кВт}, \quad (2.6)$$

Количество электроэнергии, потребляемой за год при внедрении преобразователя частоты, определим по формуле:

$$W_{ПЧ} = P_{ДН} \cdot T_1 + P_H \cdot T_2 = 10,73 \cdot 6570 + 6,97 \cdot 2190 = 85760,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2.7)$$

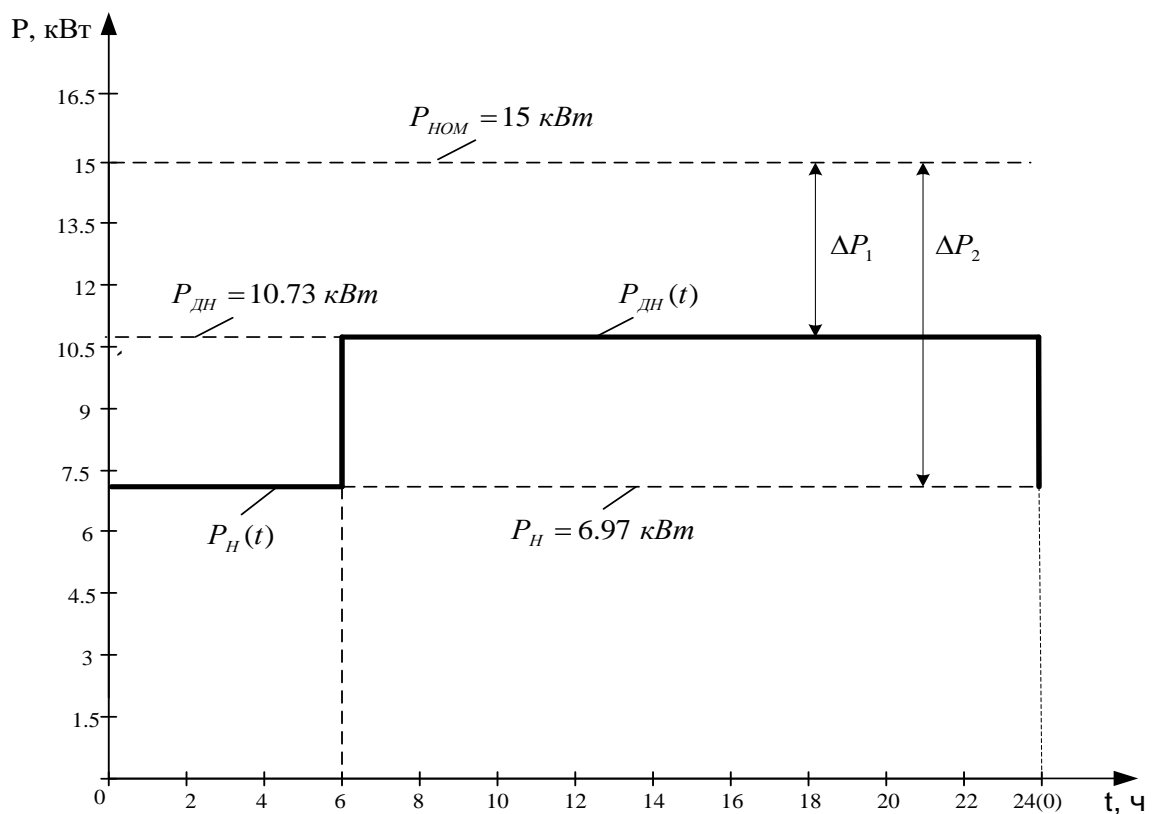
					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где  $T_1, T_2$  – сроки использования насосного агрегата в режиме «день» и «ночь» соответственно.

Итак, экономия энергии  $\Delta W$  за год составляет:

$$\Delta W = W_{дп} - W_{пч} = 131400 - 85760.3 = 45640 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (2.8)$$

Используя рассчитанные значения потребляемых мощностей электродвигателя в режиме «день» и «ночь», можно построить зависимости этих мощностей в каждом режиме  $P_{дн}(t)$  и  $P_{н}(t)$  от времени  $t$  (рисунок 2.1).



$\Delta P_1$  – экономия потребляемой мощности в режиме «день»;

$\Delta P_2$  – экономия потребляемой мощности в режиме «ночь».

Рисунок 2.1 – Зависимость потребляемой мощности двигателя от времени  $P(t)$

### 3 ВЫБОР СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18



### 3.1 Выбор электродвигателя

Выбор электродвигателей для насосов произведем, пользуясь номинальными параметрами насосных агрегатов (таблица 1.1) [2].

Учитывая значения номинальных мощностей и частоты вращения насосов, из технического каталога электрических машин (2008г.) выбираем асинхронные электродвигатели серии А типа АИР160S2 [7].

Параметры электродвигателей приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры электродвигателя АИР160S2

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Двигатель М1	Двигатель М2
1	$U_{НОМ}$	<i>В</i>	380	380
2	$P_{НОМ}$	<i>кВт</i>	15	15
3	$n_{НОМ}$	<i>об/мин</i>	2940	2940
4	$I_{1НОМ}$	<i>А</i>	30	30
5	$\cos \varphi$	–	0.86	0.86
6	$\frac{M_{МАКС}}{M_{НОМ}}$	<i>Н·м</i>	3.2	3.2
7	$f_{НОМ}$	<i>Гц</i>	50	50
8	$J_{ДВ}$	<i>кг·м<sup>2</sup></i>	0.05	0.05

Основным принципом системы управления электроприводами является регулирование производительности в зависимости от величины давления воды в сети потребителей. На основе этого и осуществляется выбор оборудования.

Рассчитаем производительность электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции, пользуясь законами подобия насосов [2]:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \quad (3.1)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Из законов подобия насосов (соотношение 3.1) следует:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \Rightarrow Q_2 = \frac{Q_1 \cdot \sqrt{H_2}}{\sqrt{H_1}}. \quad (3.2)$$

Производительность электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «день»:

$$Q_{ДН} = \frac{Q_{МАКС} \cdot \sqrt{H_{ДН}}}{\sqrt{H_{МАКС}}}. \quad (3.3)$$

Производительность электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «ночь»:

$$Q_{Н} = \frac{Q_{МАКС} \cdot \sqrt{H_{Н}}}{\sqrt{H_{МАКС}}}. \quad (3.4)$$

Привод центробежного насоса имеет вентиляторную характеристику момента. Это означает, что потребляемая мощность центробежного насоса зависит от числа оборотов рабочего колеса насоса. Для расчета мощности насоса, необходимую для обеспечения производительности насоса  $Q_{МАКС}$  при расходе воды  $H_{МАКС}$  справедлива формула [2]:

$$P_{ДВ} = \frac{K \cdot \gamma \cdot H_{МАКС} \cdot Q_{МАКС}}{A \cdot \eta_{НАС} \cdot \eta_{ПЕР}}, \quad (3.5)$$

где  $K = 1,2$  – коэффициент запаса (1,1 ÷ 1,4);

$\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3$  – удельный вес холодной воды;

$A = 1000$  – коэффициент;

$\eta_{ПЕР} = 1$  – КПД передачи для непосредственного соединения насоса с двигателем;

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$\eta_{НАС} = 0,7$  – КПД насоса центробежного типа напором свыше 40 метров.

Из формулы расчета мощности насоса (формула 3.5) следует:

$$Q_{МАКС} = \frac{P_{ДВ} \cdot A \cdot \eta_{НАС} \cdot \eta_{ПЕР}}{K \cdot \gamma \cdot H_{МАКС}} \cdot 3600 = \frac{15 \cdot 1000 \cdot 0,7 \cdot 1}{1,2 \cdot 9810 \cdot 50} \cdot 3600 = 64,8 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

Производительность электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «день» (формула 3.3):

$$Q_{ДН} = \frac{Q_{МАКС} \cdot \sqrt{H_{ДН}}}{\sqrt{H_{МАКС}}} = \frac{64,8 \cdot \sqrt{40}}{\sqrt{50}} = 57,9 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Производительность электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «ночь» (формула 3.4):

$$Q_{Н} = \frac{Q_{МАКС} \cdot \sqrt{H_{Н}}}{\sqrt{H_{МАКС}}} = \frac{64,8 \cdot \sqrt{30}}{\sqrt{50}} = 49,9 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Насос М1 (М2) в режиме «день» поддерживает давление  $P_{ДН} = 4 \text{ атм.}$  при расходе  $Q_{ДН} = 57,9 \text{ м}^3 / \text{ч}$ , в режиме «ночь» поддерживает давление  $P_{ДН} = 3 \text{ атм.}$  при расходе  $Q_{ДН} = 49,9 \text{ м}^3 / \text{ч}$ . При изменении расхода частота вращения двигателя насоса М1(М2) изменяется в зависимости от величины давления воды в сети потребителей.

Используя рассчитанные значения производительности, можно построить зависимости расхода воды в каждом режиме  $Q_{ДН}(t)$  и  $Q_{Н}(t)$  от времени  $t$ . В среднем потребление воды изменяется во времени в течение дня (рисунок 3.1).

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

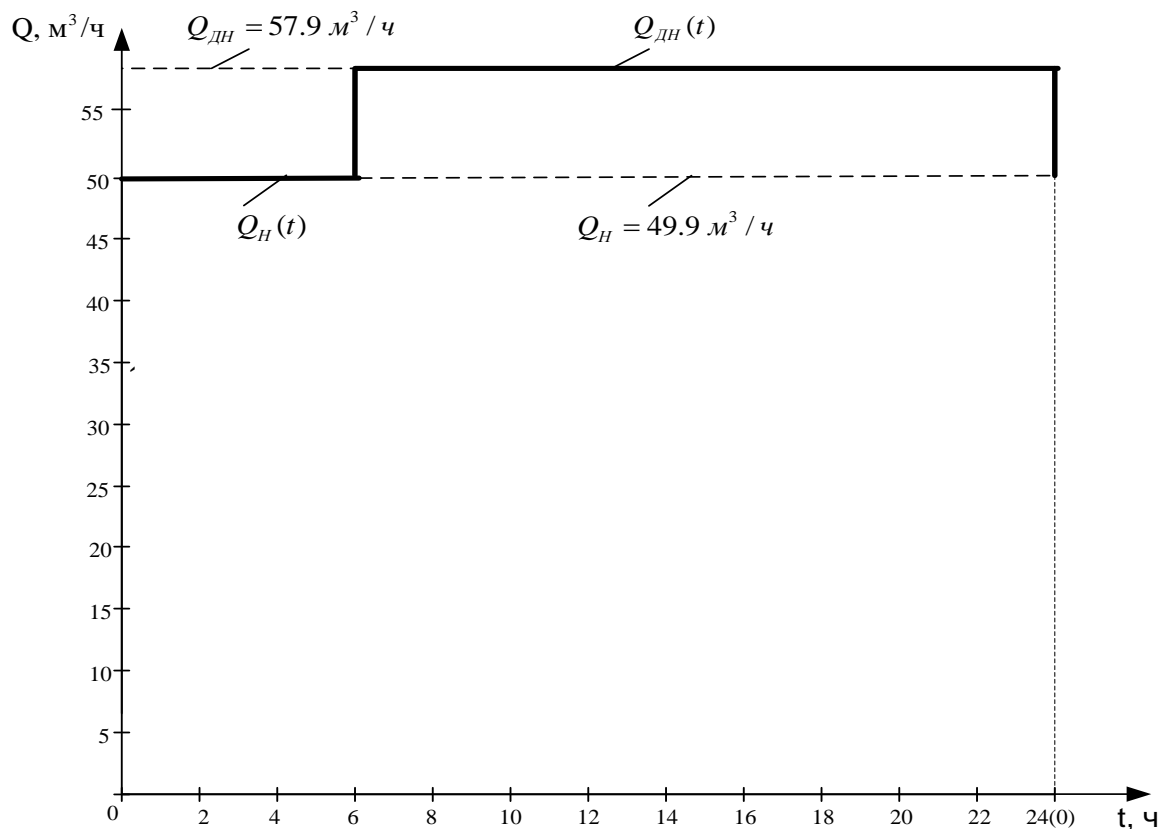


Рисунок 3.1 – Зависимость расхода воды от времени  $Q(t)$

При изменении угловой скорости  $\omega$  законы подобия выражаются следующими соотношениями [2]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (3.6)$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}.$$

Номинальная скорость вращения электродвигателя М1 (М2) в  $\text{рад}/\text{с}$  [5]:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2940}{60} = 307,7 \text{ рад}/\text{с}, \quad (3.7)$$

Из законов подобия насосов (соотношение 3.6):

Скорость вращения электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «день»:

$$\frac{\omega_{НОМ}}{\omega_{ДН}} = \frac{Q_{МАКС}}{Q_{ДН}};$$

$$\omega_{ДН} = \frac{\omega_{НОМ} \cdot Q_{ДН}}{Q_{МАКС}} = \frac{307,7 \cdot 57,9}{64,8} = 274,9 \text{ рад/с.}$$

Скорость вращения электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «ночь»:

$$\frac{\omega_{НОМ}}{\omega_{Н}} = \frac{Q_{МАКС}}{Q_{Н}};$$

$$\omega_{Н} = \frac{\omega_{НОМ} \cdot Q_{Н}}{Q_{МАКС}} = \frac{307,7 \cdot 49,9}{64,8} = 236,9 \text{ рад/с.}$$

Момент электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «день»:

$$M_{ДН} = \frac{P_{ДН}}{\omega_{ДН}} = \frac{10730}{274,9} = 39,1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент электродвигателя М1 (М2) при работе насосной станции в режиме «ночь»:

$$M_{Н} = \frac{P_{Н}}{\omega_{Н}} = \frac{6970}{236,9} = 29,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пользуясь законами подобия, можно по известным параметрам и зависимости  $Q(t)$  (рисунок 2.1), построить зависимости  $\omega(t)$  (рисунок 3.2) и  $M(t)$  (рисунок 3.3) от времени  $t$  для каждого режима.

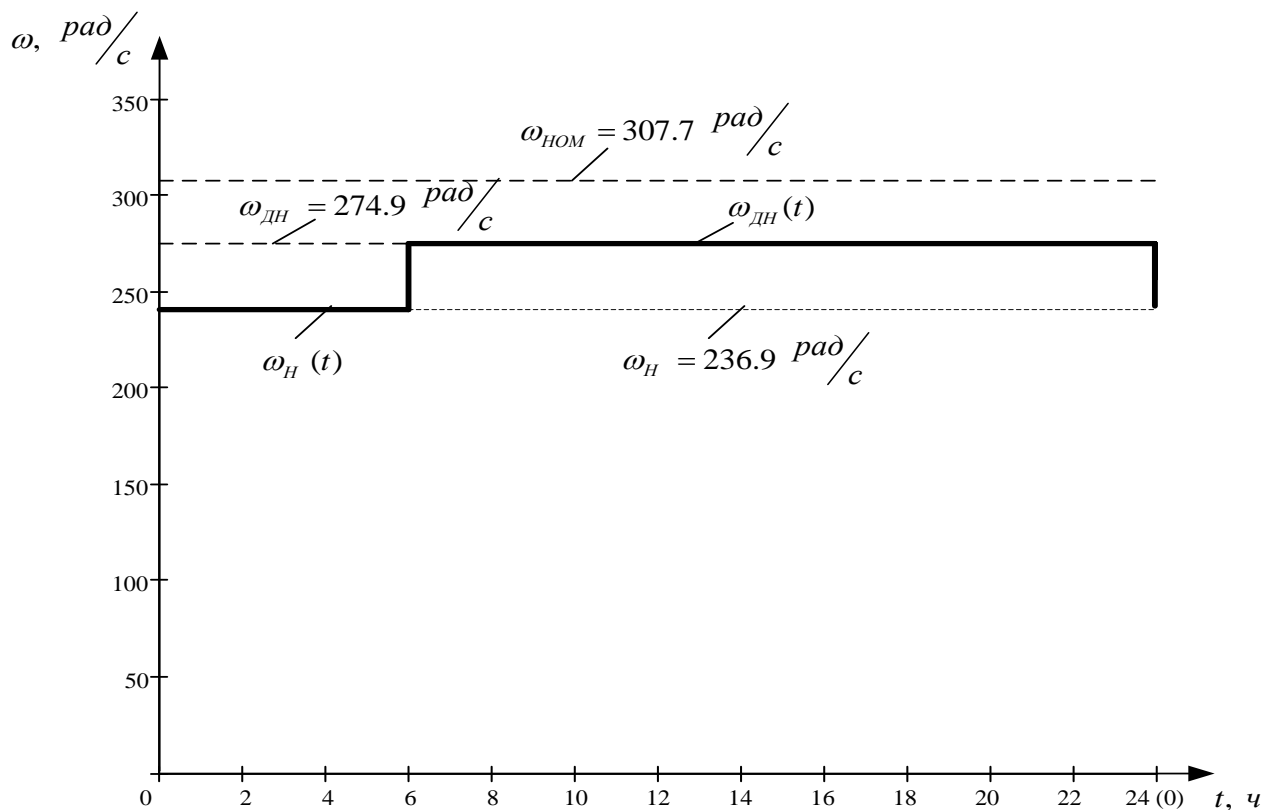


Рисунок 3.2 – Зависимость скорости вращения М1 (М2) от времени  $\omega(t)$

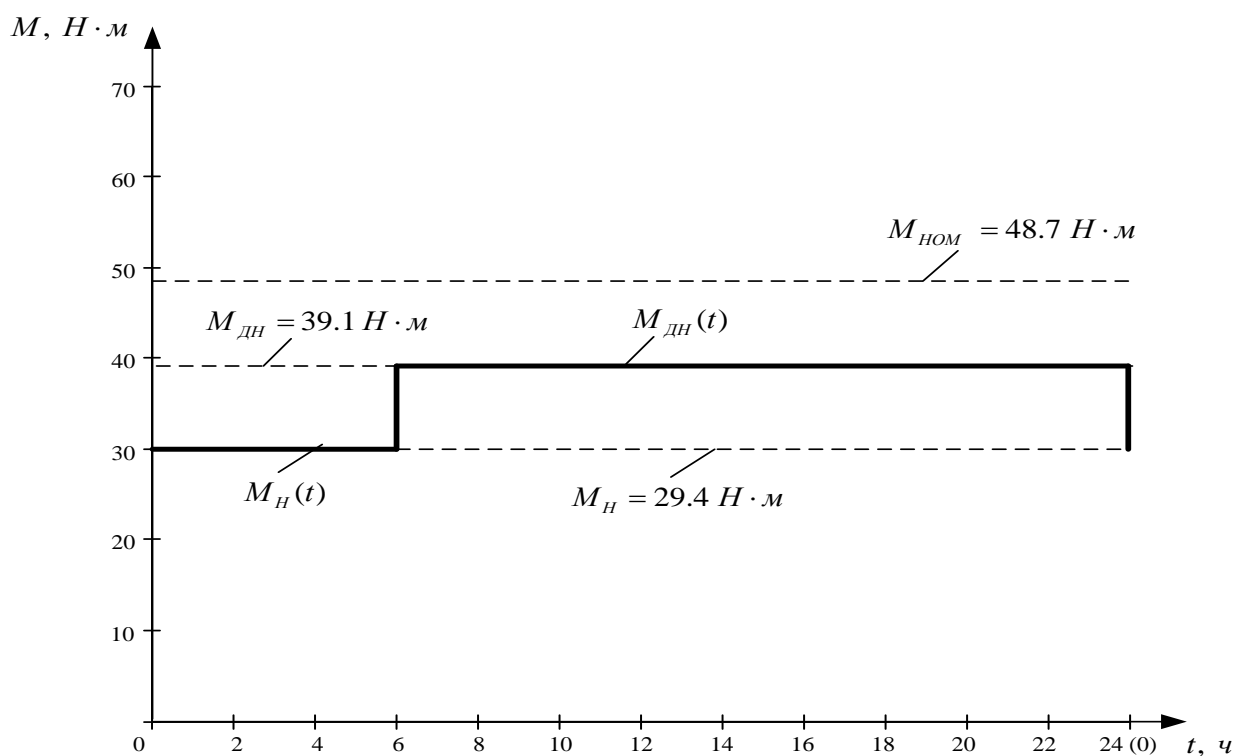


Рисунок 3.3 – Зависимость момента двигателя М1 (М2) от времени  $M(t)$

Так как  $\omega_c = const$  и  $P_c = const$  в течение длительного промежутка времени, то двигатель работает в продолжительном режиме работы. В этом случае нет необходимости производить проверку двигателя по нагреву, так как этот расчет выполнен заводом – изготовителем.

### 3.2 Выбор преобразователя частоты

Преимущества использования частотных преобразователей [5]:

1) Плавная регулировка скорости вращения электродвигателя позволяет в большинстве случаев отказаться от использования редукторов, вариаторов, дросселей и другой регулирующей аппаратуры. Что значительно упрощает механическую систему, повышает ее надежность и снижает эксплуатационные расходы;

2) При подключении через частотный преобразователь пуск двигателя происходит плавно, без пусковых токов и ударов, что снижает нагрузку на двигатель и механику, увеличивает срок их использования;

3) Применение частотных преобразователей с обратной связью обеспечивает точное поддержание скорости вращения при переменной нагрузке, что во многих задачах позволяет значительно улучшить качество технологического процесса;

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

5) Частотный преобразователь в комплекте с асинхронным электродвигателем может применяться для замены приводов постоянного тока.

В этом случае значительно снижаются эксплуатационные затраты, повышается перегрузочная способность, а соответственно и надежность системы.

6) Применение регулируемого частотного электропривода позволяет сберечь энергию путем устранения непроизводительных затрат энергии в дроссельных заслонках, механических муфтах и других регулирующих

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

устройствах. При этом экономия прямо пропорциональна непроизводительным затратам.

Исходя из указанных преимуществ использования частотных преобразователей, для насоса М1 (М2) выбираем частотно – регулируемый привод, т.е. систему преобразователь частоты – асинхронный двигатель (в дальнейшем просто ПЧ – АД). Выбор системы определил главное направление дальнейших расчётов: электродвигатель получает питание от индивидуального преобразователя частоты.

Питание двигателей переменного тока может выполняться от тиристорных и транзисторных преобразователей частоты как с непосредственной связью НПЧ, состоящих из нескольких управляемых выпрямителей, подключённых к сети переменного тока, так и от двухзвенных преобразователей с автономными инверторами ПЧИ, осуществляющие преобразование напряжения питающей сети последовательно в напряжение постоянного тока, а затем в трёхфазное напряжение регулируемой частоты.

Выбор типа преобразователя зависит от частоты питающей сети, требуемого диапазона изменения частоты на выходе преобразователя, определяемого диапазона изменения скорости вращения двигателя, от мощности двигателя, диапазона изменения нагрузки на валу двигателя, наличия и отсутствия реверса, режимов работы двигателя.

При выходных частота 50 Гц и ниже или выше 50 Гц используются преобразователи с автономными инверторами напряжения АИН или тока АИТ.

Применение АИТ целесообразно в приводах, работающих с поддержанием заданной величины момента. В нашем случае будем использовать преобразователь с АИН.

Выбор преобразователей осуществляется по справочникам, каталогам электротехнической промышленности на основе номинальных данных предварительно выбранного двигателя:



$$\begin{cases} U_{ПЧ} \geq U_{НЛ} \\ I_{ПЧ} \geq I_{1Н} \end{cases}, \quad (3.7)$$

где  $U_{ПЧ}, I_{ПЧ}$  – номинальное линейное напряжение и ток нагрузки преобразователя частоты;

$U_{НЛ}, I_{НЛ}$  – номинальное линейное напряжение и фазный ток статора двигателя.

Согласно упомянутым требованиям, выбираем преобразователь частоты фирмы OMRON модели CIMR-E7Z4015. Общий вид преобразователя представлен на рисунке 3.4.

Технические характеристики преобразователя приведены в таблице 2.2.



Рисунок 3.4 – Общий вид преобразователя частоты CIMR-E7Z4015

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

Таблица 2.2 – Технические характеристики преобразователя CIMR–E7Z4015

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Мощность	15 кВт
Номинальный ток	31 А
Напряжение и частота питания	~ 380 В, 50/60 Гц
Диапазон частот управляющего напряжения	0.1 – 400 Гц
Шаг изменения частоты управляющего напряжения	0.01 Гц
Рабочая частота преобразования	2.5 – 10 кГц
Допустимая погрешность номинального напряжения	- 15%, + 10%
Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ )	$\geq 0.9$
КПД	96 – 97 %
Количество фиксированных соотношений напряжение / частота	15
Цифровые входы	7 (4 программируемых)
Аналоговые входы	2 (0-10В, 0-20мА, 4-20 мА)
Релейные выходы	3 (2 программируемых)
Аналоговые выходы	2 (0 – 10 В, 2 мА)
Таймер разгона/торможения	0.1 – 6000 с
Степень защиты	IP20
Температура рабочая	-10 °С до +40 °С
Температура хранения	-40 °С до +70 °С
Основные функции управления	Выбор зависимости U/f; выбор времени ускорения/замедления; выбор задатчиков интенсивности; выбор

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

270304.2018.342.00 ПЗ

Лист

28

1	2
	<p>выходной частоты; выбор функции термозащиты; выбор режима остановки при перегреве; выбор функций последовательного входа/выхода; выбор функций задатчика частоты; выбор функции аналогового монитора; поиск скорости; перезапуск при ошибке; суммарное время работы; динамическое торможение; предотвращение опрокидывания; определение перегрузки; функция таймера; определение пропадания фазы на входе/выходе; ПИ-регулирование; режим энергосберегающего регулирования;</p>

### 3.3 Основные возможности частотного преобразователя CIMR–E7Z4015 [8]:

- 1) Частотный преобразователь обеспечивает полную электронную защиту преобразователя и двигателя от перегрузок по току, перегрева, утечки на землю и обрыва фазы;
- 2) Преобразователь позволяет отслеживать и отображать на цифровом пульте основные параметры системы на заданную скорость, выходную частоту, ток и

напряжение двигателя, выходную мощность и момент, состояние дискретных входов, общее время работы преобразователя и т. д;

3) В зависимости от характера нагрузки можно выбрать подходящую V/f характеристику или создать свою собственную;

4) Управлять частотным преобразователем можно либо со встроенной цифровой панели, либо с помощью внешних сигналов. Во втором случае скорость вращения задается аналоговым сигналом 0-10 В или 4-20 мА, а команды пуска, останова и изменения режимов подаются дискретными сигналами;

5) Существует возможность управления преобразователем через последовательный интерфейс (RS-232, RS-422 или RS-485) с использованием специального протокола;

6) Частотный преобразователь позволяет регулировать выходную частоту в пределах от 0 до 400 Гц;

7) Разгон и торможение двигателя осуществляется плавно (по линейному закону), время разгона и торможения можно настраивать в пределах от 0.1 сек до 30 мин. Возможен плавный реверс двигателя;

8) При разгоне происходит автоматическое усиление момента, для компенсации инерционной нагрузки;

9) Момент при пуске достигает 150 % от номинального;

10) Наличие уставки ночного режима, дающее дополнительную экономию электроэнергии;

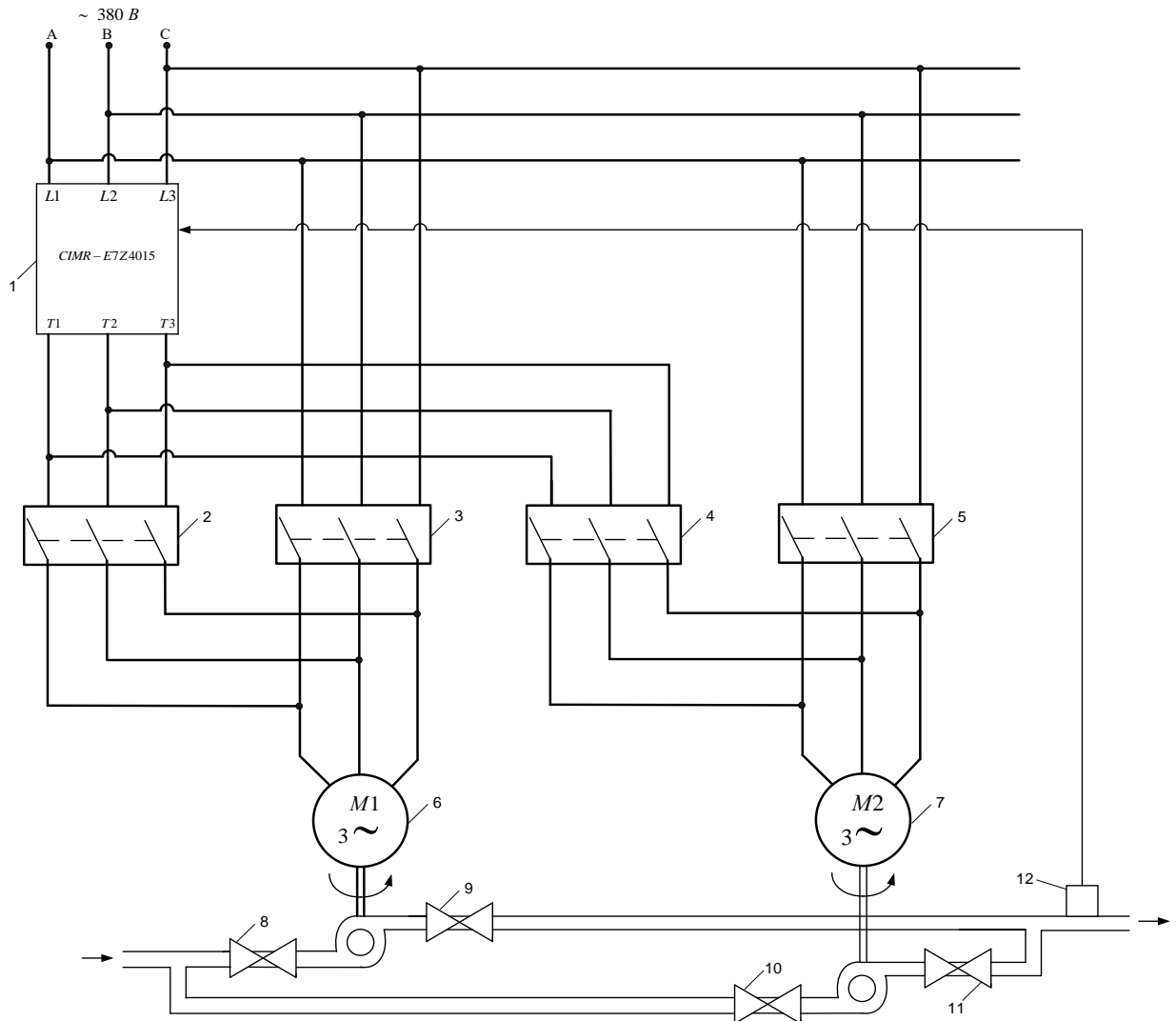
11) Возможность задания до 20 уставок по давлению для дневного режима.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

## 4 ВЫБОР СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

### 4.1 Функциональная схема системы регулирования

На основе описания технологического процесса, требований предъявляемых к электроприводу, с учетом выбранного силового оборудования, составлена функциональная схема системы регулирования, представленная на рисунке 4.1.



1– частотный преобразователь; 2, 3, 4, 5– магнитные пускатели;  
6, 7– электродвигатели насосных агрегатов; 8, 9, 10, 11– вентили;  
12– датчик давления.

Рисунок 4.1 – Функциональная схема системы регулирования

## 4.2 Расчет статических характеристик электропривода

### 4.2.1 Расчет естественной механической характеристики двигателя

Естественная механическая характеристика рассчитывается на основании каталожных данных двигателя М1 (М2) (таблица 3.1). Для расчета естественной механической характеристики воспользуемся упрощенной формулой Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (4.1)$$

где  $M_K$  – критический (максимальный) момент двигателя;

$s_K$  – скольжение в точке с критическим моментом.

Номинальный момент двигателя:

$$M_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\omega_{НОМ}} = \frac{15000}{307,7} = 48,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По каталожным данным двигателя (таблица 3.1) рассчитаем критический (максимальный) момент:

$$\frac{M_{МАКС}}{M_{НОМ}} = \mu_K = 3,2;$$

$$M_{МАКС} = 3,2 \cdot M_{НОМ} = 3,2 \cdot 48,7 = 155,84 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальная синхронная скорость:

$$\omega_{ОН} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{НОМ}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с}.$$

Номинальное скольжение:

$$s_{НОМ} = \frac{\omega_{ОН} - \omega_{НОМ}}{\omega_{ОН}} = \frac{314 - 307,7}{314} = 0,021.$$

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Скольжение в точке с критическим моментом ( $\mu_K = 3.2$ ):

$$s_K = s_{НОМ} \cdot (\mu_K - \sqrt{\mu_K^2 - 1}) = 0,021 \cdot (3,2 - \sqrt{3,2^2 - 1}) = 0,132.$$

Естественная механическая характеристика для двигателя М1 (М2) построена на рисунке 4.2.

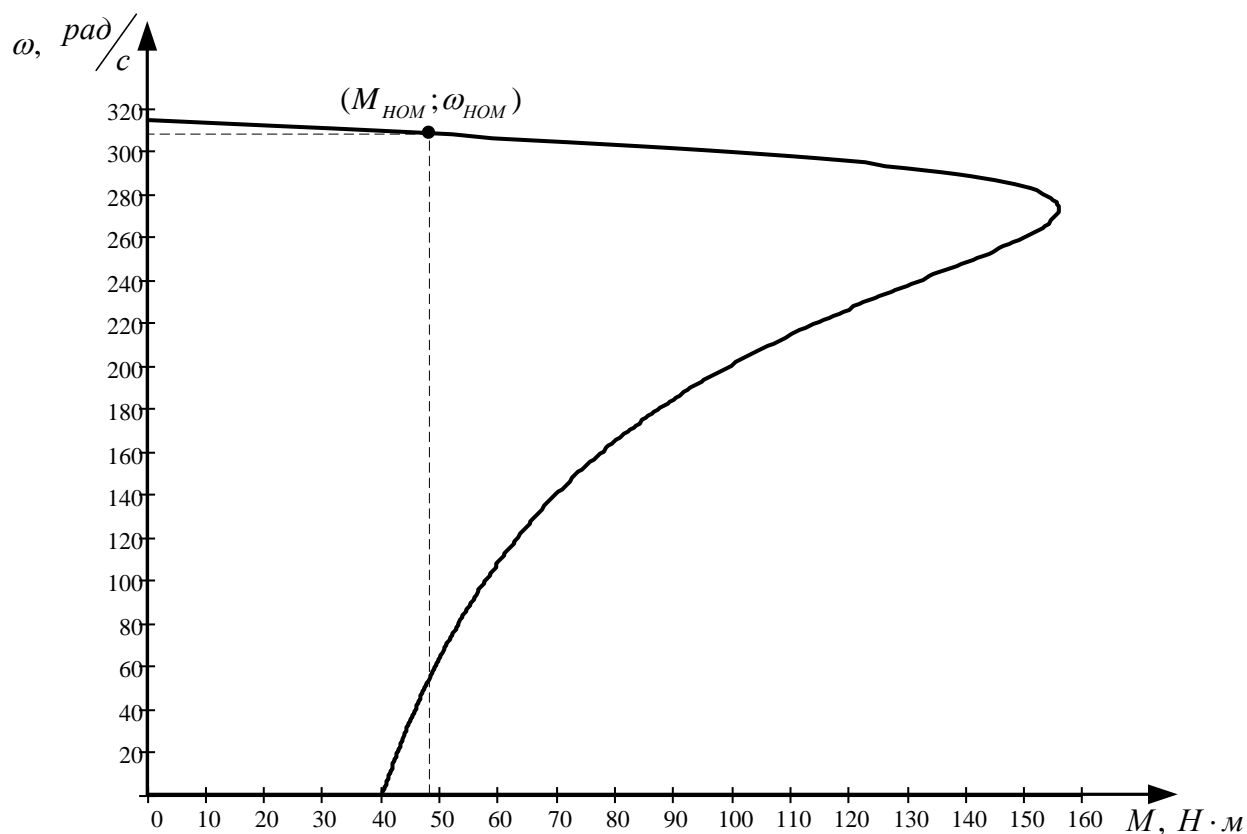


Рисунок 4.2 – Естественная механическая характеристика двигателя М1 (М2)

#### 4.2.2 Статический закон частотного регулирования

При выборе соотношения между  $U_1$  и  $f_1$  при регулировании чаще всего исходят из условия обеспечения перегрузочной способности двигателя:

$$\mu_K = \frac{M_K}{M_C} = const. \quad (4.2)$$

Для любой из механических характеристик критический момент двигателя определяется по известному соотношению:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_o \cdot (r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_K^2})}. \quad (4.3)$$

Можно принять  $r_1 = 0$  (для двигателей большой и средней мощности  $r_1 = 0.1 \dots 0.15 \cdot x_K$ ), тогда формула 4.3 принимает вид:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_o \cdot x_K} \equiv \frac{U_1^2}{f_1^2} = const.$$

Все принятые допущения вносят некоторую погрешность в расчеты. Однако рассчитанные по приведенным выше формулам характеристики АД близки к опытным и являются удовлетворительными для практических целей.

Для любой частоты  $f_{1j}$  источника питания при  $M_C = f(\omega)$  перегрузочная способность:

$$\mu_K(f_{1j}) = \frac{M_{Kj}}{M_C(\omega_j)} \equiv \frac{U_{1j}^2}{f_{1j}^2 \cdot M_C(\omega_j)} = const. \quad (4.4)$$

Тогда:

$$\frac{U_{1j}^2}{f_{1j}^2 \cdot M_C(\omega_j)} = \frac{U_{1K}^2}{f_{1K}^2 \cdot M_C(\omega_K)} = \frac{U_{1НОМ}^2}{f_{1НОМ}^2 \cdot M_{НОМ}} = const. \quad (4.5)$$

Отсюда можно записать основной закон регулирования напряжения  $U_1$  при изменении статического момента  $M_C$  при частотном регулировании для  $\mu_K = const$ :

$$\frac{U_1}{U_{1НОМ}} = \frac{f_1}{f_{1НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{M_C(\omega)}{M_{НОМ}}}. \quad (4.6)$$

Таким образом, закон регулирования амплитуды напряжения  $U_1$  определяется не только его частотой  $f_1$ , но и характером изменения статического момента  $M_C$ , который может быть различен.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Чаще всего статический момент зависит от скорости:

$$M_c = f(\omega).$$

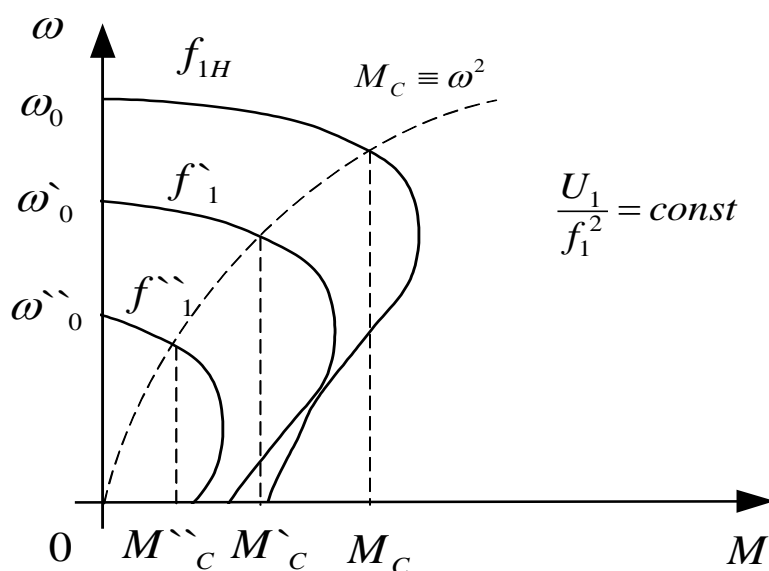
Нагрузка на валу центробежного насоса характеризуется свойствами идеальной вентиляторной нагрузки. Для идеальной вентиляторной нагрузки статический момент изменяется по закону:

$$M_c = M_{НОМ} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^2, \quad (4.7)$$

и закон регулирования имеет вид:

$$\frac{U_1}{U_{1НОМ}} = \frac{f_1}{f_{1НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{M_{НОМ} \cdot \omega^2}{M_{НОМ} \cdot \omega_{НОМ}^2}} \equiv \frac{f_1^2}{f_{НОМ}^2} \text{ или } \frac{U_1}{f_1^2} = const. \quad (4.8)$$

Общий вид механических характеристик при законе регулирования  $\frac{U_1}{f_1^2} = const$  представлен на рисунке 4.3.



$$\frac{U_1}{f_1^2} = const \text{ для различных частот } f_{1НОМ} > f_1 > f_1.$$

Рисунок 4.3 – Механические характеристики для закона регулирования

#### 4.3 Расчет параметров схем включения двигателя М1 (М2), обеспечивающих работу двигателя в заданных точках

В данном пункте необходимо рассчитать напряжение и частоту на выходе преобразователя частоты, которые обеспечивают работу двигателя в заданных точках.

Закон регулирования  $\frac{U_1}{f_1^2} = C$  – при частоте статора, меньшей номинальной, и постоянство напряжения при скорости, равной и выше номинальной.

##### 4.3.1 Расчет параметров при работе насосной станции в режиме «день»

Для определения постоянной  $C$  воспользуемся рисунками 4.2 и 4.3. При расходе  $Q_{дн} = 57,9 \text{ м}^3/\text{ч}$  скорость вращения двигателя М1 (М2)  $\omega_{дн} = 274,9 \text{ рад}/\text{с}$ , а статический момент  $M_c$  (формула 4.7):

$$M_c = M_n \cdot \left( \frac{\omega_{дн}}{\omega_{ном}} \right)^2 = 48,7 \cdot \left( \frac{274,9}{307,7} \right)^2 = 38,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отклонение скорости при данном моменте найдем по естественной механической характеристике (рисунок 4.2):

$$\Delta\omega = 5,2 \text{ рад}/\text{с}.$$

В относительных единицах:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_{дн}}{\omega_{он}} = \frac{274,9}{314} = 0,87 \text{ – относительное значение скорости;}$$

$$\bar{M} = \frac{M_c}{M_{ном}} = \frac{38,7}{48,7} = 0,79 \text{ – относительное значение момента;}$$

$$\bar{\Delta\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{он}} = \frac{5,2}{314} = 0,016 \text{ – относительное значение отклонения скорости.}$$

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

Синхронная скорость, соответствующая работе двигателя в данной точке:

$$\bar{\omega}_0 = \bar{\omega} + \Delta\bar{\omega} = 0,87 + 0,016 = 0,886,$$

$$f = \bar{\omega}_0 \cdot f_{1НОМ} = 0,886 \cdot 50 = 44,3 \text{ Гц} - \text{частота в заданной точке};$$

Учитывая, что  $\bar{M} \equiv \frac{\bar{U}_1^2}{f_1^2}$ :

$$\bar{U}_1 = \sqrt{\bar{M} \cdot f_1^2} = \sqrt{0,79 \cdot 0,886^2} = 0,787 - \text{напряжение в заданной точке.}$$

$$U_1 = \bar{U}_1 \cdot U_{1НОМ} = 0,787 \cdot 380 = 299,1 \text{ В.}$$

Постоянная  $C$ :

$$C = \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{299,1}{44,3^2} = 0,15 \frac{\text{В}}{\text{Гц}^2}.$$

Кривая нагрузки для центробежного насоса, в общем виде имеет вид:

$$M_C = B \cdot \omega_{ДН}^2.$$

Постоянная  $B$ :

$$B = \frac{M_C}{\omega_{ДН}^2} = \frac{38,7}{274,9^2} = 5,1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}.$$

Кривая нагрузки насоса и механическая характеристика электропривода построены в программе MATCAD и представлены на рисунке 4.4.

#### 4.3.2 Расчет параметров при работе насосной станции в режиме «ночь»

Для определения постоянной  $C$  воспользуемся рисунками 3.2 и 3.3. При расходе  $Q_H = 49,9 \text{ м}^3/\text{ч}$  скорость вращения двигателя М1 (М2)  $\omega_H = 236,9 \text{ рад}/\text{с}$ , а статический момент  $M_C$  (формула 4.7):

$$M_C = M_{НОМ} \cdot \left( \frac{\omega_H}{\omega_{НОМ}} \right)^2 = 48,7 \cdot \left( \frac{236,9}{307,7} \right)^2 = 28,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отклонение скорости при данном моменте найдем по естественной механической характеристике (рисунок 3.2):

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

$$\Delta\omega = 3,9 \text{ рад}/\text{с}.$$

В относительных единицах:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_H}{\omega_{OH}} = \frac{236,9}{314} = 0,75 - \text{относительное значение скорости};$$

$$\bar{M} = \frac{M_C}{M_{НОМ}} = \frac{28,9}{48,7} = 0,59 - \text{относительное значение момента};$$

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{OH}} = \frac{3,9}{314} = 0,012 - \text{относительное значение отклонения скорости}.$$

Синхронная скорость, соответствующая работе двигателя в данной точке:

$$\bar{\omega}_0 = \bar{\omega} + \Delta\bar{\omega} = 0,75 + 0,012 = 0,762.$$

$$f = \bar{\omega}_0 \cdot f_{1НОМ} = 0,762 \cdot 50 = 38,1 \text{ Гц} - \text{частота в заданной точке};$$

Учитывая, что  $\bar{M} \equiv \frac{\bar{U}_1^2}{f_1^2}$ :

$$\bar{U}_1 = \sqrt{\bar{M} \cdot f_1^2} = \sqrt{0,59 \cdot 0,762^2} = 0,585 - \text{напряжение в заданной точке}.$$

$$U_1 = \bar{U}_1 \cdot U_{1НОМ} = 0,585 \cdot 380 = 222,3 \text{ В}.$$

Постоянная  $C$ :

$$C = \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{222,3}{38,1^2} = 0,15 \frac{\text{В}}{\text{Гц}^2}.$$

Кривая нагрузки для центробежного насоса, в общем виде имеет вид:

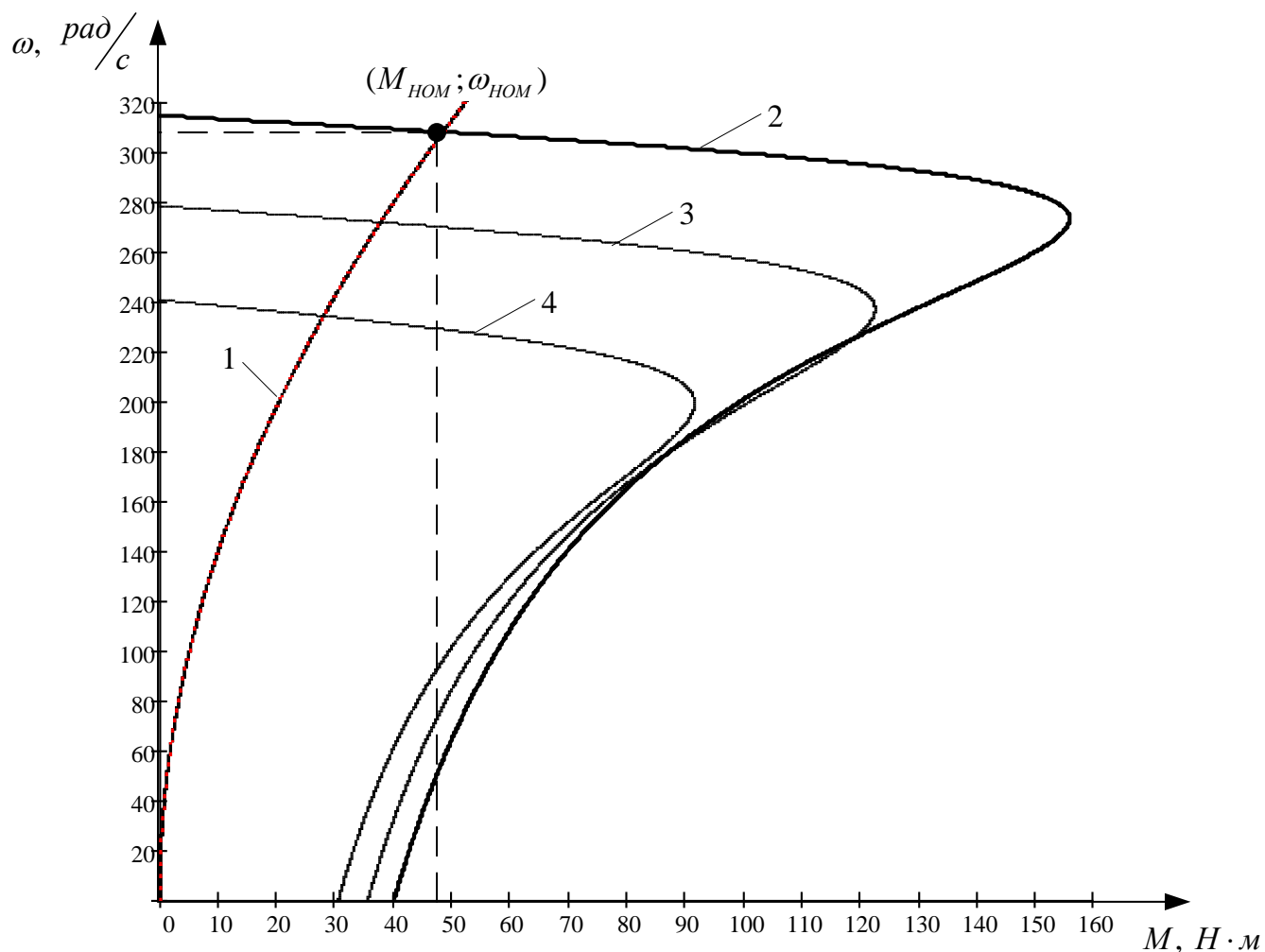
$$M_C = B \cdot \omega_H^2.$$

Постоянная  $B$ :

$$B = \frac{M_C}{\omega_H^2} = \frac{28,9}{236,9^2} = 5,1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}.$$

Кривая нагрузки насоса и механическая характеристика электропривода построены в программе MATCAD и представлены на рисунке 4.4.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38



- 1– кривая нагрузки насоса  $M_c(\omega) = 5.1 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^2$ ;
- 2– естественная механическая характеристика двигателя;
- 3– искусственная механическая характеристика двигателя в режиме «день»;
- 4– искусственная механическая характеристика двигателя в режиме «ночь».

Рисунок 4.4 – Кривая нагрузки и механические характеристики двигателя М1 (М2)

#### 4.4 Настройка и наладка преобразователя частоты

Схема подключения частотного преобразователя показана в документе 270304.2018.342.01.01 Э5.

Обзор параметров приведен в таблице 4.1. Параметры, которые необходимо изменить для обеспечения правильной работы частотного преобразователя, их значение и функции приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Обзор параметров частотного преобразователя

Номер	Функция
1	2
U1	Параметры контроля состояния
U2	Детализация ошибки
U3	Протокол ошибки
A1	Режим инициализации
A2	Параметры, задаваемые
b1	Выбор режима работы
b2	Торможение с подпиткой постоянным током
b3	Определение скорости
b4	Функция таймера
b5	ПИ- регулирование
b8	Энергосбережение
C1	Разгон / торможение
C2	S-профиль разгона
C4	Компенсация вращающего момента
C6	Несущая частота
d1	Предустановленное задание частоты
d2	Пределы задания частоты
d3	Частоты пропуска
d4	Удержание заданной частоты
E1	V/f – характеристика
E2	Настройка двигателя

F6	Дополнительная карта связи
H1	Многофункциональные дискретные входы
H2	Многофункциональные дискретные выходы
H3	Многофункциональные аналоговые входы
H4	Многофункциональные аналоговые выходы
H5	Интерфейс связи MEMOBUS
L1	Перегрузка двигателя
L2	Возобновление работы после пропадания питания
L3	Предотвращение опрокидывания ротора
L4	Обнаружение сигнала задания
L5	Сброс ошибки
L6	Обнаружение нагрузки
L8	Защита оборудования
n1	Функция предотвращения неравномерного вращения
n3	Торможение с повышенным скольжением
o1	Выбор контролируемых параметров
o2	Функции цифровой панели управления
o3	Функция копирования
T	Автоподстройка параметров двигателя

4.4.2 Выбор структуры электропривода, параметры электропривода, установка законов регулирования.

Таблица 4.2 – Параметры частотного преобразователя, формирующие структуру электропривода

№ параметра	Значение	Функция параметра	Описание
1	2	3	4

Выбор режима работы			
b1-01	1	Выбор источника задания частоты	Аналоговый вход
1	2	3	4
b1-02	1	Выбор источника команды на запуск	Дискретный вход
b1-03	0	Выбор способа остановки	Торможение до полной остановки
b1-04	1	Запрет обратного хода	Обратный ход запрещен
b1-11	2	Задержка команды на запуск (с)	Задаёт задержку времени
ПИ- регулирование			
b5-01	3	Выбор режима ПИ-регулирования	ПИ- регулирование включено
b5-02	0-25	Коэффициент передачи пропорционального звена	Настраивается (пункт 4.5.3)
b5-03	0-360	Время интегрирования (с)	Настраивается (пункт 4.5.3)
b5-12	2	Выбор обнаружения потери сигнала обратной связи ПИ-регулятора	При потере срабатывает контакт сигнализации ошибки



Продолжение таблицы 4.2

b5-13	100	Уровень обнаружения потери сигнала обратной связи ПИ-регулятора (%)	В процентах от максимальной частоты
b5-31	8	Выбор единиц измерения для ПИ-констант	Измеряется в барах
Разгон / торможение			
C1-01	5	Время разгона 1	Время разгона от 0 Гц до максимальной частоты
1	2	3	4
C1-02	5	Время торможения 1	Время торможения от максимальной частоты до 0 Гц
Предустановленное задание частоты			
d1-01	44.3	Задание частоты 1 (Гц)	Задание частоты при запуске
d1-02	38.1	Задание частоты 2 (Гц)	Задание частоты при подачи команды на дискретный вход
d2-01	100	Верхний предел задания частоты (%)	В процентах от максимальной частоты
d2-02	0	Нижний предел задания частоты (%)	В процентах от максимальной частоты
V/f – характеристика			

E1-01	380	Настройка входного напряжения (В)	Устанавливает входное напряжение инвертора
E1-03	F	Выбор V/f – характеристики	Характеристика с ограничениями напряжения и частоты
E1-04	50	Максимальная выходная частота (Гц)	Управляет зависимостью между скоростью двигателя и напряжением, поступающем от ПЧ V/f – параболическая характеристика
E1-05	380	Максимальное выходное напряжение (В)	
E1-06	50	Основная частота (Гц)	
E1-07	2.5	Средняя выходная частота (Гц)	
1	2	3	
E1-08	30	Напряжение при средней выходной частоте (В)	(применима для центробежных насосов/вентиляторов)
E1-09	1.2	Минимальная выходная частота (Гц)	
E1-10	18	Напряжение при минимальной выходной частоте (В)	

E1-13	380	Основное напряжение (В)	Задаёт выходное напряжение при основной частоте
Параметры двигателя			
E2-01	30	Номинальный ток двигателя (А)	Устанавливает номинальный ток двигателя
Многофункциональные дискретные входы			
H1-03	3	Выбор функции клеммы S5	Команда ступенчатого переключения скорости
Многофункциональные дискретные выходы			
H2-01	6	Выбор функции клеммы M1-M2	ПЧ готов к работе
Аналоговые входы			
H3-08	2	Выбор уровня сигнала аналогового входа A2	Задаёт уровень сигнала 4...20 мА
H3-09	В	Выбор функции аналогового входа A2	Обратная связь ПИ-контура
1	2	3	4
H3-13	0	Переключение входа A1/A2	Выбор входа для подачи основного задания частоты
Защита двигателя			
L1-01	1	Выбор защиты двигателя	Защита двигателя общего назначения
L1-04	0	Выбор режима работы при перегреве	Торможение до полной остановки

## 4.5 Настройка контура регулирования давления

### 4.5.1 Выбор типа регулятора давления

В качестве автоматического регулятора давления применим пропорционально-интегральный (ПИ-) регулятор, который позволяет создать на базе преобразователя частоты систему поддержания давления на заданном уровне по отклонению. Для этого необходимо сигнал с датчика технологической переменной завести на аналоговый вход преобразователя, настроить параметры ПИ- регулятора и установить требуемое значение переменной. ПИ- регулятор объединяет в себе свойства П- и И- регуляторов.

Составим передаточную функцию ПИ- регулятора:

$$Z_{OC}(p) = \frac{1}{Cp} + R_{OC} \text{ — сопротивление канала обратной связи;}$$

$$Z_{BX}(p) = R_{BX} \text{ — входное сопротивление.}$$

Тогда передаточная функция  $W(p)$  может быть представлена в виде:

$$W(p) = \frac{Z_{OC}}{Z_{BX}} = \frac{1 + R_{OC} \cdot Cp}{R_{BX} \cdot Cp}. \quad (4.9)$$

Если учесть, что коэффициент усиления пропорционального звена  $K = \frac{R_{OC}}{R_{BX}}$  и постоянная времени интегрирующего звена  $T = R_{BX} \cdot C$ , то передаточную функцию ПИ- регулятора (выражение 4.9) можно упростить и записать в виде:

$$W(p) = \frac{1}{R_{BX} \cdot Cp} + \frac{R_{OC}}{R_{BX}} = \frac{1}{Tp} + K. \quad (4.10)$$

На основании вышеизложенного представим ПИ- регулятор параллельным включением интегрирующего звена с постоянной времени  $T$  и пропорционального с коэффициентом усиления  $K$  (рисунок 4.6).

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

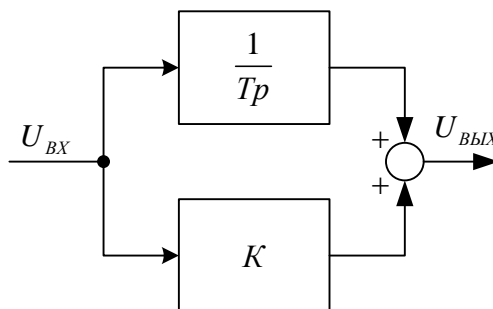


Рисунок 4.6 – ПИ- регулятор в виде пропорционально-интегрирующего звена

Приведем выражение 4.10 к общему знаменателю, следовательно, получим структурную схему ПИ- регулятор в виде изодромного звена с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1 + K \cdot Tp}{Tp}. \quad (4.11)$$

Структурная схема ПИ- регулятора представлена на рисунке 4.7.

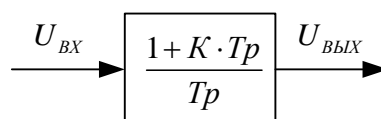


Рисунок 4.7 – Структурная схема ПИ- регулятора

Общий вид ЛАЧХ ПИ- регулятора показан на рисунке 4.8.

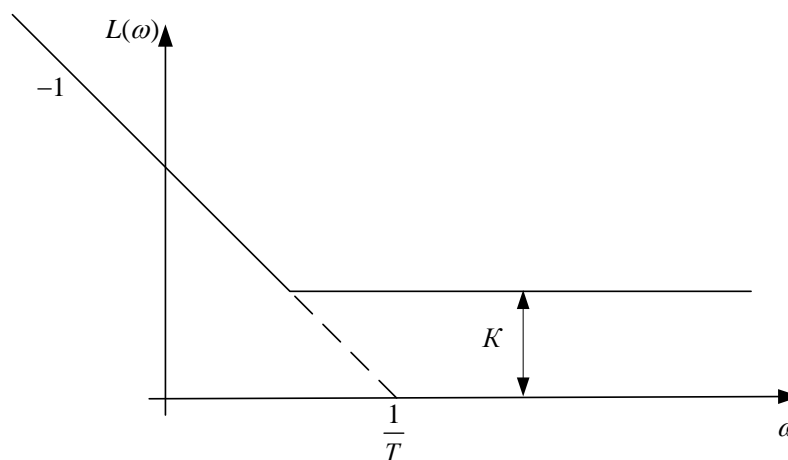


Рисунок 4.8 – Общий вид ЛАЧХ ПИ- регулятора

Ценным свойством ПИ- регулятора является то, что при малых частотах входного сигнала он соответствует И- регулятору, а при высоких – П- регулятору, т.е. позволяет совместить положительные качества обоих регуляторов. Благодаря И- каналу схема с ПИ- регулятором имеет нулевую статическую ошибку по задающему сигналу, а благодаря П- каналу быстродействие в большом числе случаев можно иметь выше, чем в схеме с И- регулятором.

Переходная характеристика ПИ -регулятора представлена на рисунке 4.9.

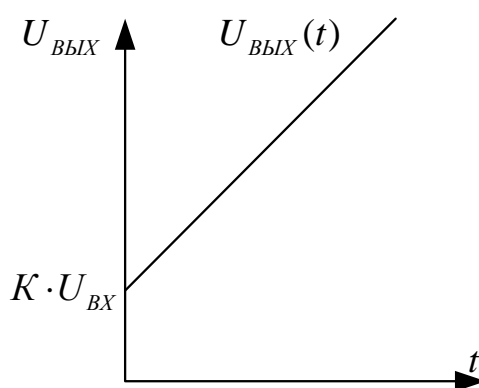


Рисунок 4.9 – Переходная характеристика ПИ- регулятора

Переходная функция ПИ- регулятора соответствует кривой  $U_{ВЫХ}(t)$ . После подачи скачка входного напряжения выходное напряжение регулятора сначала увеличивается скачком на величину  $\Delta U = K \cdot U_{ВХ}$  благодаря влиянию П- канала, а затем – нарастает по линейному закону с темпом, определяемым величиной  $T$ .

#### 4.5.2 Определение параметров ПИ- регулятора

Для выполнения расчётов, связанных с выбором параметров регулятора, оценкой статических и динамических показателей процессов в электроприводе, полезно составить упрощенную структурную схему электропривода (рисунок 4.10).

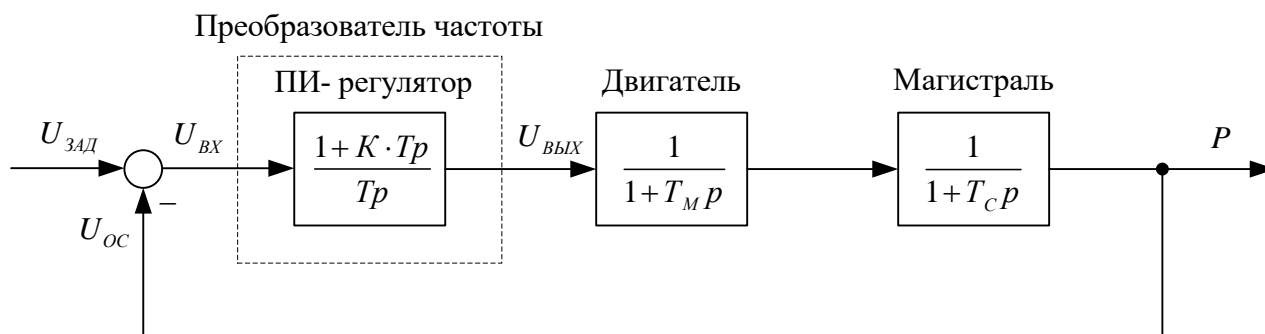


Рисунок 4.10 – Упрощенная структурная схема электропривода

Постоянная времени двигателя  $T_M$  равна:

$$T_M = \frac{J_{дв}}{\beta} = \frac{0,05}{7,7} = 0,006 \text{ с}, \quad (4.12)$$

где  $J_{дв} = 0.05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  (таблица 3.1) – момент инерции двигателя;

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_H}{\omega_{0H} - \omega_{НОМ}} = \frac{48,7}{314 - 307,7} = 7,7 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \quad \text{– жесткость механической}$$

характеристики.

Водопроводную магистраль представим в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени магистрали  $T_c = 5 \text{ с}$  и коэффициентом  $K = 1$ .

Параметры ПИ- регулятора (постоянная времени  $T$  и коэффициент усиления  $K$ ) определяются путем настройки регулятора (пункт 4.5.3).

#### 4.5.3 Настройка ПИ- регулятора

При настройке ПИ- регулятора к выходу преобразователя частоты подключается осциллограф. Перед началом практического исследования технологического процесса необходимо задать значение (уставку) для ПИ- регулятора. По осциллографу проверяется реакция регулятора на возмущения.

Примеры настройки ПИ- контура:

1. Предотвращение перерегулирования (рисунок 4.11).

Если наблюдается перерегулирование, необходимо уменьшить коэффициент передачи  $K$  пропорционального звена и увеличить время интегрирования  $T$ .

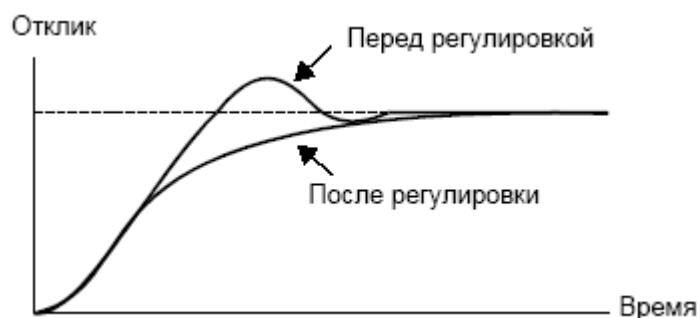


Рисунок 4.11 – Предотвращение перерегулирования

## 2. Быстрая стабилизация выходного сигнала (рисунок 4.12).

Чтобы достичь быстрой стабилизации регулируемого параметра даже в случае возникновения перерегулирования, необходимо уменьшить время интегрирования  $T$ .

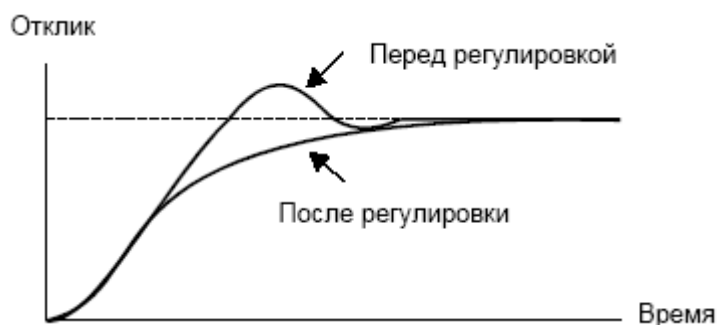


Рисунок 4.12 – Стабилизация выходного сигнала

## 3. Подавление колебаний малой частоты (рисунок 4.13).

Если возникают колебания, длительность периода которых превышает время интегрирования  $T$ , время интегрирования следует увеличить, чтобы предотвратить возникновение таких колебаний.



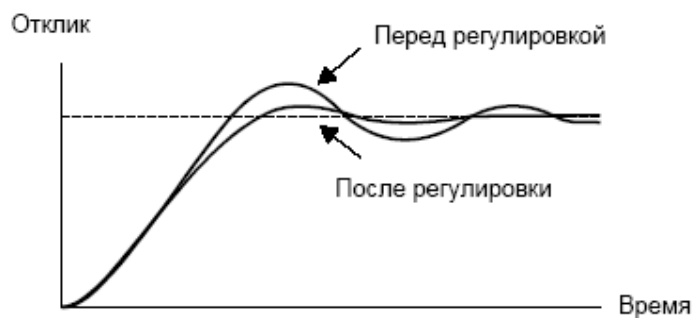


Рисунок 4.13 – Подавление колебаний малой частоты

#### 4. Подавление высокочастотных колебаний (рисунок 4.14).

Если наблюдаются колебания с высокой частотой, необходимо уменьшить коэффициент передачи пропорционального звена  $K$  или увеличить постоянную времени первичной задержки ПИ- контура.

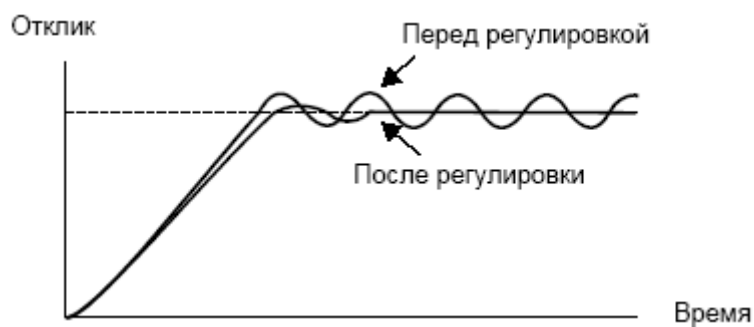


Рисунок 4.14 – Подавление высокочастотных колебаний

## 5 СИСТЕМА АВТОМАТИКИ И ЗАЩИТЫ

### 5.1 Принцип работы системы автоматизации насосной станции

5.1.1 По условию поставленной задачи на проектирование системы автоматизации насосная станция должна работать в двух режимах: от сети и преобразователя частоты, причем ПЧ обеспечивает работу в режиме «день» и «ночь» (пункт 1.1). Работа от сети необходима только при наладке, ремонтах или устранении аварийных ситуаций.

5.1.2 В исходном состоянии электродвигатели М1 и М2 не подключены: переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) стоит в положении «Сеть», переключатель выбора насоса (Н1 / Н2) стоит в положении «Н2», кнопки «Пуск» и «Стоп» не нажаты.

5.1.3 Для запуска в работу электродвигателя М1 (М2) от преобразователя частоты на лицевой панели шкафа управления необходимо выполнить следующие операции:

- перевести переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) в положение «ПЧ»;
- переключатель выбора насоса (Н1 / Н2) установить в положение «Н1 (Н2)»;
- нажать кнопку «Пуск».

При успешном запуске должна загореться световая индикация «Работа от ПЧ М1 (Работа от ПЧ М2)».

Для останова электродвигателя М1 (М2) необходимо нажать кнопку «Стоп», световая индикация «Работа от ПЧ М1 (Работа от ПЧ М2)» гаснет.

5.1.4 Для запуска электродвигателя М1 (М2) от сети на лицевой панели шкафа управления оператора необходимо выполнить следующие операции:

- перевести переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) в положение «Сеть»;
- переключатель выбора насоса (Н1 / Н2) установить в положение «Н1 (Н2)»;
- нажать кнопку «Пуск».

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

При успешном запуске должна загореться световая индикация «Работа от сети М1 (Работа от сети М2)».

Для останова электродвигателя М1 (М2) необходимо нажать кнопку «Стоп», световая индикация «Работа от сети М1 (Работа от сети М2)» гаснет.

При появлении сигнала «Сухой ход» от реле давления система автоматизации отключается, двигатель М1 (М2) останавливается.

## 5.2 Разработка алгоритма автоматизации управления механизмами объекта

5.2.1 Из представленного описания работы системы автоматизации следует, что необходимо формировать следующие входные / выходные сигналы:

Входные сигналы и команды:

- выбор режима работы «ПЧ / Сеть»;
- выбор насоса «Н1 / Н2»;
- кнопка «Пуск»;
- кнопка «Стоп»;
- включение двигателя М1 от преобразователя частоты;
- включение двигателя М1 от сети;
- включение двигателя М2 от преобразователя частоты;
- включение двигателя М2 от сети;
- сигнал от преобразователя частоты «ПЧ работает»;
- сигнал от преобразователя частоты «Ошибка ПЧ»;
- сигнал от реле давления «Сухой ход».

Выходные сигналы и команды:

- запуск электродвигателя М1 от преобразователя частоты;
- запуск электродвигателя М1 от сети;
- запуск электродвигателя М2 от преобразователя частоты;
- запуск электродвигателя М2 от сети;
- сигнал на запуск ПЧ;

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

– сигнал на переход в режим «Ночь».

Кроме команд на исполнительные механизмы необходимо задействовать выходные сигналы на световую индикацию для удобства эксплуатации и устранения неполадок в системе.

Выходные сигналы на световую индикацию:

- сигнал «Работа от ПЧ»;
- сигнал «Авария».

На лицевую панель шкафа должны выводиться следующие световые индикации:

- световая индикация «Работа от ПЧ М1»;
- световая индикация «Работа от ПЧ М2»;
- световая индикация «Работа от сети М1»;
- световая индикация «Работа от сети М2».

Для автоматизации работы системы необходимо иметь информацию о состоянии объекта. Поэтому необходимо использовать датчик давления и реле давления.

В таблице 5.1 сведены все сигналы и команды, используемые в системе автоматизации.

Таблица 5.1 – Сигналы и команды, используемые в системе автоматизации

№ п/п	Наименование сигнала или команды	Обозначение	Принятое значение логической единицы
1	2	3	4
Входные сигналы			
1	Выбор режима работы «ПЧ / Сеть»	<i>ПЧ</i>	Есть
2	Выбор насоса «Н1 / Н2»	<i>Н1</i>	Есть
3	Кнопка «Пуск»	<i>Пуск</i>	Нажата
4	Кнопка «Стоп»	<i>Стоп</i>	Не нажата

1	2	3	4
5	Включение двигателя М1 от преобразователя частоты	<i>Вкл1<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
6	Включение двигателя М1 от сети	<i>Вкл1<sub>Сеть</sub></i>	Есть
7	Включение двигателя М2 от преобразователя частоты	<i>Вкл2<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
8	Включение двигателя М2 от сети	<i>Вкл2<sub>Сеть</sub></i>	Есть
9	Сигнал от преобразователя частоты «ПЧ работает»	<i>Работа<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
10	Сигнал от преобразователя частоты «Ошибка ПЧ»	<i>Ошибка<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
11	Сигнал от реле давления «Сухой ход»	<i>СХ</i>	Есть
12	Сигнал от теплового реле «Перегрузка»	<i>Перегрузка</i>	Есть
<b>Выходные сигналы</b>			
1	Запуск электродвигателя М1 от преобразователя частоты	<i>Запуск1<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
2	Запуск электродвигателя М1 от сети	<i>Запуск1<sub>Сеть</sub></i>	Есть
3	Запуск электродвигателя М2 от преобразователя частоты	<i>Запуск2<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
4	Запуск электродвигателя М2 от сети	<i>Запуск2<sub>Сеть</sub></i>	Есть
5	Сигнал «Работа от ПЧ»	<i>Работа<sub>от ПЧ</sub></i>	Есть

1	2	3	4
6	Сигнал «Авария»	<i>Авария</i>	Есть
7	Сигнал на запуск ПЧ	<i>Запуск<sub>ПЧ</sub></i>	Есть
8	Сигнал на переход в режим «Ночь»	<i>Ночь</i>	Есть

5.2.2 Промежуточная (внутренняя) переменная «P1» возникает, если переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) переведен в положение «ПЧ», переключатель выбора насоса стоит в положении «Н1», нет сигнала от реле давления «СХ» и нет сигнала «Авария»:

$$P1 = ПЧ \cdot Н1 \cdot \overline{СХ} \cdot \overline{Авария}.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P2» формируется при появлении сигнала от реле давления «СХ» или при возникновении сигнала от теплового реле «Перегрузка»:

$$P2 = СХ + Перегрузка.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P3» формируется при наличии промежуточной переменной «P1» или промежуточной переменной «P8», если нажата кнопка «Пуск», запоминается и сбрасывается только при потере питания схемы:

$$P3 = (P1 + P8) \cdot Пуск + P3.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P4» формируется при нажатии на кнопку «Пуск», запоминается и сбрасывается при нажатии на кнопку «Стоп»:

$$P4 = (Пуск + P4) \cdot Стоп.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P5» формируется при нажатии на кнопку «Пуск», запоминается и сбрасывается при пропадании выхода таймера 6 с задержкой времени отключения 1с:

$$P5 = (Пуск + P5) \cdot T6^{12c}.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P6» возникает, если переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) переведен в положение «Сеть» ( $\overline{ПЧ}$ ), переключатель выбора насоса стоит в положении «Н1», нет выхода таймера 8 с задержкой времени отключения 1с и нет выхода таймера 10 с задержкой времени отключения 1с:

$$P6 = \overline{ПЧ} \cdot Н1 \cdot \overline{Вкл1_{ПЧ}}.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P7» возникает, если переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) переведен в положение «Сеть» ( $\overline{ПЧ}$ ), переключатель выбора насоса стоит в положении «Н2» ( $\overline{Н1}$ ), нет выхода таймера 8 с задержкой времени отключения 1с и нет выхода таймера 10 с задержкой времени отключения 1с:

$$P7 = \overline{ПЧ} \cdot \overline{Н1} \cdot \overline{Вкл2_{ПЧ}}.$$

Промежуточная (внутренняя) переменная «P8» возникает, если переключатель выбора режима работы (ПЧ / Сеть) переведен в положение «ПЧ», переключатель выбора насоса стоит в положении «Н2» ( $\overline{Н1}$ ), нет сигнала от реле давления «СХ» и нет сигнала «Авария»:

$$P8 = ПЧ \cdot \overline{Н1} \cdot \overline{СХ} \cdot \overline{Авария}.$$

Сигнал на запуск электродвигателя М1 от преобразователя частоты «Запуск1<sub>ПЧ</sub>» возникает если нет выхода таймера 5 с задержкой времени включения

1с, есть промежуточная переменная «P5», нет выхода таймера 9 с задержкой времени отключения 1с и нет выхода таймера 10 с задержкой времени отключения 1с:

$$Запуск1_{ПЧ} = \overline{T5^{\uparrow 2c}} \cdot \overline{Вкл2_{ПЧ}} \cdot P5.$$

Сигнал на запуск электродвигателя М1 от сети «Запуск1<sub>Сеть</sub>» возникает если нет промежуточной переменной «P2», есть промежуточная переменная «P4» и промежуточная переменная «P6» и нет выхода таймера 11 с задержкой времени отключения 1с:

$$Запуск1_{Сеть} = \overline{P2} \cdot P4 \cdot P6.$$

Сигнал на запуск электродвигателя М2 от преобразователя частоты «Запуск2<sub>ПЧ</sub>» возникает если нет выхода таймера 7 с задержкой времени включения 1с, есть промежуточная переменная «P5», нет выхода таймера 8 с задержкой времени отключения 1с и нет выхода таймера 11 с задержкой времени отключения 1с:

$$Запуск2_{ПЧ} = \overline{T7^{\uparrow 2c}} \cdot \overline{Вкл1_{ПЧ}} \cdot P5.$$

Сигнал на запуск электродвигателя М2 от сети «Запуск2<sub>Сеть</sub>» возникает если нет промежуточной переменной «P2», есть промежуточная переменная «P4» и промежуточная переменная «P7» и нет выхода таймера 9 с задержкой времени отключения 1с:

$$Запуск2_{Сеть} = \overline{P2} \cdot P4 \cdot P7.$$

Сигнал на световую индикацию работы электродвигателя М1 (М2) от преобразователя частоты «Работа<sub>от ПЧ</sub>» возникает при появлении сигнала на включение двигателя М1 от ПЧ «Вкл1<sub>ПЧ</sub>» или при появлении сигнала на включение двигателя М2 от ПЧ «Вкл2<sub>ПЧ</sub>»:

$$Работа_{от ПЧ} = Вкл1_{ПЧ} + Вкл2_{ПЧ}.$$

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58



Сигнал на световую индикацию «Авария» возникает при появлении сигнала от преобразователя частоты «Ошибка<sub>ПЧ</sub>» или сигнала от теплового реле «Перегрузка»:

$$\text{Авария} = \text{Ошибка}_{\text{ПЧ}} + \text{Перегрузка}.$$

Сигнал на запуск ПЧ «Запуск<sub>ПЧ</sub>» возникает, если есть выход таймера 1 с задержкой времени включения 2с и есть промежуточная переменная «P1» или есть выход таймера 2 с задержкой времени включения 2с и есть переменная «P8» и нет сигнала от реле давления «СХ»:

$$\text{Запуск}_{\text{ПЧ}} = (T1^{\uparrow 2c} \cdot P1 + T2^{\uparrow 2c} \cdot P8) \cdot \overline{\text{СХ}}.$$

Сигнал на переход в режим «Ночь» возникает при появлении выхода таймера 3 с задержкой времени включения 18ч:

$$\text{Ночь} = T3^{\uparrow 18ч}.$$

Таймер 1 включается при появлении сигнала включения двигателя М1 от преобразователя частоты «Вкл1<sub>ПЧ</sub>»:

$$T1_{\text{ВКЛ}} = \text{Вкл1}_{\text{ПЧ}}.$$

Таймер 1 сбрасывается при нажатии на кнопку «Стоп» или переводе переключателя выбора насоса в положении «Н2» ( $\overline{Н1}$ ):

$$T1_{\text{СБРОС}} = \overline{\text{Стоп}} + \overline{Н1}.$$

Таймер 2 включается при появлении сигнала включения двигателя М2 от преобразователя частоты «Вкл2<sub>ПЧ</sub>»:

$$T2_{\text{ВКЛ}} = \text{Вкл2}_{\text{ПЧ}}.$$

Таймер 2 сбрасывается при нажатии на кнопку «*Стоп*» или переводе переключателя выбора насоса в положение «*H1*»:

$$T2_{\text{СБРОС}} = \overline{\text{Стоп}} + H1.$$

Таймер 3 включается при наличии переменной «*P3*»:

$$T3_{\text{ВКЛ}} = P3.$$

Таймер 3 сбрасывается при появлении выхода таймера 4 с задержкой времени включения бч:

$$T3_{\text{СБРОС}} = T4^{\uparrow 6ч}.$$

Таймер 4 включается при появлении сигнала на переход в режим «*Ночь*»:

$$T4_{\text{ВКЛ}} = \text{Ночь}.$$

Таймер 5 включается, если нет сигнала от преобразователя частоты «*Работа<sub>ПЧ</sub>*» и нет промежуточной переменной «*P1*»:

$$T5_{\text{ВКЛ}} = \overline{\text{Работа}_{\text{ПЧ}}} \cdot \overline{P1}.$$

Таймер 6 включается при не нажатой кнопке «*Стоп*»:

$$T6_{\text{ВКЛ}} = \text{Стоп}.$$

Таймер 7 включается, если нет сигнала от преобразователя частоты «*Работа<sub>ПЧ</sub>*» и нет промежуточной переменной «*P8*»:

$$T7_{\text{ВКЛ}} = \overline{\text{Работа}_{\text{ПЧ}}} \cdot \overline{P8}.$$

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Таймер 8 включается при появлении сигнала включения двигателя М1 от преобразователя частоты «  $V_{кл1_{ПЧ}}$  »:

$$T2_{ВКЛ} = V_{кл2_{ПЧ}}.$$

Таймер 9 включается при появлении сигнала включения двигателя М1 от сети «  $V_{кл1_{Сеть}}$  »:

$$T2_{ВКЛ} = V_{кл2_{ПЧ}}.$$

Таймер 10 включается при появлении сигнала включения двигателя М2 от преобразователя частоты «  $V_{кл2_{ПЧ}}$  »:

$$T2_{ВКЛ} = V_{кл2_{ПЧ}}.$$

Таймер 11 включается при появлении сигнала включения двигателя М2 от сети «  $V_{кл2_{Сеть}}$  »:

$$T2_{ВКЛ} = V_{кл2_{ПЧ}}.$$

На основе полученных логических уравнений можно построить требуемую систему автоматизации. Наиболее удобным в настройке, отладке и эксплуатации является построение системы автоматизации на базе программируемого интеллектуального реле (ПИР).

Использование ПИР позволяет:

- упростить реализацию системы автоматизации;
- расширить возможности диагностики неисправностей;
- упростить наладку системы при изменении технологических требований.

Количество входных и выходных сигналов и команд (таблица 5.1), определило применение в данной системе автоматизации интеллектуального реле серии EASY 810, производимого фирмой MOELLER. Аналогичные интеллектуальные реле существуют и у других производителей (Siemens, Schneider Electric и т.д.). Все они работают аналогичным образом и имеют сходные функции и аппаратно-

механические характеристики. В данном случае выбор был определен исходя из цены и наличия на складе устройства данной серии.

### 5.3 Выбор элементной базы автоматизации и преобразователей технологической информации

Следует заметить, что при создании устройств автоматики разработчики и наладчики стараются выбирать все элементны одного или нескольких производителей. Таким образом проще согласовывать элементы в общей схеме. В данном дипломном проекте выбран преобразователь частоты фирмы OMRON [пункт 3.2]. Значит в дальнейшем будем стараться подбирать оборудование этой же компании, а если это невозможно, то компаний которые эта фирма рекомендует.

5.3.1 В данном дипломном проекте блок управления системы автоматизации реализован на программируемом интеллектуальном реле типа EASY 819AC-RC из серии EASY 810 .

Общий вид интеллектуального реле приведен на рисунке 5.1.

Аппаратные программные средства интеллектуального реле позволяют обеспечить выполнение всех типовых информационных и управляющих функций: сбор технологической информации, контроль и регулирование в соответствии с логическими уравнениями.

В ходе разработки алгоритма автоматизации управления механизмами объекта установлено, что необходимо 12 входов и 8 выходов (таблица 5.1), следовательно, требуется модуль вывода дискретных сигналов с 2-мя релейными выходами. Выбираем модуль расширения типа EASY202-RE. Технические характеристики интеллектуального реле и модуля расширения приведены в таблице 5.2.



Рисунок 5.1 – Общий вид интеллектуального реле EASY 819AC-RC

Таблица 5.2 – Технические характеристики интеллектуального реле и модуля вывода дискретных сигналов

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
<b>Интеллектуальное реле</b>		
Тип	–	EASY 819AC-RC
Управляющее напряжение	В	220
Рассеиваемая мощность	ВА	10
Цифровые входы	–	12
Цифровые выходы	–	6
Жидкокристаллический дисплей	–	+
Подключаемая нагрузка	А	8
Степень защиты	–	IP20
Рабочая температура	°С	– 25...+ 55
<b>Модуль вывода дискретных сигналов</b>		
Тип	–	EASY 202-RE
Цифровые выходы	–	2

5.3.2 В качестве датчика давления выбран датчик типа ЕСО – 1, выпускаемый компанией «WIKА». Выбор основан на том, что него также как и у интеллектуального реле EASY 819AC-RC выходной сигнал равен 4 – 20 мА. Такой датчик будет легко согласовываться и с интеллектуальным реле и с преобразователем частоты. Также он является очень надежным и простым при монтаже. Общий вид датчика показан на рисунке 5.1. Технические характеристики приведены в таблице 5.3. Электрическая схема подключения датчика к нагрузке показана на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Общий вид датчика давления ЕСО – 1

Таблица 5.3 – Технические характеристики датчика давления

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Тип	–	ЕСО – 1
Напряжение питания	В	10 – 30
Выходной сигнал	мА	4 – 20
Диапазон показания давления	бар	0 – 6
Погрешность измерения	%	± 1 от предела измерения
Допустимое давление перегрузки	бар	50
Условия эксплуатации: – температура окружающего воздуха; – температура измеряемой среды.	°С	– 30...+ 80 – 40...+ 100
Степень защиты	–	IP65

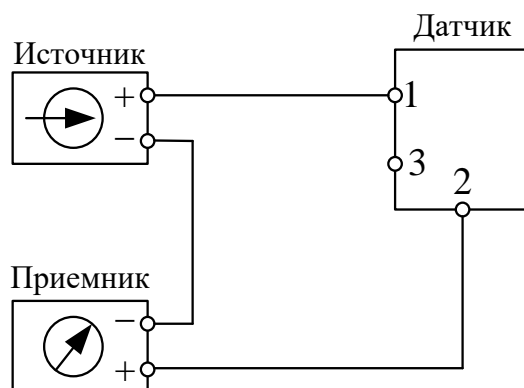


Рисунок 5.2 – Схема подключения датчика давления к нагрузке

5.3.3 Для защиты от «сухого хода» выбрано реле давления типа RT-1A производства компании DANFOSS. Оно является малогабаритным, качественным, недорогим, имеет высокую степень надежности, а также хорошо согласуется с ранее выбранным оборудованием. Технические характеристики представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Технические характеристики реле давления

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Тип	–	RT-1A
Рабочий диапазон	бар	– 0.8...5
Дифференциал	бар	0.5...0.65
Максимальное рабочее давление	бар	22
Испытательное давление	бар	25
Степень защиты	–	IP54

5.3.4 Для обеспечения питания датчика давления необходимо выбрать блок питания. Требуемая мощность блока питания определяется мощностью потребителя, нагруженного на него. Выбираем блок питания типа S8VS – 01524,

производимый фирмой OMRON. Выбор основан на том, что производители, выбранного в пункте 5.3.2 датчика давления, компания «WIKА» рекомендуют использовать для обеспечения питания блоки, производимые фирмой OMRON. В таблице 5.5 представлены технические характеристики блока питания.

Таблица 5.5 – Технические характеристики блока питания

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Тип	–	S8VS – 01524
Входное напряжение	В	100 – 240
Номинальная мощность	Вт	15
Выходное напряжение	В	24
Выходной ток	А	0.65
Диапазон регулирования напряжения	%	– 10 до 15
Рабочая влажность окружающей среды	%	25 – 85
Температура хранения	°С	– 25...65

5.3.5 Для защиты всех элементов электропривода от коротких замыканий и перегрузки при работе выбираем автоматические выключатели фирмы MOLLER типа PKZM4 и CLS6-C6/2. Аналогичные выключатели производят и другие производители. Выбор основан на надежности и дешевизне данного оборудования. А также при выборе учитываются номинальные токи, которые указаны в паспортах устройств, которые необходимо защищать от перегрузки и короткого замыкания. Технические характеристики выключателей приведены в таблице 5.6.



Таблица 5.6 – Технические характеристики автоматических выключателей

Назначение автоматического выключателя	Тип	Количество полюсов / шт.	Номинальный ток, А
Защита преобразователя частоты (выбираем по реактивной мощности)	PKZM4-50	3 / 1	50
Защиты блока питания	CLS6-C6/2	2 / 1	6
Защита электродвигателей М1 и М2 при питании от сети	PKZM4-40	3 / 1	40
Защита интеллектуального реле	CLS6-C6/2	2 / 1	6

5.3.6 Для включения и отключения питания электродвигателей М1 и М2 выбираем силовые контакторы и вспомогательные модули контактов фирмы OMRON типа J7KN–32–230. Выбор определен надежностью и дешевизной данных контакторов. А также простотой согласования с уже выбранным оборудованием. Технические характеристики приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Технические характеристики силовых контакторов

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
1	2	3
<b>Силовые контакторы</b>		
Тип	–	J7KN–32–230
Количество	Шт	4
Напряжение	В	380
Напряжение обмоток	В	220–240

1	2	3
Номинальный ток	А	32
Встроенные контакты	–	–
Вспомогательные модули контактов		
Тип	–	J73KN–B–10 / J73KN– B–01
Количество	Шт	8 / 4
Монтируемые контакты	–	1НО / 1НЗ

В пунктах 5.3.7 – 5.3.12 выбор оборудования осуществляется аналогично пункту 5.3.6.

5.3.7 Для защиты электродвигателей М1 и М2 при питании от сети от перегрузки по току выбираем тепловые реле фирмы OMRON типа J7TKN–C–42. Технические характеристики приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8– Технические характеристики тепловых реле

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Тип	–	J7TKN–C–42
Количество	шт	2
Напряжение	В	380
Диапазон установки	А	28 – 42
Встроенные контакты	–	1НО, 1НЗ

5.3.8 Для осуществления режима работы (ПЧ / Сеть) выбираем двухпозиционный переключатель фирмы OMRON типа A165W–T2M.

5.3.9 Для осуществления возможности переключения насоса (Н1 / Н2) выбираем двухпозиционный переключатель фирмы OMRON типа A165W-T2M.

5.3.10 Для осуществления запуска электродвигателя М1 (М2) выбираем кнопочный выключатель фирмы OMRON типа A16L-TB (без подсветки).

5.3.11 Для останова электродвигателя М1 (М2) выбираем кнопочный выключатель фирмы OMRON типа A16L-TR (без подсветки).

5.3.12 Для световой индикации выбираем лампы в количестве 4-х штук фирмы OMRON типа A16-2NGN (неоновая, зеленого цвета) и одну лампу типа A16-2NRN (неоновая, красного цвета).

#### 5.4 Разработка функциональной схемы автоматизации

На основе описания технологического процесса, содержательного описания автоматизируемого объекта, определенных входных и выходных команд, с учетом выбора программируемого интеллектуального реле составлена функциональная схема системы автоматизации, представленная в документе 270304.2018.342.02.01 Э2

В рассматриваемой системе автоматизации можно выделить следующие основные функциональные элементы:

- шкаф управления – в таблицах 5.2 – 5.7 было выбрано оборудование, которое для удобства эксплуатации размещено на одной панели, установленной в железный корпус, который имеет название шкаф управления;
- блок управления на программируемом интеллектуальном реле;
- система управления насосами М1 и М2 на преобразователе частоты;
- насосы М1 и М2;
- реле давления;
- датчик давления.

На лицевой панели шкафа управления расположены следующие элементы:

- переключатель выбора режима работы «ПЧ / Сеть»;
- переключатель выбора насоса «Н1 / Н2»;

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

- кнопка «Пуск»;
- кнопка «Стоп»;
- лампа «Работа от ПЧ М1»;
- лампа «Работа от ПЧ М2»;
- лампа «Работа от сети М1»;
- лампа «Работа от сети М2»;
- лампа «Авария».

## 5.5 Разработка принципиальной электрической схемы автоматизации

5.5.1 В соответствии с функциональной схемой системы автоматики (рисунок 5.3) и выбранной элементной базой составлена принципиальная схема, которая показана в документе 270304.2018.342.03.01 ЭЗ.

5.5.2 Автоматический выключатель QF1 выполняет функцию защиты преобразователя частоты от короткого замыкания (таблица 5.6).

5.5.3 Автоматический выключатель QF2 выполняет защиту блока питания А1 (таблица 5.6).

5.5.4 Автоматический выключатель QF3 выполняет защиту электродвигателей М1 и М2 при питании от сети (таблица 5.6).

5.5.5 Автоматический выключатель QF4 выполняет защиту системы автоматизации (таблица 5.6).

5.5.6 Сетевой контактор КМ1 подключает электродвигатель М1 к преобразователю частоты и обеспечивает управление возможными защитными функциями, а также изоляцию двигателя при остановке (таблица 5.7).

5.5.7 Сетевой контактор КМ2 подключает электродвигатель М1 к силовой сети под напряжением 380 В и обеспечивает управление возможными защитными функциями, а также изоляцию двигателя при остановке (таблица 5.7).

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

5.5.8 Сетевой контактор КМ3 подключает электродвигатель М2 к преобразователю частоты и обеспечивает управление возможными защитными функциями, а также изоляцию двигателя при остановке (таблица 5.7).

5.5.9 Сетевой контактор КМ4 подключает электродвигатель М2 к силовой сети под напряжением 380 В и обеспечивает управление возможными защитными функциями, а также изоляцию двигателя при остановке (таблица 5.7).

5.5.10 Блок питания А1 с напряжением на выходе 24 В питает датчик давления ВР1. На схеме клеммы блока питания указаны в соответствии с паспортными данными, выбор блока питания ВР описан в пункте 5.3.4.

5.5.11 Для регулирования давления в системе используется датчик давления ВР1 в обратной связи. Выбор датчика описан в пункте 5.3.2.

5.5.12 Асинхронный электродвигатель переменного тока М1 (М2) управляется преобразователем частоты UZ1. Преобразователь получает питание от сети трехфазного переменного напряжения 380 В.

5.5.13 Элементы шкафа управления (переключатели SA1, SA2; кнопки SB1, SB2; лампы HL1-HL5) подключены непосредственно к входам/выходам контроллера А2.1.

5.5.14 Система получает питание после включения автоматических выключателей QF1-QF4.

5.5.15 Преобразователь частоты UZ1 получает питание после включения автоматического выключателя QF1.

5.5.16 Электродвигатель М1 получает питание от преобразователя частоты UZ1 (или сети) после включения пускателя КМ1 (или КМ2), то есть при переводе переключателя выбора режима работы ПЧ / Сеть в положение ПЧ (или Сеть), а также переводе переключателя выбора насоса Н1 / Н2 в положение Н1 и нажатии на кнопку SB1. Отключение осуществляется нажатием на кнопку SB2.

5.5.17 Электродвигатель М2 получает питание от преобразователя частоты UZ1 (или сети) после включения пускателя КМ3 (или КМ4), то есть при переводе переключателя выбора режима работы «ПЧ / Сеть» SA1 в положение ПЧ (или

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

Сеть), а также переводе переключателя выбора насоса «Н1 / Н2» SA2 в положение Н2 и нажатии на кнопку SB1. Отключение осуществляется нажатием на кнопку SB2.

5.5.18 Управление приводами насосной станции осуществляется через программируемое интеллектуальное реле А2.1, в зависимости от режима работы, который включает и отключает привод в соответствии с входными сигналами и по заданной программе.

5.5.19 Для включения системы в режиме работы «ПЧ», оператору необходимо подать питание на систему управления, перевести переключатель «ПЧ / Сеть» SA1 в положение «ПЧ», также переключателем «Н1 / Н2» выбрать нужный насос и нажать кнопку пуск «Пуск» SB1. Если на выходе преобразователя частоты появится напряжение, он подаст сигнал «ПЧ работает». Затем в соответствии с технологией можно наблюдать за процессом работы насосной станции.

5.5.20 Для включения системы в режиме работы «Сеть», оператору необходимо подать питание на систему управления, перевести переключатель «ПЧ / Сеть» SA1 в положение «Сеть», также переключателем «Н1 / Н2» выбрать нужный насос и нажать кнопку пуск «Пуск» SB1. Затем можно заниматься наладкой, ремонтом или устранением аварийных ситуаций.

5.5.21 В случае возникновения аварийной ситуации система подаст сигнал об аварии: загорится световая индикация «Авария» HL5.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте спроектирован электропривод и система автоматика насосной станции.

Применение частотно-регулируемого электропривода позволяет избежать гидравлических ударов в водопроводной магистрали, поддерживать заданное давление. Частотное регулирование позволяет экономить электроэнергию.

Для автоматизации работы системы применено программируемое интеллектуальное реле EASY 819AC-RC, это обеспечивает простой и доступный уровень обслуживания, настройки и корректировки работы объекта.

На основе электрических принципиальных схем элементов насосной станции разработана принципиальная электрическая схема системы.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Борисов, А.М. Автоматизация технологических процессов: учебное пособие. Часть 1/А.М. Борисов, Н.Е. Лях – Ч.: Изд. ЮУрГУ, 2001. – 403 с.
- 2 Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры/ В.М. Черкасский – М.:Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
- 3 Дьяков, В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию: практ. пособие/ В.И. Дьяков — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1991.— 160 с.
- 4 Электротехнический справочник: учебное пособие: в 3 томах/ под ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – 6 изд. испр. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.
- 5 Драчев, Г.И. Теория электропривода:Учебное пособие. Часть 2/ Г.И. Драчев – Ч.: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 85 с.
- 6 Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учебное пособие/ Ю.С. Усынин – Ч.: Изд. ЮурГУ, 2001. – 358 с.
- 7 Каталог асинхронных двигателей серии АИР. – ВЭМЗ, 2007. – 20 с.
- 8 СНиП 23 – 05 – 95. Освещение, – Москва: Энергоатомиздат, 1995 – 103 с.
- 9 ГОСТ 2.102-2013. ЕСКД. Виды и комплектность конструкторской документации. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 20 с.
- 10 ГОСТ 2.106-96. ЕСКД. Текстовые документы. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 25 с.
- 11 ГОСТ 2.109-1973. ЕСКД. Основные требования к чертежам. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 38 с.
- 12 ГОСТ 2.316-68. ЕСКД. Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований, таблиц. – М.: Изд-во стандартов, 1971. – 15 с.
- 13 ГОСТ 2.417-91. ЕСКД. Платы печатные. Правила выполнения чертежей. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 4 с.
- 14 ГОСТ 2.701-2008. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 16 с.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74



15. ГОСТ 2.702–1975. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. – М. Изд-во стандартов, 1975. – 45 с.;

16 ГОСТ 2.709–1989. ЕСКД. Правило выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники. – М. Изд-во стандартов, 1989. – 34 с.

17 ГОСТ 2.710–1981. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – М. Изд-во стандартов, 1981. – 15 с.

18 ГОСТ 2.721–1974. ЕСКД. Обозначения общего применения. – М. Изд-во стандартов, 1974. – 23 с.

19 ГОСТ 2.728–1974. ЕСКД. Резисторы. Конденсаторы. – М. Изд-во стандартов, 1974. – 38 с.

20 ГОСТ 2.729–1968. ЕСКД. Электроизмерительные приборы. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 47 с.

21 ГОСТ 2.730–1973. ЕСКД. Полупроводниковые приборы. – М. Изд-во стандартов, 1973. – 12 с.

22 ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2011. – 26 с.

23 ГОСТ 2.701-2008. Правила выполнения схем. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 16 с.

24 АО «НПО «Электромашина»: О компании [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.npoelm.ru/company/npoelectromashina/nponow/>. – (дата обращения 23.05.2018).

25 Белоус, А.И. Основы схемотехники микроэлектронных устройств: учебное пособие / А.И. Белоус, В.А. Емельянов, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2012. – 472 с.

26 Бельков, В.Н. Автоматизированное проектирование технических систем: учебное пособие / В.Н. Бельков, В.Л. Ланшаков. – М.: Акад. Естествознания, 2009. – 143 с.

27 Блог об электронике: Как рассчитать ёмкость гасящего конденсатора простого блока питания [Электронный ресурс]. Режим доступа:

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

<https://www.kirich.blog/stati/informaciya-dlya-nachinayuschih/244-kak-raschitat-emkost-gasyaschego-kondensatora-prostogo-bloka-pitaniya.html>. – (дата обращения 30.05.2018).

28 Борисов Ю.И. Динамика радиоэлектроники / Ю.И. Борисов. – М.: Техносфера, 2007. – 400 с. ISBN 978-5-94836-142-0.

29 ГОСТ 16504-81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2011. – 26 с.

30 ГОСТ 2.701-2008. Правила выполнения схем. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 16 с.

31 ГОСТ РВ 15.210-2001. Военная техника. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов. Основные положения. – М.: Госстандарт России, 2002. – 41 с.

32 ГОСТ 2. 758–1981. ЕСКД. Сигнальная техника. – М. Изд-во стандартов, 1981. – 17 с.

33 ГОСТ 2.701–2008. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М. Изд-во стандартов, 2008. – 27 с.

34. ГОСТ 2.702–1975. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. – М. Изд-во стандартов, 1975. – 45 с.;

35 ГОСТ 2.709–1989. ЕСКД. Правило выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники. – М. Изд-во стандартов, 1989. – 34 с.

36 ГОСТ 2.710–1981. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – М. Изд-во стандартов, 1981. – 15 с.

37 ГОСТ 2.721–1974. ЕСКД. Обозначения общего применения. – М. Изд-во стандартов, 1974. – 23 с.

38 ГОСТ 2.722–1968. ЕСКД. Электрические машины. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 17 с.

39 ГОСТ 2.723–1968. ЕСКД. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы, магнитные усилители. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 48 с.

40 ГОСТ 2.726–1968. Токосъемники. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 12 с.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

42 ГОСТ 2.727–1968. ЕСКД. Разрядники и предохранители. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 15 с.

42 ГОСТ 2.728–1974. ЕСКД. Резисторы. Конденсаторы. – М. Изд-во стандартов, 1974. – 38 с.

43 ГОСТ 2.729–1968. ЕСКД. Электроизмерительные приборы. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 47 с.

44 ГОСТ 2.730–1973. ЕСКД. Полупроводниковые приборы. – М. Изд-во стандартов, 1973. – 12 с.

45 ГОСТ 2.731–1981. ЕСКД. Электровакуумные приборы. – М. Изд-во стандартов, 1981. – 42 с.

46 ГОСТ 2.732–1968. ЕСКД. Источники света. – М. Изд-во стандартов, 1968. – 23 с.

					270304.2018.342.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77