

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электропривод и Автоматизация промышленных установок

«Допущен к защите»

Заведующий кафедрой д.т.н.

профессор Саитов Т.И.

(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
(подпись)

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

На тему: Примерення векторного двигателя в  
автоматизации насосной установки

Специальность 5В071800 электроэнергетика

Выполнил (а) Янтурин Е.Р. ЭАТК-12-3  
(Фамилия и инициалы) группа

Научный руководитель Алексеев С.Б. доцент  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Консультанты:

по экономической части:

Жакупов А.А. к.э.н. профессор  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« 03 » мая 2016 г.  
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Дюсбаев М.К. д.т.н. профессор  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« 25 » мая 2016 г.  
(подпись)

Нормоконтролер: Кузьмина Ю.В. ст. преподаватель  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« 05 » мая 2016 г.  
(подпись)

Рецензент: Туркинов С.Ш. директор ТОО «РАДО»  
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
(подпись)

Алматы 2016г.

Некоммерческое акционерное общество  
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Факультет Электроэнергетический  
Специальность 5В071800 Электроэнергетика  
Кафедра Электропривод и автоматизация промышленных установок

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Студент Антурик Ерболат Рахымжанович  
(фамилия, имя, отчество)

Тема проекта Применение векторного двигателя в  
автоматизации часовой установки

утверждена приказом ректора № 148 от «19» октября 2015 г.  
Срок сдачи законченной работы «27» мая 2016 г.  
Исходные данные к проекту требуемые параметры результатов  
проектирования (исследования) и исходные данные объекта

1 Синхронный двигатель серии STD - 2 РУХЛ4 мощностью  
2500 кВт с питанием от сети трехфазного тока частотой  
50 Гц, с частотой вращения 3000 об/мин, Uном 6 кВ.

Перечень подлежащих разработке дипломного проекта вопросов или  
краткое содержание дипломного проекта:

1. Особенности работы векторного двигателя на базе КПЭ с ШИМ
2. Структура силовой цепи векторного двигателя.
3. Расчет параметров векторного двигателя при пита-  
нии от КПЭ с ШИМ
4. Схема замещения при работе синхронного двигателя  
питаемого от КПЭ с ШИМ
5. Построение системы управления векторным двигателем  
на основе КПЭ с ШИМ
6. Источники элементов цепи векторного двигателя
7. Математическое описание векторного двигателя
8. Модели векторного двигателя в Matlab.

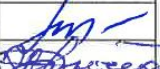

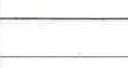
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Рисунок 1.1 - Схема внешнего двигателя (ВД) на основе КПЭ с ШИМ.
2. Рисунок 1.3 - Формирование импульсов управления турбиной КПЭ.
3. Рисунок 1.4 - Диаграмма выходных напряжений КПЭ
4. Рисунок 3.1 - Цифровая аналоговая схема системы управления
5. Рисунок 3.2 - Функциональная схема системы управления
6. Рисунок 4.2 - Структурная схема ВД
7. Рисунок 4.3 - Переходный процесс по скорости при пуске ВД
8. Рисунок 5.1 - Схема позиционирования часовой смазки
9. Рисунок 6.2 - Регулирование режима работы центробежного насоса.

#### Рекомендуемая основная литература

1. Электропривод переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. учеб. заведений / Т. Т. Соколовский. - 2-е изд., испр. - М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 272 с.
2. Алексеев С. Б., Роговский Л. А., Мукомблев И. М. Стабилизация выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты - // Электрификация, электрохимия и прикладная электротехника. - 1982 - с. 48-50.
3. Лезин Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в системах и воздухоподогревателях. М.: Энергоатомиздат, 2006. - 360 с. ил.
4. Терман-Тюкин С. Г. Компьютерное моделирование гидроприводных систем в Matlab 6.0. СПб.: Корона принт, 2001 г. - 320 с.

Консультанты по проекту с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
Экономическая часть	Макунов А. А.	08.02 - 03.05.16	
БЖД	Дюсбаев Ч. К.	02.02 - 25.05.16	
Спец часть	Алексеев С. Б.		

**Г Р А Ф И К**  
подготовки дипломного проекта

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1.	Особенности работы вентилятора двигателя на базе КПУ с ШИМ	29.01.16	<i>ДТ</i>
2.	Структура силовой схемы вентиляционного двигателя	08.02.16	<i>ДТ</i>
3.	Расчет параметров вентиляционного двигателя при питании от КПУ с ШИМ	17.02.16	<i>ДТ</i>
4.	Схема замещения при расчете работы микроконтроллера, питаемого от КПУ с ШИМ	26.02.16	<i>ДТ</i>
5.	Распространенные методы управления вентиляционным двигателем на основе КПУ с ШИМ	5.03.16	<i>ДТ</i>
6.	Испытания элементов системы вентиляционного двигателя	9.03.16	<i>ДТ</i>
7.	Математическое моделирование вентиляционного двигателя	19.03.16	<i>ДТ</i>
8.	Модель вентиляционного двигателя в Matlab.	28.03.16	<i>ДТ</i>
9.	Безопасность пид-регулятора. Общие положения.	11.04.16	<i>ДТ</i>
10.	Анализ условий протекания процессов.	20.04.16	<i>ДТ</i>
11.	Экономическая эффективность внедрения вентиляционного двигателя с ШИМ	27.04.16	<i>ДТ</i>
12.	Расчет экономической выгоды за счет внедрения системы	11.05.16	<i>ДТ</i>

Дата выдачи задания « 25 » января 2016 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель \_\_\_\_\_  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению студент \_\_\_\_\_  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

## **Аннотация**

В дипломном проекте рассматриваются вопросы разработки вентильного двигателя на базе преобразователя частоты с непосредственной связью и широтно-импульсной модуляцией, а также возможности применения подобного привода в мощных насосных установках. Обосновывается метод формирования выходного напряжения, дается определение основных параметров вентильного двигателя. На основе схемы замещения определяется коэффициент мощности, потери и КПД двигателя. Рассматривается построение системы управления вентильным двигателем на основе микропроцессорной техники. Дается экспериментальное определение параметров двигателя и моделирование системы. Также рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Экономический эффект внедрения системы ВД с ШИМ был подтвержден технико-экономическим расчетом.

## **Аңдатпа**

Тікелей байланыс, және импульстік енін модуляция, сондай-ақ қуатты сорғы бірлік осындай дискіні пайдалану мүмкіндігі бар жиілік түрлендіргіші негізінде қозғалтқыш клапаны дамуымен дипломдық жоба мәмілелер. Шығыс кернеуді генерациялау әдісі негіздейді, қозғалтқыш клапаны негізгі параметрлері анықтайды. Баламалы схемалары негізінде электр факторы, және қозғалтқыш тиімділігін жоғалту анықталады. микропроцессорлық техника негізінде безщеточный бақылау жүйесінің құрылысы. Біз эксперименттік қозғалтқыштың параметрлерін анықтау, және жүйелік модельдеу береді. Еңбекті қорғау және қауіпсіздік, сондай-ақ қаралады. ИМЕ бар КҚ жүйесін орнына дроссель реттеу әдісін енгізу экономикалық тиімділігі, техникалық-экономикалық есептеуді расталды.

## **Annotation**

The diploma project deals with the development of the engine valve on the basis of the frequency converter with a direct connection, and pulse-width modulation, as well as the possibility of using such a drive in a powerful pumping units. Substantiates the method of generating an output voltage, defines the basic parameters of the engine valve. On the basis of the equivalent circuit is determined by the power factor, and the loss of engine efficiency. The construction of a brushless motor control system based on microprocessor technology. We give experimental determination of the parameters of the engine, and system modeling. labor protection and safety are also considered. The economic effect of the introduction of the HP system with PWM instead of the method of adjusting the throttle has been confirmed the technical and economic calculation.

## Содержание

Введение.....	16
1 Особенности работы вентильного двигателя на базе НПЧ с ШИМ.....	18
1.1 Структура силовых схем вентильного двигателя.....	18
1.2 Формирование выходного напряжения НПЧ с ШИМ.....	22
2 Расчет параметров вентильного двигателя при питании от НПЧ с ШИМ ....	27
2.1 Схемы замещения при расчете работы синхронного двигателя, питаемого от НПЧ с ШИМ.....	27
2.2 Расчет коэффициента мощности синхронного двигателя, питаемого от НПЧ с ШИМ.....	32
2.3 Влияние высших гармонических НПЧ на потери и КПД синхронного двигателя.....	35
2.4 Определение частоты переключений тиристорov НПЧ.....	42
3 Построение системы управления вентильным двигателем на основе НПЧ с ШИМ.....	44
3.1 Цифро-аналоговая система управления.....	44
3.2 Микропроцессорная система управления.....	48
3.3 Испытания элементов системы вентильного двигателя.....	49
4 Математическое моделирование вентильного двигателя.....	53
4.1 Математическое описание ВД.....	53
4.2 Модель ВД в MATLAB.....	54
5 Безопасность жизнедеятельности.....	57
Общие положения.....	57
5.1 Анализ условий труда сотрудников.....	57
5.2 Расчет микроклимата воздухообмена в насосной станции.....	61
5.3 Расчет виброизоляции насосной станции.....	64
6 Экономическая эффективность внедрения вентильного двигателя с ШИМ.....	68
6.1 Достоинства применения ВД с ШИМ.....	68
6.2 Энергосбережение, достигаемое при использовании частотно-регулируемых электроприводов.....	69
6.3 Расчет капитальных вложений ВД с ШИМ.....	71
6.4 Расчет текущих годовых эксплуатационных издержек.....	72
6.5 Расчет экономической выгоды за счет внедрения системы.....	75
Заключение.....	77
Список литературы.....	78
Приложение А.....	81



## Введение

Постоянное повышение требований к качеству выпускаемой продукции, росту производительности машин и оборудования, а также необходимость экономии энергии определяют растущие требования к эксплуатационным и технико-экономическим показателям электропривода.

С развитием полупроводниковой и преобразовательной техники современный автоматизированный электропривод приобрел новые качества и возможности, использование которых позволяет в полной мере обеспечить потребности высокоразвитого производства.

В последние годы большое внимание уделяется регулируемым электроприводам переменного тока, имеющим в своей основе более простые, дешевые и надежные машины переменного тока.

Наиболее эффективным методом регулирования скорости асинхронных и синхронных электродвигателей является частотное управление.

Асинхронный двигатель, питаемый от преобразователя частоты (ПЧ), может обеспечить высокое качество статических и динамических характеристик, иметь диапазон регулирования скорости и вращающий момент, близкие к тем, которые имеет двигатель постоянного тока при регулировании напряжения на якоре. В то же время реализация такого электропривода связана со сложностью измерения и преобразования координат асинхронного двигателя, что приводит к усложнению системы управления.

Одним из перспективных направлений в создании регулируемых электроприводов переменного тока является вентильный двигатель.

Вентильный двигатель (ВД) представляет собой систему, состоящую из синхронного электродвигателя, статического преобразователя и датчика положения ротора, определяющего моменты коммутации вентилей преобразователя в зависимости от положения ротора в пространстве. По сути, это машина постоянного тока, где механический коллектор заменен статическим преобразователем. В таком электроприводе полностью сохраняются все достоинства машины постоянного тока, и отсутствуют недостатки, обусловленные наличием коллектора и щеток.

ВД имеют линейные механические характеристики, экономично и просто регулируются. При одновременном регулировании напряжения переменного тока и тока возбуждения СД, можно обеспечить работу электропривода с  $\cos\varphi = 1$ .

Структура схем вентильного двигателя достаточно разнообразна и определяется в каждом случае конкретными технико-экономическими требованиями, предъявляемыми к электроприводе.

Преобразователи в системе ВД могут работать в режиме источника тока или источника напряжения с естественной или принудительной коммутацией, обеспечивая при этом непосредственную связь с питающей сетью или через звено постоянного тока.

Преобразователи, работающие в режиме источника тока, формируют на выходе кривую тока, при этом кривая напряжения у них близка к синусоидальной, а фазовый сдвиг основной гармоники тока машины относительно основной гармоники напряжения зависит от внутренних сопротивлений машины и ее нагрузки. В случае, когда преобразователь работает в режиме источника напряжения на выходе формируется кривая напряжения, а форма тока близка к синусоидальной.

В каждом из указанных случаев в преобразователе происходит двукратное преобразование энергии – выпрямление, а затем инвертирование, что приводит к дополнительным потерям.

Наиболее полно реализовать все преимущества вентильных двигателей, добиться улучшения совместимости с питающей сетью позволяют преобразователи с непосредственной связью и широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) по синусоидальному закону. Применение системы ВД-ПЧНС с ШИМ позволяет существенно расширить диапазон плавного и экономичного регулирования скорости, обеспечить высокую перегрузочную способность, повысить энергетические показатели.

Во многих случаях насосные установки оснащены мощными синхронными электродвигателями, а приводимые ими насосы регулируются методом дросселирования. Применение в данном случае вентильного двигателя на основе ПЧНС с ШИМ для регулирования частоты вращения насоса более выгодно по сравнению с системой ПЧ-АД. Поэтому темой моего проекта является разработка основных вопросов построения такой системы.

# 1 Особенности работы вентильного двигателя на базе НПЧ с ШИМ

## 1.1 Структура силовых схем вентильного двигателя

Очень часто для привода центробежных механизмов большой мощности применяют синхронные электродвигатели – это насосы, вентиляторы, компрессоры. При этом в большинстве случаев при переходе на регулирование производительности механизма частотой вращения, здесь наиболее выгодной, по сравнению с ЧРП становится вентильный двигатель, который имеет более простую систему управления и характеристики превосходящие ЧРП. В дипломном проекте разрабатываются вопросы применения преобразователя частоты с непосредственной связью в силовой схеме вентильного двигателя сетевых насосов ТЭЦ.

ВД представляет собой систему, обычно состоящую из синхронного электродвигателя (СД), статического преобразователя частоты и датчика положения ротора (ДПР), определяющего моменты коммутации вентилей преобразователя в зависимости от положения ротора в пространстве. По сути, это машина постоянного тока, где механический коллектор заменен статическим преобразователем. В таком электроприводе полностью сохраняются все достоинства машины постоянного тока, и отсутствуют недостатки, обусловленные наличием коллектора и щеток (рисунок 1.1).

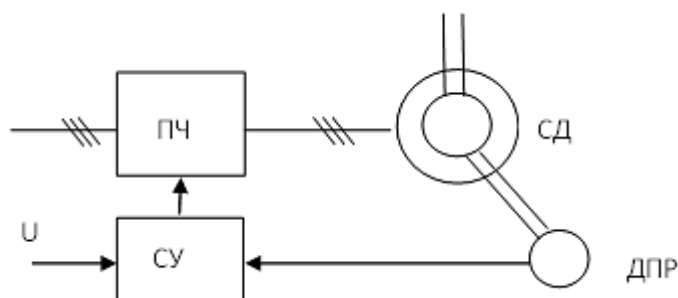


Рисунок 1.1 – Система ВД с ШИМ

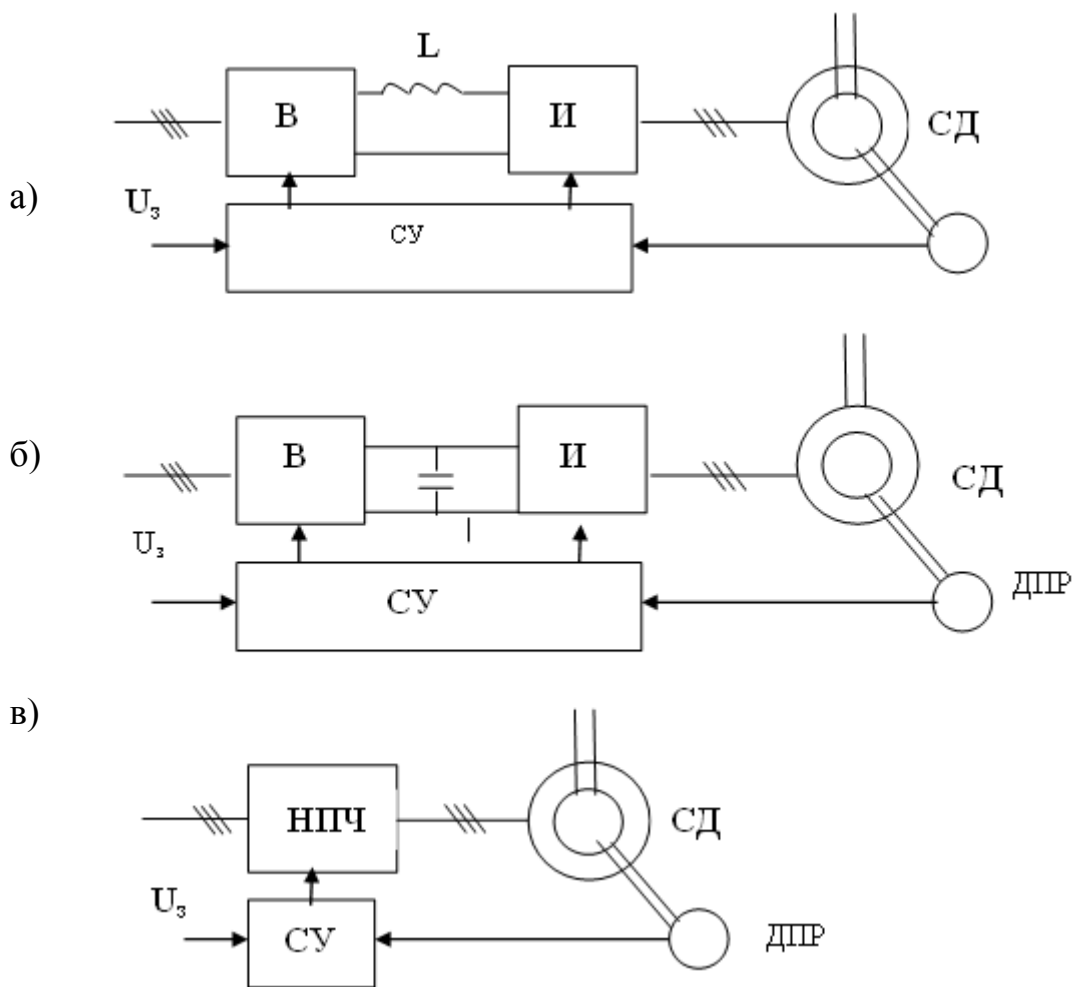
ВД имеют линейные механические характеристики экономично и просто регулируются. При одновременном регулировании напряжения переменного тока и тока возбуждения СД, можно обеспечить такие свойства привода, которые не присущи асинхронному электроприводу с частотным управлением, а именно: независимость частоты вращения от момента нагрузки, высокую точность синхронно управляемых приводов, большое значение момента на ползучих скоростях.

Структура схем вентильного двигателя достаточно разнообразна [5,34] и определяется в каждом случае конкретными техническими требованиями, предъявляемыми к электроприводу. [8,9]

Преобразователи в системе ВД могут работать в режиме источника тока или источника напряжения с естественной или принудительной коммутацией,

обеспечивая при этом связь с питающей сетью через звено постоянного тока (рисунки 1.2а, и 1.2б) или через непосредственный преобразователь частоты НПЧ (рисунок 1.2 в).

Преобразователи, работающие в режиме источника тока (рисунок 1.2 а), формируют на выходе кривую тока, кривая напряжения у них близка к синусоидальной, а фазовый сдвиг основной гармоники тока машины относительно основной гармоники напряжения зависит от внутренних сопротивлений машины и ее нагрузки [3,4]. В случае, когда преобразователь работает в режиме источника напряжения (рисунок 1.2б) на выходе формируется кривая напряжения, а форма тока близка к синусоидальной.



а) на основе инвертора тока; б) на основе инвертора напряжения; в) на основе НПЧ

Рисунок 1.2 – Структура схем вентильного двигателя

Выпрямитель в этих схемах может быть, как управляемый, так и неуправляемый. Во втором случае регулирование напряжения на двигателе осуществляется самим инвертором с помощью методов широтно-импульсного

регулирования (ШИР) или широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Преобразователи с естественной коммутацией имеют более простую силовую схему на SCR тиристорах, по сравнению с преобразователями с принудительной коммутацией, выполненных, как правило, на запираемых IGCT тиристорах или IGBT транзисторах. Естественная коммутация может обеспечиваться за счет реактивной мощности питающей сети, самой машины или комбинировано. Применение того или иного типа преобразователя определяет основные свойства вентильного двигателя, его достоинства и недостатки.

Недостатками ВД, выполненных по схеме выпрямитель – инвертор с естественной машинной коммутацией, являются: сложность запуска, недостаточная перегрузочная способность, пульсации электромагнитного момента, отсутствие возможности работы на пониженных скоростях. Повышение коммутационной устойчивости в этом случае требует повышения установленной мощности двигателя, а запуск осуществляется с помощью специальных схем. Возможен асинхронный пуск СД от сети до скорости, составляющей 10-15% синхронной, затем СД подключается к инвертору и переходит в режим вентильного двигателя.

Одним из основных достоинств НПЧ является меньшее число элементов в силовых схемах и однократное преобразование энергии. При одном и том же числе фаз на входе и выходе и одинаковой выходной частоте в этих преобразователях скважность импульсов тока, проходящих через каждый вентиль, в 3 раза больше, чем у автономного инвертора, что позволяет применить вентили меньшей мощности.

В то же время ряд наилучших свойств и характеристик ВД: коэффициент мощности, перегрузочная способность, гармонический состав выходного напряжения, плавность вращения, влияние на питающую сеть, можно получить, если применить для управления преобразователем методы ШИР или ШИМ.

Импульсные способы регулирования выходного напряжения позволяют устранить недостатки фазного регулирования в преобразователях по схеме выпрямитель – инвертор, обеспечить коэффициент мощности преобразователя близкий к единице во всем диапазоне регулирования. Однако в такой схеме происходит двойное преобразование энергии, что снижает КПД системы.

Наиболее полно реализовать все преимущества вентильных двигателей, позволяют преобразователи с непосредственной связью и принудительной коммутацией вентилях по определенному закону. Применение системы ВД НПЧ с ШИМ (рисунок 1.1) позволяет существенно расширить диапазон плавного и экономичного регулирования скорости, обеспечить высокую перегрузочную способность, повысить энергетические показатели за счет однократного преобразования энергии. Кроме того, ШИМ позволяет улучшить и гармонический состав выходного напряжения. Широтно-импульсная модуляция позволяет получить очень низкие частоты при малом содержании высших гармонических моментов и обеспечить равномерное

вращение машины. Преобразователи частоты, построенные на принципе ШИМ, имеют коэффициент мощности близкий к единице на всем диапазоне регулирования, в меньшей степени искажают напряжение питающей сети, позволяет уменьшить уровень радиопомех. [6,7,9]

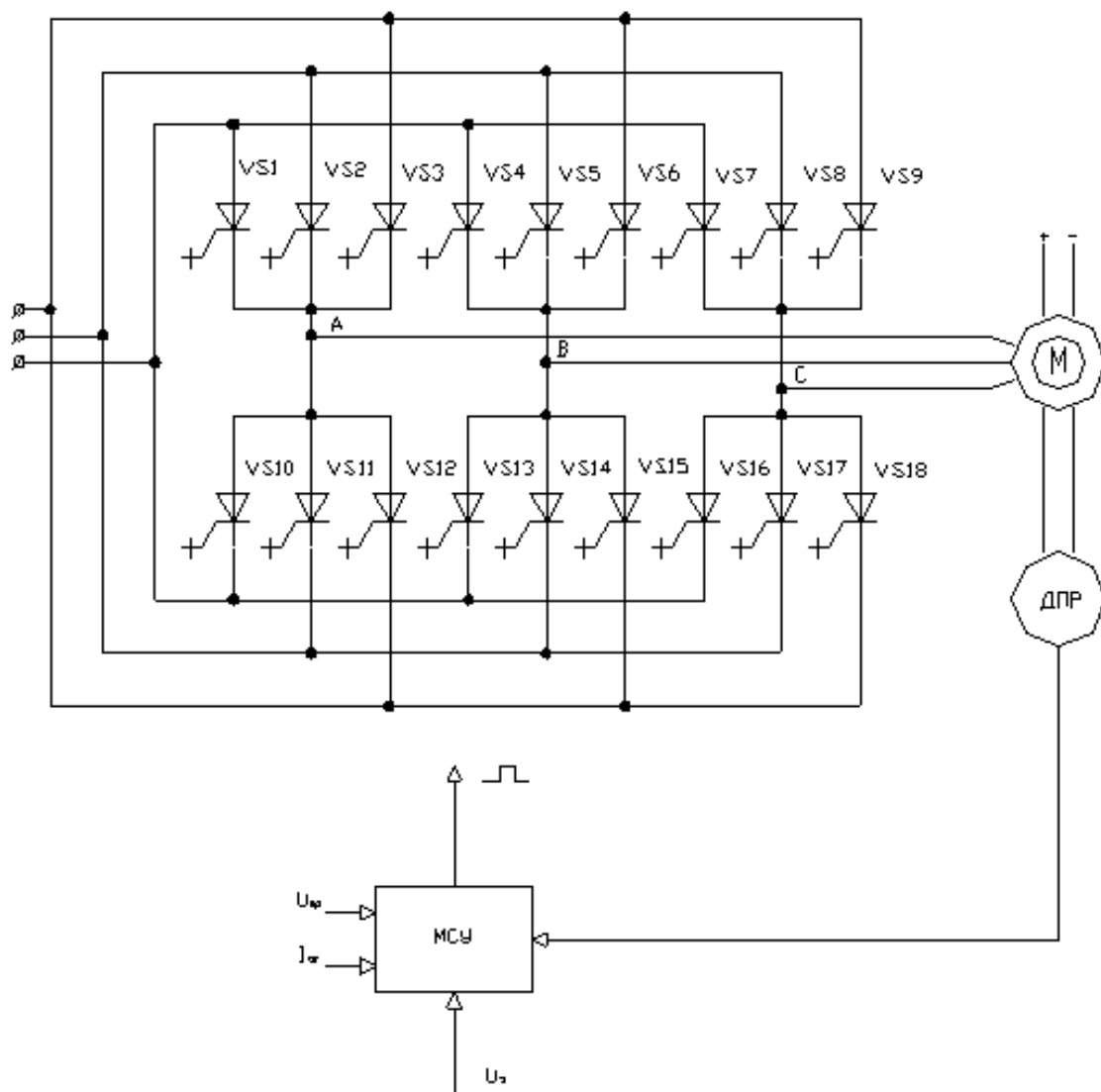


Рисунок 1.1 – Схема ВД на основе НПЧ с ШИМ

Преобразователи с естественной коммутацией имеют более простую силовую схему на SCR тиристорах, по сравнению с преобразователями с принудительной коммутацией, выполненных, как правило, на запираемых IGCT тиристорах или IGBT транзисторах. Естественная коммутация может обеспечиваться за счет реактивной мощности питающей сети, самой машины или комбинировано. Применение того или иного типа преобразователя определяет основные свойства вентильного двигателя, его достоинства и недостатки.

## 1.2 Формирование выходного напряжения ПЧ с ШИМ

Для получения высоких технических характеристик [3,5] в широком диапазоне регулирования и обеспечения равномерного движения ротора ВД в области низких скоростей при регулировании, необходимо обеспечить синусоидальность напряжения, подаваемого на двигатель, что возможно при использовании ПЧ с ШИМ. Преобразователь частоты с ШИМ выполняет одновременно две функции регулирование частоты и величины напряжения, при этом в ВД модулирующее напряжение синхронизируется с положением ротора в пространстве по сигналам датчика положения ротора ДПР или вырабатывается самим ДПР. Модуляция производится таким образом, чтобы наибольшую величину имела первая гармоника, а содержание высших гармоник и субгармоник в напряжении двигателя было минимальным, так как их наличие может вызвать колебания скорости и момента, а также дополнительные потери. [32]

Основным фактором, влияющим на гармонический состав напряжения и потери в ПЧ и двигателе, является закон модуляции, применяемый в системе управления преобразователем. С увеличением несущей частоты преобразователя с ШИМ возрастает число коммутаций силовых тиристоров за период основной частоты и улучшается форма выходного напряжения. Однако число коммутаций в течение периода не может возрастать беспредельно, так как будут увеличиваться потери в преобразователе и снижаться к.п.д. Ограничения на число коммутаций накладывается и в связи с тем, что для надежного запирающего полупроводникового ключа необходимо время, в течение которого восстанавливаются его запирающие свойства.

Важным показателем, определяющим качество выходного напряжения и к.п.д. является отношение несущей частоты  $f_r$  к частоте модулирующего напряжения  $f_m$ . При регулировании скорости двигателя вниз это отношение возрастает, а с повышением скорости снижается. В связи, с чем ухудшается гармонический состав выходного напряжения. Увеличение высших гармоник в зоне высоких скоростей не приводит к существенным нарушениям работы двигателя, в то время как в области низких скоростей они вызывают пульсации момента и нарушение равномерности вращения ротора.

За счет несогласованности по фазе модулирующего напряжения и напряжения несущей частоты, при повышении выходной частоты появляются заметные биения в токе, моменте и скорости двигателя, являющиеся проявлением субгармоник. Оптимальным способом регулирования является поочередное использование методов модуляции в процессе перехода от области низких выходных частот преобразователя к области высоких частот. Одним из важных критериев качества работы преобразователя является использование напряжения при различных способах модуляции. Амплитуда основной гармоники выходного напряжения увеличивается при снижении частоты переключений, что объясняется наличием интервалов времени на включение и выключение полупроводникового прибора. Поэтому при

увеличении частоты основной гармоники необходимо снижать кратность отношения несущей и модулирующей частот.

Таким образом, для того чтобы обеспечить удовлетворительную работу привода в широком диапазоне регулирования скорости с минимальными потерями, необходимо изменять закон модуляции при переходе от низких выходных частот к более высоким. Напряжение ПЧНС с ШИМ формируется из положительных  $U_p$  и отрицательных  $U_n$  напряжений, представляющих огибающие системы трехфазного входного напряжения в виде двухполярных импульсов, амплитуда которых ограничивается этими огибающими. Если в течении периода ширина этих импульсов будет изменяться согласно синусоидальному закону, то и среднее за период несущей частоты значение выходного напряжения будет изменяться по синусоидальному закону.

Если принять длительность положительного импульса –  $\Delta t_p$ , а длительность отрицательного импульса –  $\Delta t_n$ , то закон модуляции запишется в следующем виде:

$$\frac{\Delta t_p U_p - \Delta t_n U_n}{\tau} = \delta U_m \sin \alpha \quad (1.5)$$

где  $\tau$  – период несущей частоты;

$\delta$  – коэффициент глубины модуляции;

$\alpha$  – угол между осью фазы и базовым результирующим вектором, с частотой вращения которого синхронизируется инвертор.

В пределах каждого периода несущей частоты:

$$\tau = \Delta t_p + \Delta t_n . \quad (1.6)$$

Обозначим кратность отношения несущей частоты к частоте модуляции – индекс модуляции:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{f}{F} , \\ \tau &= \frac{T}{\varepsilon} . \end{aligned} \quad (1.7)$$

Запишем напряжения  $U_p$  и  $U_n$  в виде разложений в ряд Фурье:

Таким образом, для того чтобы обеспечить удовлетворительную работу привода в широком диапазоне регулирования скорости с минимальными потерями, необходимо изменять закон модуляции.



$$U_p = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos 3k\omega t}{9k^2 - 1} (-1)^{k+1} \right), \quad (1.8)$$

$$U_n = -\frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos 3k\omega t}{9k^2 - 1} (-1)^{k+1} \right),$$

где  $k=1,2,3,\dots$ ;

$\omega$  – угловая частота входного напряжения.

Учитывая, что  $k^2$  находится в знаменателе, ограничимся двумя первичными членами разложения:

$$U_p = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m \left( \frac{1}{2} + \frac{\cos 3\omega t}{8} \right), \quad (1.9)$$

$$U_n = -\frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m \left( \frac{1}{2} - \frac{\cos 3\omega t}{8} \right).$$

подставим (1.9) в (1.5) и учитывая (1.7) получим:

$$\frac{\varepsilon \Delta t_p 3\sqrt{3}}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\cos 3\omega t}{8} \right) - \frac{\varepsilon \Delta t_p 3\sqrt{3}}{\pi} \left( \frac{1}{2} - \frac{\cos 3\omega t}{8} \right) = \delta \sin \alpha. \quad (1.10)$$

Произведя соответствующие преобразования в (1.9), получим выражения закона модуляции для каждой фазы преобразователя:

$$\frac{\Delta t_{pA} - \Delta t_{oA}}{T} \varepsilon = \frac{2\pi\delta \sin \alpha}{3\sqrt{3}} - \frac{\cos 3\omega t}{4},$$

$$\frac{\Delta t_{pB} - \Delta t_{oB}}{T} \varepsilon = \frac{2\pi\delta \sin \left( \alpha - \frac{2\pi}{3} \right)}{3\sqrt{3}} - \frac{\cos 3\omega t}{4}, \quad (1.11)$$

$$\frac{\Delta t_{pC} - \Delta t_{oC}}{T} \varepsilon = \frac{2\pi\delta \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right)}{3\sqrt{3}} - \frac{\cos 3\omega t}{4}.$$

Переключающие возможности ключей накладывают ограничения на максимально возможное время открытого состояния в течение периода

несущий частоты  $-\Delta t_{max}$  и минимально возможное время открытого состояния  $-\Delta t_{min}$ . Поэтому, целью с улучшения использования напряжения в ПЧ с ШИМ, необходимо применять ключи с наименьшим временем восстановления запирающих свойств. Для исключения возможностей коротких замыканий импульс управления на входящей в работу ключ подается с некоторой задержкой, необходимой для восстановления запирающих свойств предыдущего. Следовательно, минимально возможное время работы ключа в течение периода несущей частоты определится как

$$\Delta t_{min} = t_3 + t_k + t_B, \quad (1.12)$$

где  $t_3$  – время задержки;

$t_k$  – продолжительность коммутационного интервала;

$t_B$  – время восстановления ключа.

Максимально возможное время включенного состояния ключа

$$\Delta t_{max} = \tau - (t_3 + t_k + t_B) \quad (1.13)$$

Подставив полученные выражения в (1.11), можно определить в каких пределах будет изменяться значение коэффициента глубины модуляции, при заданных параметрах полупроводникового ключа и величины  $\varepsilon$ .

В результате определено что, с целью улучшения использования напряжения при регулировании частоты вращения ВД в широком диапазоне целесообразно изменять кратность отношения частот  $\varepsilon$ . В то же время величина  $\varepsilon$  должна иметь всегда максимально возможное значение, что обеспечивает наилучший гармонический состав выходного напряжения. Однако необходимо учитывать и то обстоятельство, что с увеличением частоты коммутаций возрастают потери в преобразователе частоты.

На низких частотах вращения от 10 до 0 Гц коэффициент  $\delta$  изменяется в пределах от 0,78 до 0,98 и величина  $\varepsilon$  незначительно влияет на использование напряжения источника питания. Поэтому в этом случае  $\varepsilon$  выбирается из условия обеспечения минимальных потерь в ПЧ при коммутациях, но достаточно высоким чтобы обеспечить минимальное содержание высших гармоник, которые вызывают пульсации момента и нарушение плавности вращения двигателя. С увеличением модулирующей частоты и постоянной кратности отношения частот  $\varepsilon$ , уменьшается коэффициент модуляции  $\delta$  и ухудшается использование напряжения, в тоже время при переходе к пониженным частотам величина  $\varepsilon$  не оказывает значительного влияния на коэффициент  $\delta$ , а при постоянной частоте  $F$  коэффициент  $\delta$  возрастает с увеличением кратности  $\varepsilon$ , что приводит к улучшению использования напряжения. На рисунках 1.3 показан предложенный принцип формирования управляющих сигналов на тиристоры НПЧ в системе управления, а на

рисунке 1.4 осциллограммы выходного напряжения преобразователя.

Таким образом, для того чтобы обеспечить удовлетворительную работу привода в широком диапазоне регулирования скорости с минимальными потерями, необходимо изменять закон модуляции при переходе от низких выходных частот к более высоким. Напряжение ПЧНС с ШИМ формируется из положительных  $U_p$  и отрицательных  $U_n$  напряжений, представляющих огибающие системы трехфазного входного напряжения в виде двухполярных импульсов, амплитуда которых ограничивается этими огибающими.

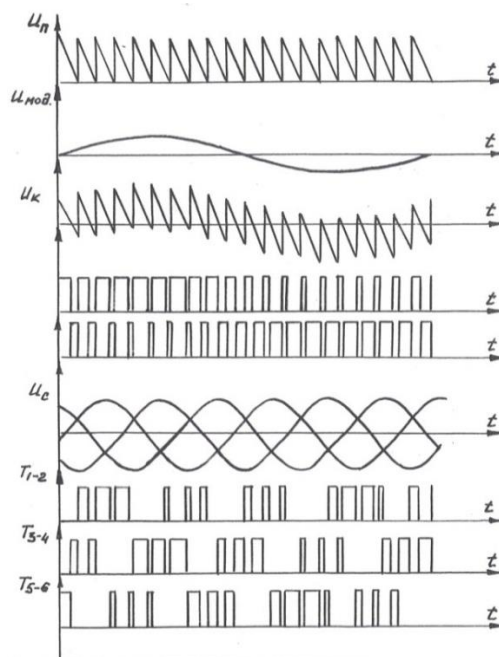


Рисунок 1.3 – Формирование импульсов управления тиристорами НПЧ

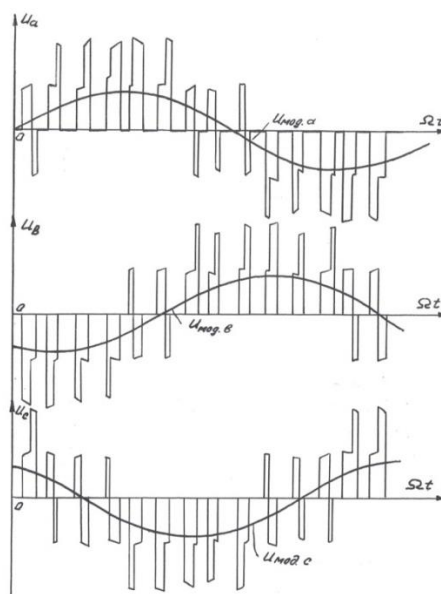


Рисунок 1.4 – Диаграмма выходных напряжений НПЧ

## **2 Расчет параметров вентильного двигателя при питании от НПЧ с ШИМ**

### **2.1 Схемы замещения при расчете работы синхронного двигателя, питаемого от НПЧ с ШИМ**

Условия работы синхронного двигателя (СД) при его совместной работе с НПЧ с искусственной коммутацией, выходное напряжение которого характеризуется содержанием высших гармоник, могут значительно отличаться от условий работы двигателя с источником синусоидального напряжения. В связи с этим необходимо исследование влияния несинусоидальности приложенного напряжения на характеристики синхронного двигателя.

В настоящее время известны многочисленные работы, посвященные исследованию синхронных генераторов при несинусоидальных токах [14,15]. Значительно меньше исследовано влияние несинусоидального напряжения при частотном управлении на работу СД, особенно явнополюсного. В работе [13] исследуется СД при неизменной частоте питающего несинусоидального напряжения. В [2] проводится анализ работы неявнополюсного двигателя при питании от НПЧ с естественной коммутацией. Однако, определение особенностей работы явнополюсных СД от непосредственного преобразователя частоты с широтно-импульсным методом формирования напряжения до настоящего времени не проводилось.

В данной главе исследуется влияние несинусоидальности выходного напряжения НПЧ на такие основные показатели работы СД как коэффициент мощности, потери и КПД. Учитывая, что при изменении частоты модулирующего напряжения и частоты, с которой происходит переключение силовых тиристоров, спектральный состав напряжения изменяется. Определяются количественные зависимости основных показателей СД от частоты подводимого к двигателю напряжения, а также от несущей частоты.

При анализе работы СД, питаемого от источника несинусоидального напряжения, его можно рассматривать как группу эквивалентных машин, у которых обмотки статора подключены соответственно к основной и высшим временным гармоникам напряжения.

Для основной гармоники эквивалентная машина будет являться синхронной с параметрами реального СД с учетом частоты основной гармоники. Для высших гармонических эквивалентные машины будут асинхронными с параметрами, соответствующими высшим гармоническим.

Так как все эквивалентные машины связаны общим валом, то характеристики реального СД будут определяться суммарным воздействием всех эквивалентных машин.

Во второй части проведен гармонический анализ выходного напряжения НПЧ с искусственной коммутацией. Из разложений видно, что при соединении обмоток двигателя в звезду без нулевого провода, порядок

гармонических может быть равен любому целому числу не кратному трем ( $v=2,4,5,7,\dots$ ). Уравнения определяют гармоники прямой последовательности, создающие поля вращения, попутные полю от основной гармоники, и уравнения гармоники обратной последовательности с полями вращения, направленными против вращения основного поля двигателя.

Скольжение ротора эквивалентных асинхронных двигателей относительно этих полей будет определяться уравнением:

$$S_v = \frac{m_{cf} \pm n_{cf}}{m_{cf}} = 1 \pm \frac{1}{v}, \quad (2.1)$$

где  $n_{cf}$  – скорость вращения синхронного двигателя от основной гармоники напряжения;

$n_{cf}$  – скорость вращения поля, вызванного высшей гармоникой напряжения.

Для прямо вращающихся полей:

$$S_v = 1 - \frac{1}{v}. \quad (2.2)$$

Для обратно вращающихся полей:

$$S_v = 1 + \frac{1}{v}. \quad (2.3)$$

Рассмотрим действие системы высших гармонических напряжений прямой последовательности, считая, что к статору эквивалентного асинхронного двигателя (ЭАД) подводится симметричная система напряжений, образующая вращающееся поле со скольжением, определяемым уравнением (3.2) относительно синхронного поля, вызванного основной гармоникой напряжения.

Уравнения для ЭАД могут быть составлены с помощью методов, изложенных в [2], для исследования трехфазных АД с несимметричным сопротивлением во вторичной цепи.

Симметричная система высших гармонических напряжения прямой последовательности прикладывается к симметричному статору ЭАД, по которому будет протекать симметричная система токов прямой последовательности с частотой высших гармонических приложенного напряжения  $f_{1v}$ . Эти токи образуют вращающееся поле  $\Phi'_{sv}$ , которое индуцирует в обмотках ротора симметричную систему э.д.с. с частотой:

Для основной гармоники эквивалентная машина будет являться синхронной с параметрами реального СД с учетом частоты основной гармоники. Для высших гармонических эквивалентные машины будут асинхронными с параметрами, соответствующими высшим гармоническим.

$$f_{2v} = f_{1v} \cdot S_v. \quad (2.4)$$

Вследствие несимметрии ротора в его цепях будет протекать несимметричная система токов с частотой  $f_{2v}$ , которая может быть разложена на системы симметричных составляющих прямой и обратной последовательности. Система токов прямой последовательности создает поле  $\Phi_{rv}'$ , вращающееся в сторону вращения ротора со скоростями  $vn_{cf}S_v$  относительно ротора и  $vn_{cf}$  относительно статора. Поля  $\Phi_{sv}'$  и  $\Phi_{rv}'$  вращаются синхронно и могут быть просуммированы.

Симметричная система токов ротора обратной последовательности создают поле  $\Phi_{rv}''$ , вращающееся в сторону, противоположную вращению ротора со скоростями  $vn_{cf}S_v$  относительно ротора и  $vn_{cf}(1-2S_v)$  относительно статора.

При  $S_v < 0,5$  поле  $\Phi_{rv}''$  вращается по направлению вращения поля  $\Phi_{sv}'$ , образованного  $v$ -ой гармонической приложенного напряжения и индуцирует в цепях статора ЭДС с частотой:

$$f_3 = (1 - 2 \cdot S_v) \cdot f_{1v}. \quad (2.5)$$

При  $S_v = 0,5$  поле  $\Phi_{rv}''$  неподвижно относительно статора и не индуцирует в нем э.д.с.

При  $S_v > 0,5$  поле  $\Phi_{rv}''$  вращается против вращения поля  $\Phi_{sv}'$  индуцирует в статоре э.д.с. с частотой:

$$f_3 = (2 \cdot S_v - 1) \cdot f_{1v}. \quad (2.6)$$

Так как статор ЭАД симметричен, то поле  $\Phi_{rv}''$  индуцирует в нем симметричную систему токов, которая создает поле  $\Phi_{sv}''$ , вращающееся со скоростью  $vn_{cf}(1-2S_v)$  относительно статора, синхронно с полем  $\Phi_{rv}'$ , поэтому эти поля могут быть суммированы.

В рассматриваемой системе скорость ротора каждого эквивалентного асинхронного двигателя определяется скоростью вращения синхронного двигателя, поэтому ротор ЭАД можно считать первичной системой, относительно которой как бы вращается статор. При  $0 < S_v < 0,5$  имеет место генераторный режим работы эквивалентных двигателей, а при  $0,5 < S_v < 1$  – двигательный режим.

Для исследования трехфазных АД с несимметричным сопротивлением.

Аналогичным путем рассмотрим действие системы высших гармонических подводимого к статору ЭАД напряжения обратной последовательности, вращающейся со скольжением:

$$S_v = 1 + \frac{1}{v}. \quad (2.7)$$

Результатом действия такой системы в статоре будет вращающееся поле  $\Phi_{1Sv}$ , а в роторе - несимметричная система токов, которую можно разложить на две системы симметричных составляющих. Эти системы создают вращающиеся поля  $\Phi_{1rv}$  и  $\Phi_{2rv}$ .

Поле  $\Phi_{2rv}$  вращается со скоростью  $v n_{cf}$  относительно статора, поэтому может быть просуммировано с полем  $\Phi_{1rv}$ . Поле  $\Phi_{1rv}$  вращается со скоростью  $v n_{cf} (2S_v - 1)$  относительно статора. При  $S_v < 0,5$  поле  $\Phi_{1rv}$  вращается по направлению вращения поля  $\Phi_{1Sv}$  и индуцирует в цепях статора э.д.с. с частотой:

$$f_3 = (1 - 2 \cdot S_v) \cdot f_1. \quad (2.8)$$

При  $S_v > 0,5$  поле  $\Phi_{1rv}$  вращается попутно ротору и индуцирует в цепях статора э.д.с. с частотой:

$$f_3 = (2 \cdot S_v - 1) \cdot f_1. \quad (2.9)$$

При  $S_v = 0,5$  поле  $\Phi_{1rv}$  неподвижно относительно статора и не индуцирует в нем э.д.с.

Так как статор симметричен, то поле  $\Phi_{1rv}$  индуцирует в нем систему токов, которая создает поле  $\Phi_{2Sv}$ , вращающееся со скоростью  $v n_{cf} (2S_v - 1)$  относительно статора. Поэтому поля  $\Phi_{1rv}$  и  $\Phi_{2Sv}$  вращаются синхронно и могут быть учтены совместно.

При скольжении  $0 < S < 0,5$  эквивалентные асинхронные двигатели работают в двигательном режиме, и при  $0,5 < S < 1$  - в генераторном.

Условия работы синхронного двигателя (СД) при его совместной работе с НПЧ с искусственной коммутацией, выходное напряжение которого характеризуется содержанием высших гармоник, могут значительно отличаться от условий работы двигателя с источником синусоидального напряжения. В связи с этим необходимо исследование влияния несинусоидальности приложенного напряжения на характеристики синхронного двигателя.

Определяются количественные зависимости основных показателей СД от частоты подводимого к двигателю напряжения, а также от несущей частоты.

Уравнения для эквивалентных асинхронных двигателей могут быть составлены, исходя из теории двух реакций, с учетом различия магнитных сопротивлений по продольной и поперечной осям. Каждый ЭАД может быть представлен схемой замещения, используемой для анализа асинхронного пуска синхронного двигателя в соответствии с рисунком 2.1.

Вследствие несимметрии ротора в его цепях будет протекать несимметричная система токов с частотой  $f_{2v}$ , которая может быть разложена на системы симметричных составляющих прямой и обратной последовательности. Система токов прямой последовательности создает поле  $\Phi_{rv}$ , вращающееся в сторону вращения ротора со скоростями  $v_{ncf}S_v$  относительно ротора и  $v_{ncf}$  относительно статора. Поля  $\Phi_{sv}'$  и  $\Phi_{rv}'$  вращаются синхронно и могут быть просуммированы.

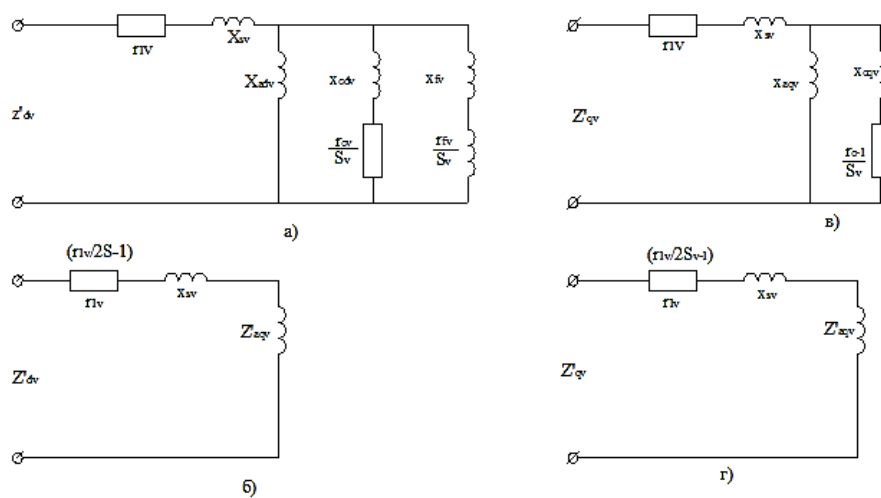


Рисунок 2.1 – Схемы замещения синхронного электродвигателя

Параметры схемы замещения имеют следующие обозначения:

$r_{1v}$  – активное сопротивление обмотки статора синхронного двигателя;  
сопротивление обмотки статора синхронного двигателя;

$X_{adv}$  – индуктивное сопротивление намагничивающего контура по продольной оси;

$X_{aqv}$  – то же по поперечной оси;

$X_{cdv}$  – индуктивное сопротивление рассеивания демпферной обмотки по продольной оси;

$X_{cqv}$  – то же по поперечной оси;

$r_{cv}$  – активное сопротивление демпферной обмотки;

$X_{fv}$  – индуктивное сопротивление цепи возбуждения;

$r_{fv}$  – активное сопротивление цепи возбуждения.

Анализ работы СД проводится при следующих допущениях:

1. Не учитывается влияние пространственных гармоник;
2. Активные сопротивления изменяются пропорционально  $\sqrt{f}$  ;



3. Не учитывается влияние гармоник, вызванных несимметрией ротора синхронного двигателя. Величина таких гармоник пропорциональна дроби:

$$\frac{x_q'' - x_d''}{x_q'' + x_d''}, \quad (2.10)$$

где  $x_d''$  и  $x_q''$  - сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям. Так как у трехфазного СД отношение  $\frac{x_d''}{x_q''} = 0,8 \div 1,5$ , то величина дроби колеблется в пределах 0,1 - 0,2.

Поэтому влияние гармоник, вызванных несимметрией ротора, незначительно;

Рассматриваются установившиеся режимы работы синхронного двигателя.

Следует отметить, что при питании синхронного двигателя от НПЧ с искусственной коммутацией кривая выходного напряжения с изменением нагрузки не искажается, так как в отличие от преобразователя с естественной коммутацией управляемыми являются не только момент включения, но и момент выключения силовых тиристоров.

Так как рассматриваемый преобразователь относится к классу инверторов напряжения, т.е. преобразователей с известной формой выходного напряжения, то в основу определения особенностей совместной работы синхронного двигателя с непосредственным преобразователем частоты положены известные соотношения между величинами  $v$ - $x$  и основной гармоник выходного напряжения преобразователя.

## **2.2 Расчет коэффициента мощности синхронного двигателя, питаемого от НПЧ с ШИМ**

Важнейшей энергетической характеристикой СД, как и других потребителей электрической энергии, является коэффициент мощности, показывающий, какая часть подводимой к двигателю энергии является полезной. Если напряжение двигателя синусоидально, то коэффициент мощности  $K_M$  равен  $\cos\varphi$ , т.е. определяется углом сдвига между напряжением и потребляемым током. При наличии в питающем напряжении высших гармонических, понятие коэффициента мощности усложняется и  $K_M \neq \cos\varphi$ , хотя и в этом случае коэффициент мощности определяется соотношением активной и реактивной мощностей потребителя, но с учетом потерь, вызываемых высшими гармониками тока.

В общем случае:

$$K_M = \frac{P}{S} . \quad (2.11)$$

где  $P$  - активная мощность двигателя;  
 $S$  - полная мощность двигателя.

Активная мощность:

$$P = \sum_{v=1}^{\infty} U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sum_{v=2}^{\infty} U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v , \quad (2.12)$$

где  $U_1$  – напряжение основной гармоники двигателя;  
 $I_1$  – ток основной гармоники двигателя;  
 $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности основной гармоники;  
 $U_v, I_v, \cos \varphi_v$  – то же, но для высших гармоник.

Можно показать, что при одинаковой величине

$$\alpha_{U_v} = \frac{U_v}{U_1} . \quad (2.13)$$

с увеличением порядка гармоник активные потери, вызываемые высшими гармониками, уменьшаются вследствие уменьшения  $\cos \varphi_v$  и тока  $I_v$ . Так как

$$\cos \varphi_v = \frac{r_v}{Z_v} \approx \frac{r_{K.3.}}{Z_{K.3.} \cdot \sqrt{v}} . \quad (2.14)$$

$$I_v = \frac{U_v}{Z_v} \approx \frac{U_v}{Z_{K.3.} \cdot \sqrt{v}} . \quad (2.15)$$

где  $r_{K.3.}$  и  $Z_{K.3.}$  – активное и полное входное сопротивление синхронного двигателя в режиме короткого замыкания, то отношение активных потерь, вызываемых  $v$  - ой и  $(v+1)$  - й гармониками будет равно:

$$\frac{U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v}{U_{v+1} \cdot I_{v+1} \cdot \cos \varphi_{v+1}} = \frac{(v+1) \cdot \sqrt{v+1}}{v \sqrt{v}} . \quad (2.16)$$

Необходимо отметить, что спектральный состав выходного напряжения НПЧ с синусоидальной широтно - импульсной модуляцией характеризуется тем, что с уменьшением частоты выходного напряжения содержание

гармоник низких порядков уменьшается, что приводит к уменьшению активных потерь в системе "непосредственный преобразователь частоты – синхронный двигатель".

Выражения для коэффициента мощности, полученные по уравнению (2.11), могут быть различными не только по виду, но и по смыслу в зависимости от определения понятий полной мощности [28,29].

Учитывая, что допустимая мощность электрических машин зависит от нагрева статора или ротора, полная мощность должна определяться выражением, характеризующим потери (нагрев) цепи, т.е. как произведение среднеквадратичных величин всех гармоник напряжения и тока. Таким образом, полная мощность – это максимальная активная мощность, которая может быть получена при заданных модулях векторов для всех гармоник тока и напряжения. Этому определению соответствует выражение:

$$S = \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2} \cdot \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2} = U_1 \cdot I_1 \sqrt{1 + \sum_{v=2}^{\infty} \alpha_{U_v}^2} \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} \alpha_{U_v}^2 \frac{1}{v^2}} . \quad (2.17)$$

Подставляя (2.12) и (2.17) в (2.1), получим:

$$K_M = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sum_{v=2}^{\infty} U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v}{U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 + \sum_{v=2}^{\infty} \alpha_{U_v}^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2}}} . \quad (2.18)$$

После преобразований, с учетом (2.14) и (2.15), получим:

$$K_M = \frac{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_{K,3} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v \cdot \sqrt{v}}}{\sqrt{1 + \sum_{v=2}^{\infty} \alpha_{U_v}^2} \cdot \sqrt{1 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2}}} . \quad (2.19)$$

Полученное выражение дает возможность определить влияние на коэффициент мощности синхронного двигателя каждой гармоники питающего двигателя напряжения. Расчеты показывают, что это влияние невелико и уменьшается с увеличением порядка гармоник.

На рисунке 2.2 изображены зависимости относительных значений коэффициента мощности от изменения частоты выходного напряжения преобразователя для двух значений несущей частоты. При построении кривых учтены гармоники до 20 порядка. Увеличение несущей частоты и,

следовательно, улучшение формы кривой выходного напряжения преобразователя приводит к увеличению коэффициента мощности синхронного двигателя.

Необходимо отметить, что спектральный состав выходного напряжения НПЧ с синусоидальной широтно - импульсной модуляцией характеризуется тем, что с уменьшением частоты выходного напряжения содержание гармоник низких порядков уменьшается, что приводит к уменьшению активных потерь в системе "непосредственный преобразователь частоты – синхронный двигатель".

Важнейшей энергетической характеристикой СД, как и других потребителей электрической энергии, является коэффициент мощности, показывающий, какая часть подводимой к двигателю энергии является полезной.

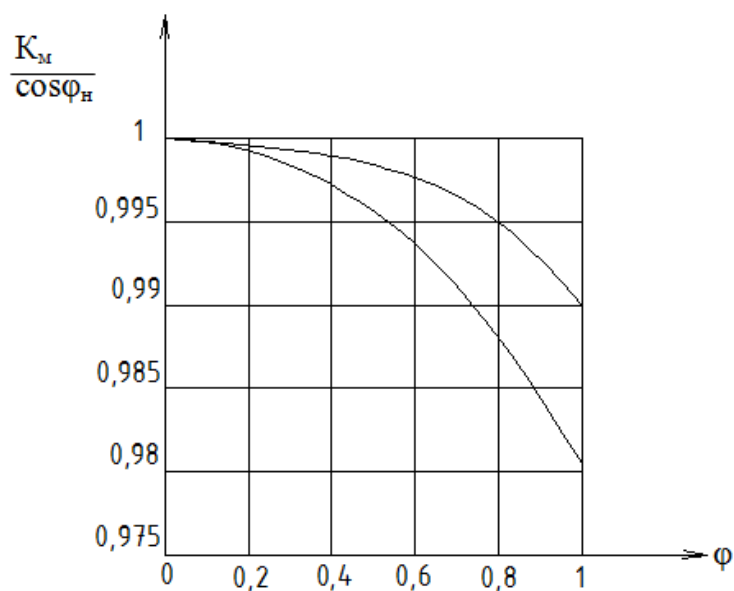


Рисунок 2.2 – Зависимость суммарного относительного коэффициента мощности СД от частоты выходного напряжения НПЧ при различных значениях несущей частоты

### 2.3 Влияние высших гармонических НПЧ на потери и КПД синхронного двигателя

Кроме основных потерь, определяемых первой гармоникой напряжения, в синхронном двигателе, работающем совместно с непосредственным преобразователем частоты, появляются добавочные потери, обусловленные несинусоидальностью напряжения и тока якоря. Ниже рассматриваются добавочные потери, имеющие место в обмотках статора и ротора двигателя, в стали машины, а также определяется дополнительная мощность, потребляемая двигателем из сети, для преодоления тормозных моментов, вызываемых выс -

шими гармониками тока.

Коэффициент полезного действия синхронной машины при питании синусоидальным напряжением обычно определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P + \sum P} , \quad (2.20)$$

где  $P$  - полезная активная мощность;

$\sum P$  - сумма всех потерь.

При питании синхронного двигателя от непосредственного преобразователя частоты с широтно - импульсной модуляцией сумма всех потерь должна включать в себя еще и добавочные потери от высших гармоник, т.е.:

$$\sum P = \sum P^1 + \sum_{v=2}^{\infty} \Delta P + \sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_{Cv} + \sum_{v=2}^{\infty} P_{Tv} , \quad (2.21)$$

где  $\sum P^1$  - потери, определяемые первой гармоникой;

$\sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_v$  - потери в обмотках двигателя от высших гармоник;

$\sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_{Cv}$  - потери в стали двигателя от высших гармоник;

$\sum_{v=2}^{\infty} P_{Tv}$  - дополнительная мощность, идущая на преодоление

тормозных моментов от высших гармоник.

Дополнительные потери в обмотках статора и ротора синхронного двигателя можно определить по следующему выражению:

$$\sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_v = 3 \cdot \sum_{v=2}^{\infty} (I_v^2 \cdot r_{1v} + I_v^2 \cdot r_{2\varepsilon v}^1) , \quad (2.22)$$

где  $I_v^1 \cdot r_{1v}$  - потери в обмотках якоря двигателя;

$I_v^2 \cdot r_{2\varepsilon v}^1$  - потери в обмотках ротора.

Учитывая, что

$$I_v = \frac{U_v}{Z_v} \cong \frac{U_v}{Z_{K.3.} \cdot f \cdot v} = \alpha_{U_v} \cdot \frac{I_{K.3.} \cdot f}{v}. \quad (2.23)$$

и что активное сопротивление увеличивается пропорционально  $\sqrt{f}$ , уравнение (2.22) перепишем в виде:

Важнейшей энергетической характеристикой СД, как и других потребителей электрической энергии, является коэффициент мощности, показывающий, какая часть подводимой к двигателю энергии является полезной.

$$\sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_v = 3 \cdot I_{K.3.f.}^2 \cdot r_{1f} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2} (\sqrt{v} + \gamma_f \cdot \sqrt{v \pm 1}). \quad (2.24)$$

Так как потери короткого замыкания от первой гармоники при частоте  $f$ :

$$P_{K.3.f} = 3 \cdot I_{K.3.f}^2 \cdot r_{1f}. \quad (2.25)$$

то подставив в (2.24) получим:

$$\sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_v = P_{K.3.f} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2} (\sqrt{v} + \gamma_f \cdot \sqrt{v \pm 1}). \quad (2.26)$$

Знак "+" под радикалом ставится для гармоник тока, создающих поля вращения, направленные против поля основной гармоники, знак "-" - для гармоник тока, создающих попутные поля вращения.

По уравнению (2.26) определяется величина потерь в обмотках синхронного двигателя, отнесенная к потерям в обмотках от основной гармоники при частоте  $f$  питающего напряжения. Аналогичным путем можно получить выражение для потерь по отношению к номинальным потерям в обмотках двигателя при частоте питающего напряжения 50 Гц:

$$\sum \Delta P_v = P_{K.3.H.} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2} (\sqrt{v} + \gamma_f \cdot \sqrt{v \pm 1}). \quad (2.27)$$

На рисунке 2.3 изображены кривые относительных потерь в обмотках двигателя, вызываемых действием различных гармоник в зависимости от их величины. Сплошными линиями показаны кривые потерь от действия гармоник тока, создающих поля вращения, направленные против поля

основной гармонике, пунктирными линиями – потери от действия гармоник тока, создающих попутные поля вращения. Наибольшее влияние на потери в обмотках оказывают гармоники напряжения низких порядков, имеющие при синусоидальной широтно - импульсной модуляции небольшую амплитуду. Поэтому потери в обмотках двигателя не превышают 4% от величины номинальных потерь в меди двигателя в соответствии с рисунком 2.4.

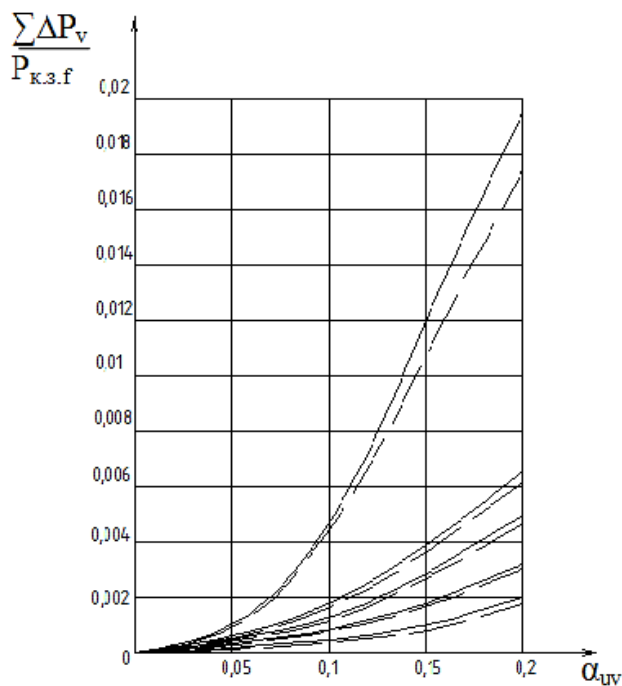


Рисунок 2. 3 – Кривые относительных потерь в обмотках двигателя, вызываемых действием различных гармоник

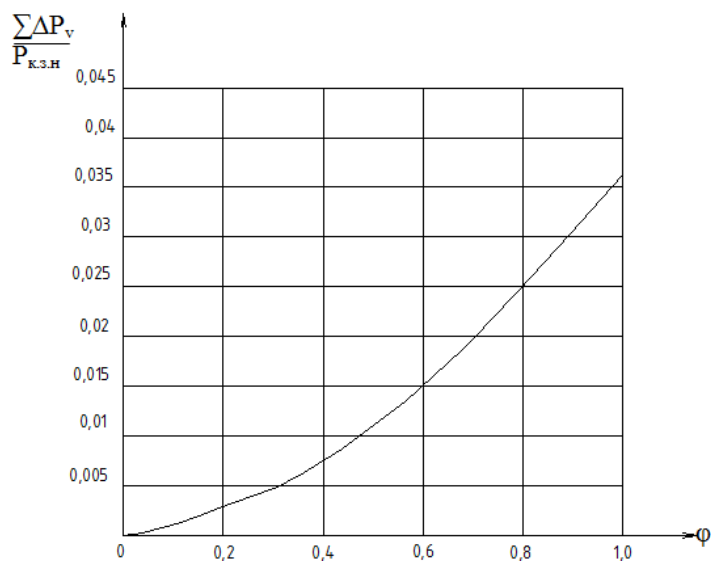


Рисунок 2.4 – Зависимость потерь в обмотках синхронного двигателя от частоты подводимого напряжения

Потери в стали синхронной машины можно оценить при помощи следующего выражения:

$$P_C = K_g \cdot P_{CC} \cdot G_C, \quad (2.28)$$

где  $K_g$  – коэффициент, учитывающий дефекты при обработке стали и неравномерность распределения индукции;  
 $G_C$  – вес стали.

$$P_{CC} = P_{уд.} \cdot B_C^2 \cdot \varphi^\alpha, \quad (2.29)$$

где  $P_{уд.}$  – удельные потери в стали при частоте 50 Гц;  
 $B_C$  – индукция;  
 $\varphi$  – относительная частота питающего напряжения;  
 $\alpha$  – коэффициент, зависящий от частоты перемагничивания стали (при частоте от 10 до 100 Гц,  $\alpha = 1,3$ ).

Основные потери в стали, определяемые первой гармоникой напряжения, находятся из соотношения:

$$P_{C1} = K_g \cdot G_C \cdot B_{C1}^2 \cdot \varphi^{1,3} \cdot P_{уд.} \quad (2.30)$$

Добавочные потери в стали от действия  $\nu$  - й гармоники напряжения:

$$P_{C\nu} = K_g \cdot G_C \cdot B_{C\nu}^2 \cdot \varphi^\alpha \cdot \nu^2 \cdot P_{уд.} \quad (2.31)$$

При выводе уравнений (2.30) и (2.31) считалось, что определение потерь в ярме статора принципиально не отличается от определения потерь в зубцовой зоне.

Потери от действия  $\nu$  – ой гармоники, отнесенные к основным потерям в стали будут равны:

$$\frac{P_{C\nu}}{P_{C1}} = \frac{B_{C\nu}^2}{B_{C1}^2} \cdot \nu^2 \cdot \varphi^{\alpha-1,3} \quad (2.32)$$

Учитывая, что индукция пропорциональна напряжению и частоте, запишем:



$$\frac{B_{Cv}^2}{B_{C1}^2} = \alpha_{Uv}^2 \cdot \frac{1}{v^2} . \quad (2.33)$$

После подстановки (3.32) в (3.33) получим:

$$\frac{P_{Cv}}{P_{C1}} = \alpha_{Uv}^2 v^{\alpha-2} \cdot \varphi^{\alpha-1,3} . \quad (2.34)$$

Если считать, что при комбинированном намагничивании стали различными частотами общие потери в стали определяются суммой потерь при раздельном намагничивании каждой частотой, что возможно только при постоянной магнитной проницаемости железа, то влияние несинусоидальности питающего напряжения на потери в стали двигателя в относительных единицах будет выражаться соотношением:

$$\frac{\sum_{v=2}^{\infty} P_{CCv}}{P_{C1}} = \varphi^{\alpha-1,3} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \alpha_{Uv}^2 \cdot v^{\alpha-2} . \quad (2.35)$$

На рисунке 2.5 показаны зависимости относительных добавочных потерь в стали от величины гармоник напряжения. С увеличением порядка гармоник влияние их на потери в стали уменьшается. При определении суммарных добавочных потерь в стали по уравнению (2.35) учитывались только пространственные гармоники индукции низких порядков. Более высокие гармоники индукции не принимались во внимание в связи со значительным уменьшением их амплитуд в сравнительно большом воздушном зазоре синхронных машин.

В соответствии с рисунком 2.6, на котором показана зависимость относительных добавочных потерь в стали от частоты основной гармоники выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты, видно, что величина добавочных потерь в стали не превосходит 1,5% от основных потерь в стали.

Кроме основных потерь, определяемых первой гармоникой напряжения, в синхронном двигателе, работающем совместно с непосредственным преобразователем частоты, появляются добавочные потери, обусловленные несинусоидальностью напряжения и тока якоря. Ниже рассматриваются добавочные потери, имеющие место в обмотках статора и ротора двигателя, в стали машины, а также определяется дополнительная мощность, потребляемая двигателем из сети, для преодоления тормозных моментов, вызываемых высшими гармониками тока.

Необходимо отметить, что спектральный состав выходного напряжения НПЧ с синусоидальной широтно - импульсной модуляцией характеризуется тем, что с уменьшением частоты выходного напряжения содержание гармоник низких порядков уменьшается, что приводит к уменьшению активных потерь в системе "непосредственный преобразователь частоты – синхронный двигатель".

определение потерь в ярме статора принципиально не отличается от определения потерь в зубцовой зоне.

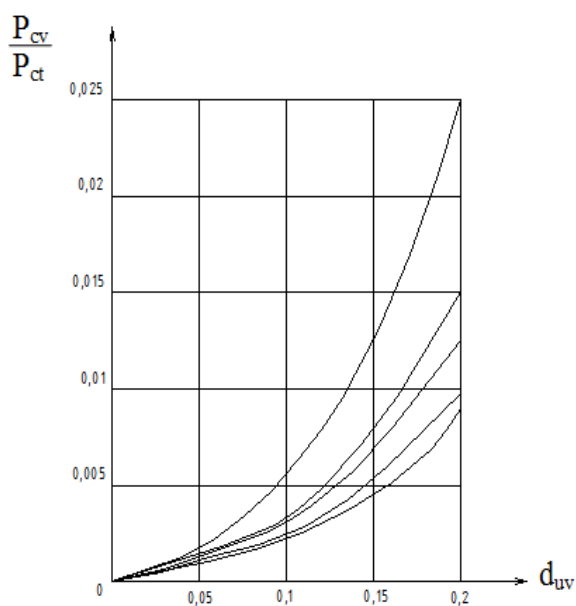


Рисунок 2.5 – Зависимость относительных добавочных потерь в стали от величины гармоник напряжения

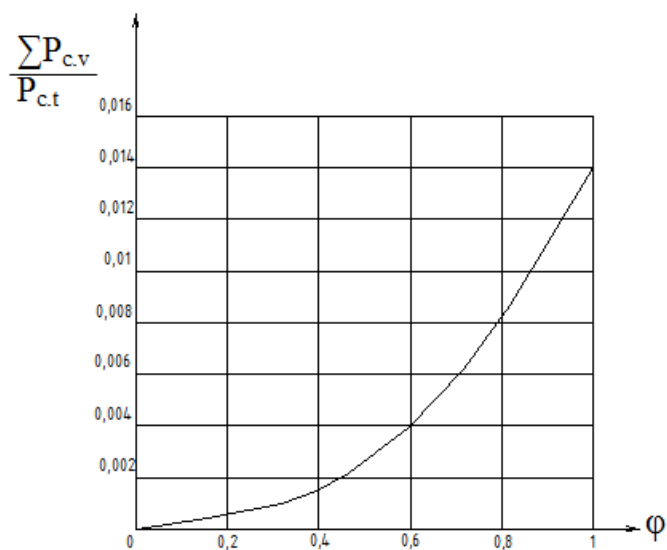


Рисунок 2.6 – Зависимость относительных добавочных потерь в стали от частоты основной гармоники выходного напряжения

Дополнительную мощность, потребляемую двигателем из сети для преодоления тормозных моментов, вызываемых высшими гармониками, можно определить из выражения:

Определение коэффициента полезного действия СД производится по выражению (2.20) после суммирования всех основных и добавочных потерь по уравнению (2.21).

$$\frac{\sum_{v=2}^{\infty} P_{Tv}}{P_H} = \frac{\sum_{v=2}^{\infty} M_v}{M_H} = \sum_{v=2}^{\infty} \frac{\alpha_{U_v}^2}{v^2} \cdot \frac{\mu^2}{\varphi^2 \cdot \sqrt{\varphi}} \cdot \frac{K_{ПН} \left( \frac{1}{\sqrt{v \pm 1}} + \gamma \cdot \frac{K_{HEC}^2 \cdot f}{\sqrt{v \pm 2}} \right)}{1 + \gamma \cdot K_{HEC.f}^2}. \quad (2.36)$$

Зависимость относительного коэффициента полезного действия синхронной машины ЕС – 52 при питании от НПЧ с синусоидальной широтно – импульсной модуляцией приведена на рисунке 2.7. Как видно из этого рисунка, уменьшение к.п.д. синхронного двигателя незначительно и оценивается долями процента по отношению к номинальному к.п.д., который имеет место при питании двигателя синусоидальным номинальным напряжением, равным по амплитуде основной гармонике выходного напряжения преобразователя частоты.

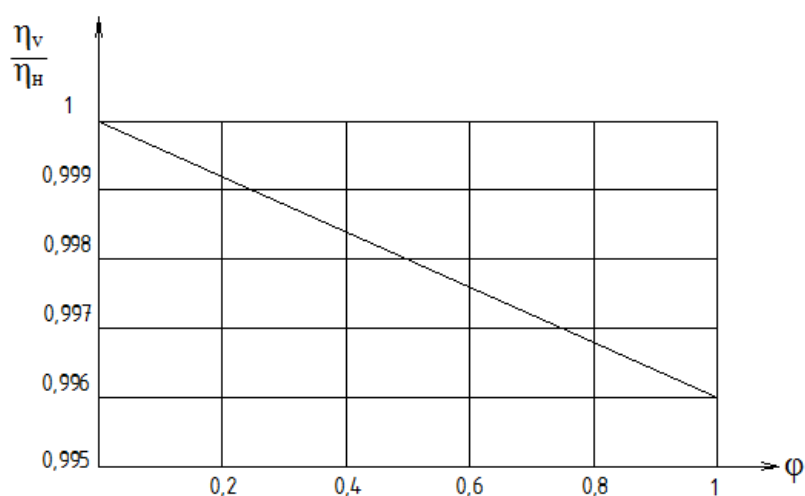


Рисунок 2.7 – Зависимость относительного КПД синхронной машины при питании от НПЧ

## 2.4 Определение частоты переключений тиристорov НПЧ

Частота переключений тиристорov (несущая частота) является одним из основных параметров вентильно - машинной системы " НПЧ – синхронный двигатель", определяющих энергетические показатели. С увеличением несущей частоты возрастают коммутационные потери в преобразователе. В то

же время улучшается форма кривой выходного напряжения и, следовательно, уменьшаются потери в обмотках и в стали двигателя, увеличивается коэффициент мощности, снижается величина добавочных моментов, обусловленных несинусоидальностью напряжения.

Поэтому необходимо определить такую величину несущей частоты, при которой суммарные потери в преобразователе и в двигателе были бы минимальными.

Потери энергии за одну коммутацию тиристора составляют:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2 \cdot \left[ 1 - \ell^{\frac{\pi}{Q}} \right], \quad (2.37)$$

где  $Q = \frac{X_L}{r}$  – добротность контура коммутации, определяемая соотношением индуктивного и активного сопротивления контура.

Суммарные коммутационные потери в преобразователе:

$$\sum \Delta P_K = f_{\text{HEC}} \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2 \cdot \left[ 1 - \ell^{\frac{\pi}{Q}} \right]. \quad (2.38)$$

Учитывая, что параметры коммутирующего контура рассчитаны таким образом, чтобы:

$$I_K = C \cdot \beta \cdot U_c = 1,5 \cdot I_H. \quad (2.39)$$

запишем:

$$\sum \Delta P_K = 1,5 \cdot f_{\text{HEC}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{I_H}{\beta} \cdot U_c \cdot \left[ 1 - \ell^{\frac{\pi}{Q}} \right]. \quad (2.40)$$

Значения коммутационных потерь, подсчитанные по уравнению (2.40) в зависимости от величины несущей частоты, приведены на рисунке 2.8 (кривая 2). Также показаны значения дополнительных потерь в обмотках синхронного двигателя (кривая 1) и построена кривая 3 суммарных потерь в преобразователе и двигателе, отнесенных к номинальным потерям короткого замыкания в двигателе. В соответствии с рисунком 2.8, частота переключений тиристорov, которой соответствуют минимальные суммарные потери, составляет приблизительно 400 Гц. Величина этих потерь при питании синхронного двигателя от НПЧ с синусоидальной широтно - импульсной

модуляцией не может быть меньше 20% от номинальных потерь короткого замыкания двигателя.

Дальнейшее увеличение несущей частоты, резко увеличивая суммарные потери в системе " НПЧ - синхронный двигатель", приводит лишь к незначительному увеличению коэффициента мощности и снижению величин дополнительных моментов двигателя, определяемых несинусоидальной формой питающего напряжения.

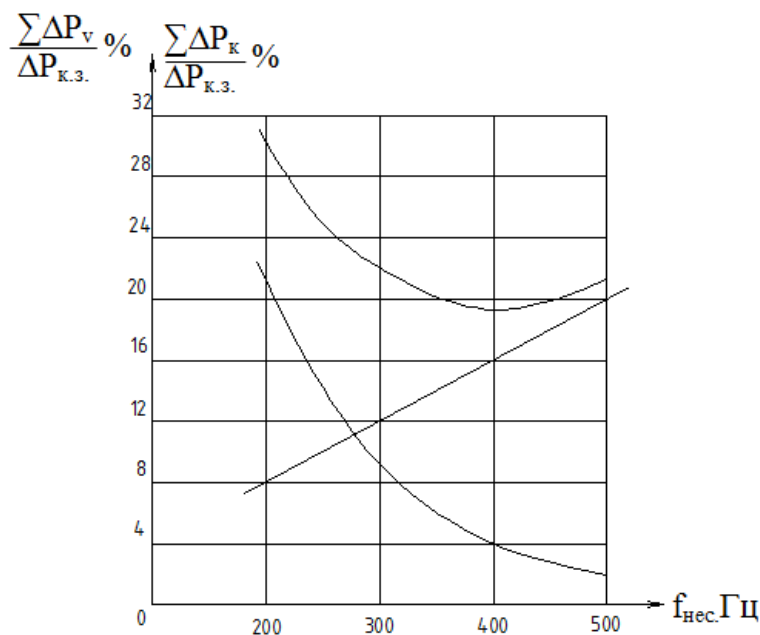


Рисунок 2.8 – Зависимости коммутационных потерь в зависимости от величины несущей частоты

### 3 Построение системы управления вентильным двигателем на основе НПЧ с ШИМ

#### 3.1 Цифро-аналоговая система управления

Схема управления преобразователем является неотъемлемой частью ВД [6,7] и в значительной степени влияет как на его эксплуатационные характеристики, так и на надежность агрегата в целом. Сложность схемы управления во многом определяется структурой силовой схемы преобразователя и конструкцией датчика положения ротора.

Одним из основных элементов схемы управления является датчик положения ротора (ДПР) в значительной степени определяющий надежность работы вентильного двигателя. ДПР должны удовлетворять довольно сложному комплексу требований: малые габариты и вес; надежность; независимость параметров сигнала от окружающей среды и др.

Система управления ВД, в целом, должна обеспечивать: требуемый диапазон изменения выходного напряжения в соответствии с заданным законом регулирования; возможность рекуперации энергии в сеть при генераторных режимах работы двигателя; осуществлять реверсирование двигателя; устойчиво работать при изменениях частоты и напряжения источников питания.

Сложность процессов, протекающих в преобразователе частоты с непосредственной связью и широтно-импульсной модуляцией, обуславливает и сложность системы управления.

Система управления может быть полностью реализована на основе цифровых технологий без ДПР с определением положения ротора и скорости вращения косвенным образом, что потребует применения мощных и, соответственно, дорогих процессоров. В другом случае часть функций формирования сигналов управления может быть реализована аппаратными средствами, а часть передается микропроцессорной системе, что разгружает процессор от дополнительных вычислений.

Распределение импульсов на тиристоры ПЧ осуществляет схема, построенная на логических элементах, а регуляторы тока и скорости выполнены на основе однокристалльной микро – ЭВМ. Это позволяет повысить точность и быстродействие системы управления и упростить процесс реализации ШИМ.

Кроме того микро – ЭВМ осуществляет тестирование системы и контроль за аварийными режимами. В преобразователях частоты, использующих принцип ШИМ, для частотного регулирования скорости асинхронных и синхронных двигателей, необходимым элементом системы управления является наличие трехфазного генератора задающего синусоидального напряжения для обеспечения модуляции по синусоидальному закону. Подобный генератор является в реализации сложным элементом и не всегда отвечает необходимым требованиям к качеству выходного напряжения.

Применение принципа ШИМ при формировании выходного напряжения вентильного двигателя позволяет упростить систему управления. Роль трехфазного задающего генератора может выполнять датчик положения ротора, который в системе ВД управляет преобразователем, определяя моменты коммутации тока с фазы на фазу.

Наиболее подходит для этого ДПР, выполненный в виде сельсина, имеющего одинаковое количество пар полюсов с синхронным двигателем. Напряжение, снимаемое с сельсина, сигнализирует о положении ротора в пространстве и в то же время является задающим напряжением в системе управления, обеспечивая модуляцию по синусоидальному закону [7]. Кроме того, это напряжение обеспечивает обратную связь по скорости так как амплитуда и период этого напряжения пропорциональны скорости вращения двигателя и воздействуют на коэффициент заполнения при постоянной

несущей частоте. В результате действия отрицательной обратной связи по скорости механические характеристики ВД становятся более жесткими.

Таким образом, в разработанной схеме ДПР подает сигнал о начале коммутации тока, а в период между коммутациями тока с фазы на фазу напряжение преобразователя формируется методом ШИМ. В течение полупериода задающего напряжения в фазе двигателя происходят многократные переключения вентилях преобразователя, при этом выходное напряжение изменяется по синусоидальному закону.

Схема, реализующая заданный закон управления, содержит следующие основные блоки: генератор несущей частоты (ГНЧ); блок модуляторов (БМ); блок логики (БЛ); формирователи управляющих импульсов (ФИ); микропроцессорное управляющее устройство на базе однокристальной микро – ЭВМ (МПУУ) (рисунок 3.1).

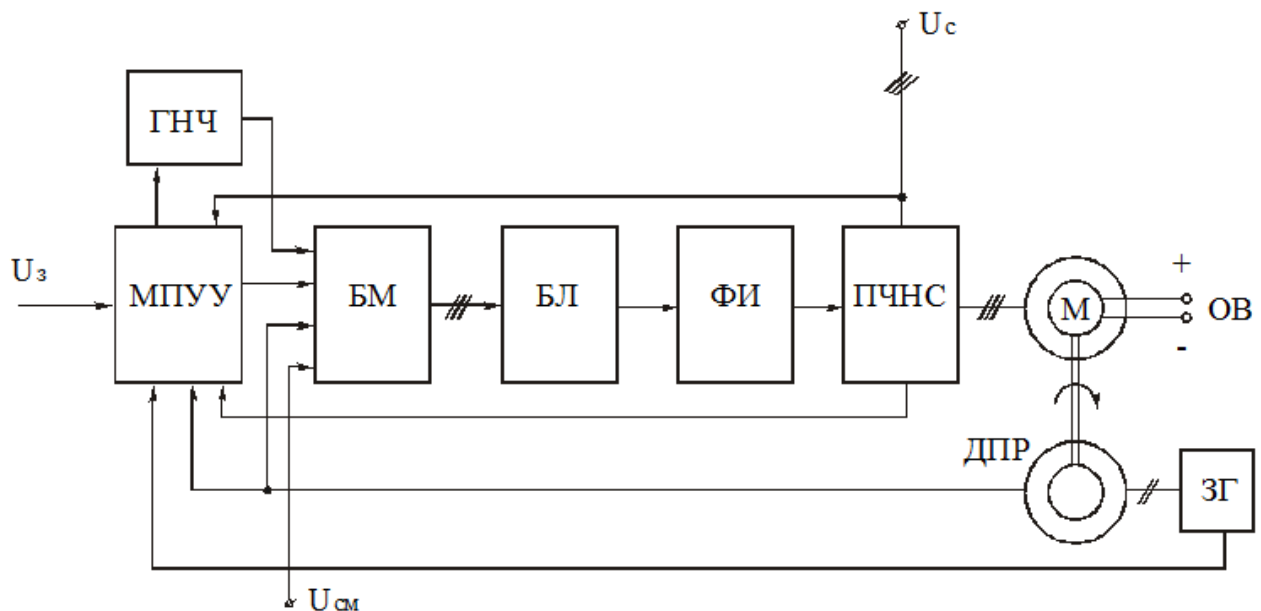


Рисунок 3.1 – Цифроаналоговая схема системы управления

МПУУ обеспечивает реализацию контуров регулирования тока и скорости, управляет генератором несущей частоты в зависимости от задающего напряжения и частоты вращения двигателя, формирует сигнал на блок модуляторов с учетом сигналов обратной связи по току и скорости. Так как реализация заданного закона модуляции в основном возложена на аппаратную часть схемы, микро-ЭВМ дополнительно контролирует состояние силовых элементов схемы и отдельных блоков системы управления. В блоке модуляторов происходит сложение входящих сигналов и вырабатывается трехфазная широтно-модулированная последовательность импульсов, которая в блоке логики распределяется по формирователям. Учитывая дискретный характер формирования сигналов в МПУУ запишем алгоритмы реализации ПИ-законов регулирования в виде

$$U[n] = k_1 e[n] + k_2 \sum_{i=1}^n e[i], \quad (3.1)$$

где  $k_2 = T/T_{\text{инт}}$ ;

$T = t/n$  – период квантования;

$n = 0, 1, 2, \dots$  – текущее число отсчетов в дискретные моменты времени.

Этот же закон в приращениях:

$$\Delta U[n] = k_1 \Delta e[n] + k_2 e[n],$$

$$U[n] = U[n-1] + \Delta U[n];$$

С учетом (4.2) для нашей структуры можем записать следующее соотношение для программных регуляторов скорости и тока:

$$N_{\text{pc}}[n] = N_{\text{pc}}[n-1] + \Delta N_{\text{pc}}[n]$$

$$\Delta N_{\text{pc}}[n] = K_1^{\omega} \Delta \omega[n] + K_2^{\omega} \omega[n]$$

$$\Delta \omega[n] = \omega[n] - \omega[n-1];$$

$$\omega[n] = N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n];$$

$$\omega[n-1] = N_3^{\omega}[n-1] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n-1];$$

$$\Delta \omega[n] = N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n] - N_3^{\omega}[n-1] + N_{\text{oc}}^{\omega}[n-1] = (N_3^{\omega}[n] - N_3^{\omega}[n-1]) - (N_{\text{oc}}^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n-1]) = \Delta N_3^{\omega}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^{\omega}[n] = \Delta'' \omega$$

$$\Delta N_{\text{pc}}[n] = K_1^{\omega} (\Delta N_3^{\omega}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) + K_2^{\omega} (N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n])$$

или в темпе вычислений:

$$N_{\text{pc}}[0] = N_3^{\omega}[0]$$

$$N_{\text{pc}}[1] = N_3^{\omega}[0] + N_{\text{pc}}[1];$$

$$N_{\text{pc}}[2] = N_{\text{pc}}[1] + N_{\text{pc}}[2];$$

.....

$$N_{\text{pc}}[n] = N_{\text{pc}}[n-1] + \Delta N_{\text{pc}}[n] = N_{\text{pc}}[n-1] + K_1^{\omega} (\Delta N_3^{\omega}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) + K_2^{\omega} (N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) = N_{\text{pc}}[n-1] + K_1^{\omega} \Delta'' \omega + K_2^{\omega} \Delta' \omega = \alpha + K_2^{\omega} \Delta' \omega.$$

Для вычисления значения  $N_{\text{pt}}[n]$  в работе МПУУ имеем:

$$N_{\text{pt}}[0] = N_{\text{pc}}[0] = N_3^{\omega}[0];$$

$$N_{\text{pt}}[1] = N_{\text{pt}}[0] + \Delta N_{\text{pt}}[1];$$

$$N_{\text{pt}}[2] = N_{\text{pt}}[1] + \Delta N_{\text{pt}}[2];$$

.....

$$N_{\text{pt}}[n] = N_{\text{pt}}[n-1] + \Delta N_{\text{pt}}[n];$$

$$\Delta N_{\text{pt}}[n] = K_1^i (\Delta N_{\text{pc}}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^i[n]) + K_2^i (N_{\text{pc}}[n] - N_{\text{oc}}^i[n]) = K_1^i K_1^{\omega} (\Delta N_3^{\omega}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) + K_1^i K_1^{\omega} (N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) - K_2^i K_2^{\omega} (N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) - K_2^i N_{\text{oc}}^i[n] = K_1^i K_1^{\omega} + K_2^i K_1^{\omega}) (\Delta N_3^{\omega}[n] - \Delta N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) + (K_1^i K_2^{\omega} + K_2^i K_2^{\omega}) (N_3^{\omega}[n] - N_{\text{oc}}^{\omega}[n]) - K_1^i$$



$$\Delta N_{oc}^i[n] + K_2^i N_{oc}^i[n] + K_2^i N_{pc}[n-1] = K_3 \Delta''\omega + K_4 \Delta' \omega + K_2^i N_{pc}[n-1] - K_1^i N_{oc}^i[n] - K_1^i N_{oc}^i[n-1] - K_1^i N_{oc}^i[n] = K_2^i N_{pc}[n-1] + K_3 \Delta''\omega + K_4 \Delta' \omega - (2K_1^i N_{oc}^i[n] + K_1^i N_{oc}^i[n-1]);$$

$$N_{pt}[n] = N_{pt}[n-1] + K_2^i N_{pc}[n] + K_3 \Delta''\omega + K_4 \Delta' \omega - K_1^i \Delta i;$$

$$\Delta i = 2N_{oc}^i[n] - N_{oc}^i[n-1]$$

С учетом составленных зависимостей последовательность расчета выходного кода программного регулятора тока системы подчиненного регулирования отражена в программе (таблица 3.1 А указана в приложении А).

Время выполнения одного цикла программы составляет  $T_{ц} = 2,8$  мс. Количество байт, занимаемых программой в ПЗУ ОЭВМ составляет 362, т.е. остаток составляет:  $1024-362=662$  байт.

### 3.2 Микропроцессорная система управления

Функциональная схема микропроцессорной системы управления представлена на рисунке 3.2. Здесь также в качестве ДПР применен трехфазный сельсин [7]. Данная микромашина и позволяет не только определить угловое положение ротора, но и быть одновременно источником синусоидального модулирующего напряжения для системы управления и датчиком скорости. При таком построении системы отпадает необходимость в цифровой реализации трехфазного задающего генератора модулирующего напряжения для обеспечения ШИМ и датчика скорости, что освобождает процессор для других вычислений.

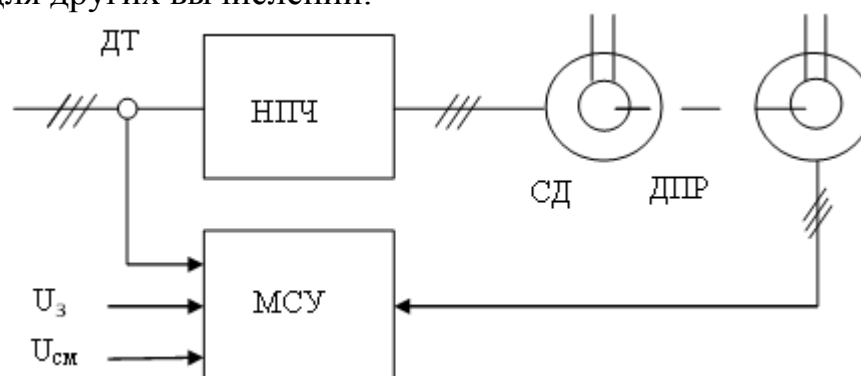


Рисунок 3.2 – Функциональная схема системы управления

Вентильный электродвигатель, в котором реализован предлагаемый способ управления, работает следующим образом.

Напряжение, снимаемое с ДПР (сельсин), сигнализирует о положении ротора в пространстве и в то же время является задающим синусоидальным напряжением для микропроцессорной системы управления (МСУ), обеспечивая модуляцию по синусоидальному закону и отрицательную

обратную связь по скорости. В установившемся режиме НПЧ формирует напряжение на фазах синхронного двигателя из огибающей системы трехфазного напряжения в виде последовательности импульсов переменной длительности, ширина которых зависит от результата сравнения синусоидального напряжения, поступающего с сельсина, опорного напряжения пилообразной формы с заданной частотой и напряжения смещения пропорционального колебаниям напряжения сети. Напряжение обратной связи, пропорциональное току вентильного электродвигателя с датчика тока (ДТ), воздействует на амплитуду пилы, обеспечивая устойчивую работу в переходных режимах.

С целью улучшения использования напряжения при регулировании частоты вращения ВД в широком диапазоне, согласно предложенному выше методу, в МСУ изменятся кратность отношения несущей и модулирующей частот при переходе от низкой частоты к более высокой, что обеспечивает минимальные потери в преобразователе при наилучшем гармоническом составе выходного напряжения.

### 3.3 Испытания элементов системы вентильного двигателя

Рассматриваемый ВД изготовлен на базе АД А02-62-4 с данными ( $P_2=17$  кВт;  $U=220/380$  В;  $\Delta/Y$ ;  $n=1450$  об/мин;  $\cos\varphi = 0.89$ ;  $\eta = 0.89$ )

Обмоточные данные статора оставлены без изменения т.е. число витков в катушке – 15, число // проводников в витке – 2, число катушек в группе – 3, число // ветвей в фазе – 2, число последовательных витков в фазе – 90, шаг по пазам 1-8,  $r_\phi$  при  $20^\circ\text{C} = 0,185$  Ом.

Ротор:  $2p=4$ ;  $B_{\text{пн}}=96,4$  мм;  $l_{\text{пн}}=204$  мм;

магниты ЮНКД 35 – Т<sub>5</sub>-БА;

ширина магнита  $B_{\text{п}}=40$  мм;

высота магнита  $h_{\text{м}}=50$  мм;

общая длина магнитов  $l_{\text{м}}=168$  мм;

$B_2=1,05$  тл;

$H_c=1100$  А/см.

Поскольку на валу двигателя находится ДПР, то наружный обдув отсутствует, т.е. двигатель закрытого исполнения. Считая, что в закрытом исполнении для А2-62-4.  $P_{2\text{дв}}=11$ кВт (в обдуваемом 17 кВт) допустимый в тепловом отношении ток фазы:

$$I_\phi = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_\phi \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{1100}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.85 \cdot 0.85} = 23 \text{ А.} \quad (3.2)$$

Намагничивание производилось от конденсаторной батареи. В режиме холостого хода  $n=1500$  об/мин получено  $U_{\text{лин}}=200$  В, увеличение тока через намагничивающих катушку не привело к увеличению  $U_\phi$ , то есть магниты были намагничены полностью.

При определении мощности двигателя мы исходили из следующего:

а)  $\cos\varphi = 0,9$ ;

б)  $U_{л} = 1,1 E_{ол}$ , где  $E_{ол}$  – линейная ЭДС на холостом ходе получена из расчета магнитной цепи;

в)  $I_{фдоп} = 23\text{А}$ ;  $\eta_{дв} = 0,8$

Тогда  $P_2 = U_{л} \cdot I_{ф} \cdot \sqrt{3} \cdot \eta = 1,1 \cdot 205 \cdot 23 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 6,45 \approx 6,5 \text{ кВт}$

В ходе испытаний определялись параметры двигателя при работе от сети 50 Гц и преобразователя частоты.

Сопротивление изоляции обмоток статора в холодном состоянии  $> 100 \text{ Ом}$ .

Таблица 3.2 – Результаты измерений сопротивления обмотки статора

Наименование обмотки	$R_{изм}, \text{ Ом}$	$t_x, \text{ }^\circ\text{C}$	$R_{прив}, \text{ Ом}$
фаза А ( $C_1-C_4$ )	0,1837	20	0,1837
фаза В ( $C_2-C_5$ )	0,1835	20	0,1835
фаза С ( $C_3-C_6$ )	0,1834	20	0,1834

Средний воздушный зазор двигателя, определенный по разности диаметров статора и ротора, составляет 1,0 мм.

Для намагничивания на полюсы ротора уложена специальная обмотка. Намагничивание производилось импульсным методом. Линейное напряжение двигателя при частоте вращения  $n=1500 \text{ об/мин}$  в режиме холостого хода составило 200 В. После стабилизации магнитов пусковым током  $\approx 70\text{А}$ , линейное напряжение двигателя при  $n=1500 \text{ об/мин}$  в режиме холостого хода составило  $U_{л} = 188-190 \text{ В}$ . Проверка работы двигателя производилось от сети 50 Гц.

Характеристика короткого замыкания определена при магнитном потоке полюсов, обеспечивающем линейное напряжение  $U_{л} = 168 \text{ В}$  в режиме холостого хода при частоте вращения  $n=1500 \text{ об/мин}$ . Короткое замыкание – трехфазное, соединение обмоток статора – в звезду. Результаты измерений для фазы А приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Результаты измерений для фазы А

$n, \text{ об/мин}$	500	750	1000	1500
$I_{кз}, \text{ А}$	50,0	53,0	53,4	53,6

Проверка работы в двигательном режиме под нагрузкой

Проверка производилась при том же магнитном потоке полюсов. Результаты измерений для фазы А приведены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Проверка работы в двигательном режиме под нагрузкой

$U_{сети}$	$U$	$I$	$P$	$\cos\varphi$
168,0	97,0	30,0	2900,0	$\approx 1,0$

При перегрузке до 50 А, сбросе и набросе нагрузки  $I=30\text{А}$  выпадения из синхронизма не наблюдалось.

Определение полезной мощности и КПД системы производилось при напряжении сети  $U_c=240$  и В различных углах  $\beta$ . Полезная мощность на валу двигателя определялась с помощью тарированного нагрузочного генератора. Результаты измерений приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерений тока и напряжений

$\beta$	0	+10	+20	-10
$U_c, \text{В}$	240	240	240	212
$I_c, \text{А}$	30	30	30	30
$I_{пч}, \text{А}$	31	31	31	31
$I_{\phi}, \text{А}$	24,5	24,5	24,2	24,6
$U_{л}, \text{В}$	242	192	188	218
$n, \text{об/мин}$	1270	1130	1170	1130
$U_{пч}, \text{В}$	225	226,5	-	-
$U_{нм}, \text{В}$	59,5	62,0	62	55
$I_{нм}, \text{А}$	65,5	67,5	67	59,7
$U_{внм}$	160	220	210	180

Определение полезной мощности и КПД системы производилось при напряжении сети  $U_c=240$  и В различных углах  $\beta$ . Полезная мощность на валу двигателя определялась с помощью тарированного нагрузочного генератора.

Результаты расчета мощности и КПД приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчета мощности и КПД при различных углах  $\beta$

$\beta$	0	+10	+20	-10
$P_1, \text{кВт}$	7,2	7,2	7,2	6,36
$P_2, \text{кВт}$	5,04	5,33	5,35	4,26
$\eta$	0,7	0,74	0,745	0,66
$n_1, \text{об/мин}$	1270	1130	1170	1130
$M, \text{нм}$	38,8	46,0	44,6	36,8

Определение  $\cos\phi$  и КПД двигателя производилось при угле  $\beta=0$ . Измерение токов, напряжений и мощности в фазах проводилось с помощью измерительного комплекса К-50.

Результаты измерений приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7 – Результаты измерений  $\cos\phi$  и КПД двигателя при угле  $\beta=0$

$U_c$	$I_{\text{сети}}$	$I_{\phi}$	$U_{л}$	$n$	$U_{нг}$	$I_{нг}$	$U_{внг}$	$I_A$	$I_B$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$I_C$
23 9	30,3	24, 6	28 0	15 00	83,0	49, 0	180	24, 0	24, 5	16 2	16 2	16 2	21 00	22 00	21 00	24, 5

### Проверка работы в двигательном режиме

Проверка производилась при том же магнитном потоке полюсов. Результаты измерений для фазы А приведены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Проверка работы в двигательном режиме

$P_{\text{сист}}$	$P_{\text{дв}}$	$P_o$	$P_2$	$\eta_{\text{сис}}$	$\eta_{\text{дв}}$	$\cos \varphi$
7250	11820	6400	4880	0,673	0,763	0,542

Скоростные характеристики определены для двух значений напряжений сети:  $U_c=240$  В и  $U_c=160$  В для разных углов  $\beta$ . Результаты измерений приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты измерений при  $\beta=0$

$U_c$	240			160				
$I_c$	37,0	33,5	37,5	24,0	18,7	14,2	11,3	26,0
$n$	1190	1350	1670	745	815	935	1120	1890
$I_\phi$	30,0	27,5	30,5	19,5	15,5	11,0	8,0	22,0
$U_\Delta$	240	264	340	126	122	126	145	348

Полезная мощность на валу двигателя определялась с помощью тарированного нагрузочного генератора.

Регулировочная характеристика, как зависимость  $n=f(U_c)$  при  $U=160$  В, определена для угла  $\beta = +10$  и приведена в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты измерений при  $\beta = +10$ ,  $U=160$  В

$I_c$	25,5	20,0	14,8	13,0	13,4	12,0
$n$	745	820	940	1600	1010	1160
$I_\phi$	21,0	16,5	11,5	10,0	10,0	8,2
$U_\Delta$	126,0	120,0	123,0	218,0	128,0	145,0

Регулировочная характеристика, как зависимость  $n=f(U_c)$  при  $I_c=30A=const$ , определена и приведена в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Регулировочная характеристика

$U_c$	315	250	220	180	150	90	80
$I_\phi$	23,0	23,5	24,5	25,0	25,2	26,0	26,0
$n$	1460	1160	1020	805	655	300	260
$I_{\text{пч}}$	75,0	54,0	45,0	35,0	33,5	33,0	-
$U_\Delta$	240,0	190,0	168,0	138,0	114,0	61,0	45,0

## 4 Математическое моделирование вентильного двигателя

### 4.1 Математическое описание ВД

Математическое описание вентильной машины реализуется аналогично асинхронной машине. [39]

Уравнения равновесия эдс на обмотках статора в неподвижной системе координат базируется на втором законе Кирхгофа (ротор не имеет обмоток).

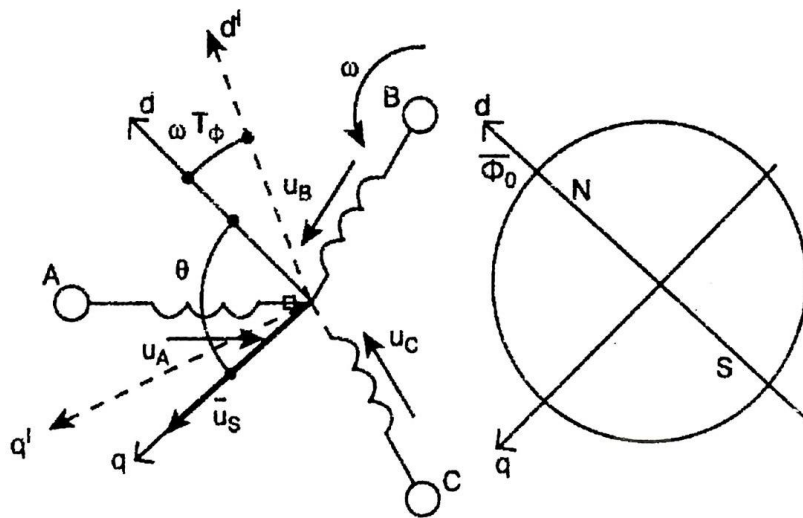


Рисунок 4.1 – Физическая модель ВД

$$\begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

Где  $\psi_A = L_A i_A + \Phi_0 \cos \omega t$ ,

$$\psi_B = L_B i_B + \Phi_0 \cos(\omega t - 120)$$

$$\psi_C = L_C i_C + \Phi_0 \cos(\omega t + 120)$$

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первое уравнение на  $\frac{2}{3}$ , второе – на  $\frac{2}{3} \bar{a}$ , третье на  $\frac{2}{3} \bar{a}^2$  и сложим, тогда получим

$$\bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}, \quad (4.2)$$

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_s \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0,$$

где  $L_s$  – индуктивность статора,  
 $\bar{\psi}_s$  – потокосцепление статора в неподвижной системе координат.

Электромагнитный момент, развиваемый машиной, равен:

$$M = \frac{3}{2} p * \text{mod}(\bar{\psi}_s \times \bar{i}_s) = \frac{3}{2} p * \text{mod}(\bar{\Phi}_0 \times \bar{i}_s). \quad (4.3)$$

Уравнение равновесия моментов на валу машины

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad (4.4)$$

где  $\omega_m = \frac{\omega}{p}$ , число пар полюсов.

## 4.2 Модель ВД в MATLAB

Для упрощения математического описания ВД используется система координат d – q, жестко связанная с ротором. При этом ось d совмещается с направлением магнитного поля ротора.

В этом случае операторные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в вентильном двигателе имеют вид:

$$\begin{aligned} U_d &= R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q, \\ U_q &= R(T_q s + 1)i_q + \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega, \\ M &= p \frac{m}{2} (\psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} s\omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H), \\ s\theta_m &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m. \end{aligned}$$

В уравнениях  $U_d$ ,  $U_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  – проекции напряжения и тока статора на оси,  $\Psi_0$  – проекция потокосцепления ротора на ось d,  $T_d = \frac{L_d}{R}$ ,  $T_q = \frac{L_q}{R}$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  – постоянные времени и индуктивность обмотки статора по продольной и

поперечной осям.  $R$  – сопротивления статорной обмотки,  $\omega_m$ ,  $M$ ,  $M_H$ ,  $\theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала,  $J$  – момент инерции ротора.

Структурная схема ВД, составленная по уравнениям (4.5), приведена на рисунке 4.2. Напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  можно задавать независимо друг от друга, а можно их значения увязать с начальной установкой датчика положения ротора  $\theta_0$ . В этом случае напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  определяются выражениями:

$$U_d = u_1 K_q \cos \theta_0 = U_1 \cos \theta_0, \quad (4.6)$$

$$U_q = u_1 K_q \sin \theta_0 = U_1 \sin \theta_0.$$

В любом случае в реверсивных системах реализуются соотношения  $U_d = 0$ ,  $U_q = U_1$ . Структура ВД с независимым заданием  $U_d$ ,  $U_q$  обычно называется двухканальной, структура ВД, где напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  зависят от начальной установки ДПР, называется одноканальной.

Вентильный электродвигатель, в котором реализован предлагаемый способ управления, работает следующим образом.

Напряжение, снимаемое с ДПР (сельсин), сигнализирует о положении ротора в пространстве и в то же время является задающим синусоидальным напряжением для микропроцессорной системы управления (МСУ), обеспечивая модуляцию по синусоидальному закону и отрицательную обратную связь по скорости.

На основании уравнений (4.5) и параметров, рассчитанных в разделе 3, в программной среде MATLAB строится структурная модель ВД. Модель, составленная на основании блоков Simulink представлена на рисунке 4.2

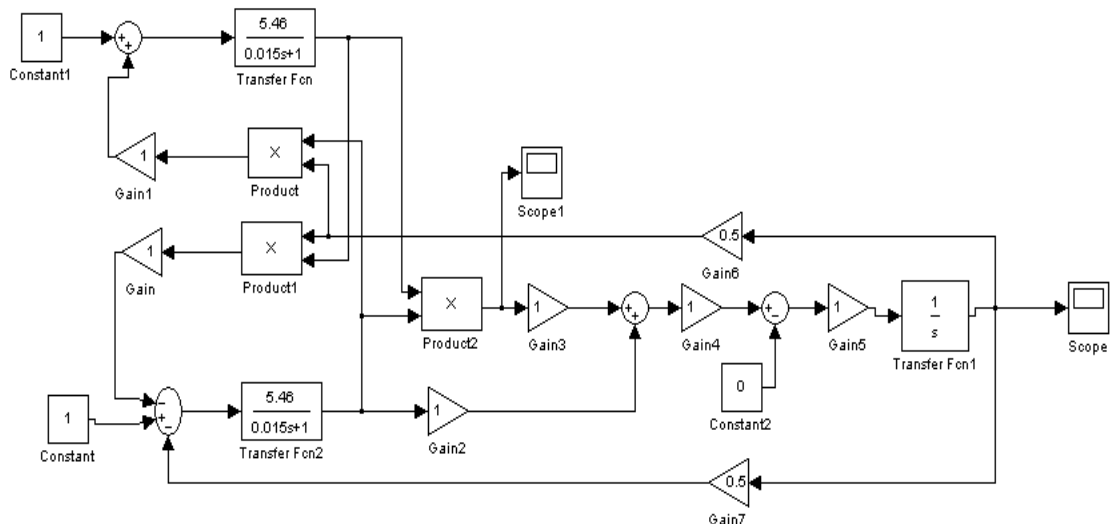


Рисунок 4.2 – Структурная схема ВД



На рисунке 4.3 изображена осциллограмма изменения скорости вращения ВД в процессе пуска и последующего наброса нагрузки.

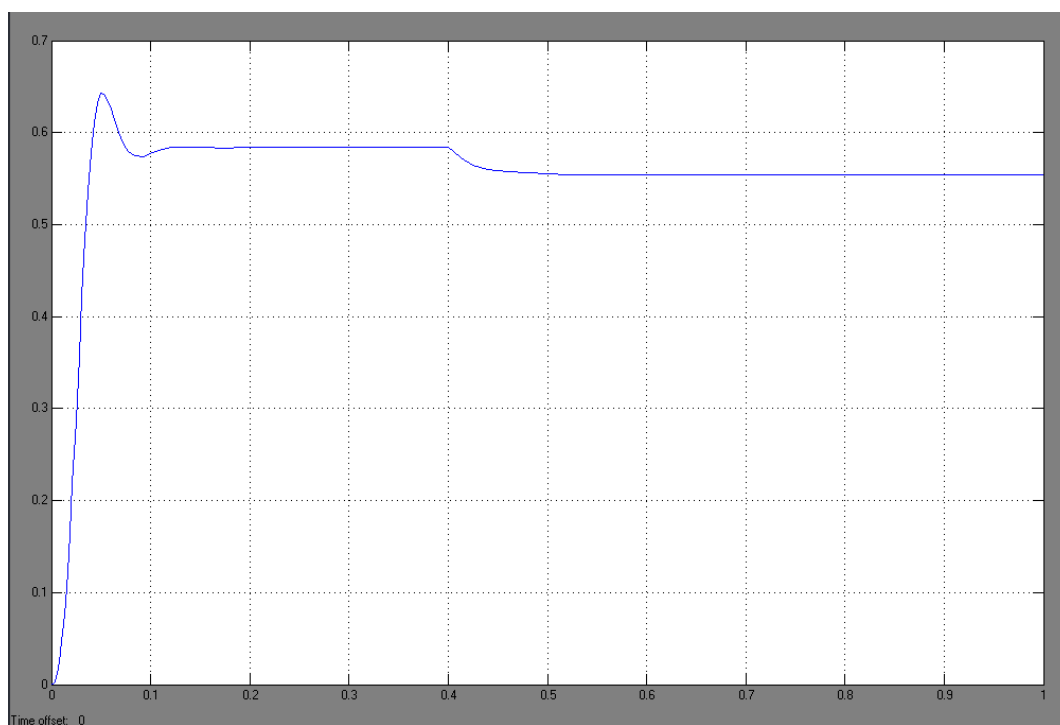


Рисунок 4.3 – Переходной процесс по скорости при пуске ВД

## **5 Безопасность жизнедеятельности**

### **Общие положения**

В данном дипломном проекте разрабатывается система регулирования подачи воды насосами, работающими в паре вентильным двигателем.

В соответствии с заданием проведен обзор существующих систем управления электроприводов насосов. Выбран насосный агрегат СЭ 65-53, (Подача - 65 м<sup>3</sup>/ч. Напор - 580 м. Частота вращения - 3000 об/мин). Произведен расчет и выбор электродвигателя: турбодвигатель синхронный серии СТД-2РУХЛ4 мощностью 2500 кВт с питанием от сети переменного трехфазного тока частотой 50 Гц. Р<sub>ном</sub> - 2500 кВт. Частота вращения - 3000 об/мин. КПД - 97%. cos,φ - 0,9. U<sub>ном</sub> 6кВ, 10кВ В. Масса 10000 кг. Сделан выбор преобразователя частоты, описана его настройка(ЕI-P7002-300Н. Р<sub>ном</sub>-2750 кВт. I<sub>ном</sub> - 450 А. Частота - 50 Гц. U<sub>вых</sub> - 380 В).

### **5.1 Анализ условий труда сотрудников**

Насосная станция – это замкнутое помещение, в котором необходимо создать условия для работы обслуживающего персонала. Насосная станция предназначена для ТЭЦ. Она содержит машинный зал, ремонтный участок, агрегатную, сварочный пост, служебные и бытовые помещения.

Насосная станция получает электроснабжение от государственной районной электростанции (ГРЭС) по воздушной линии ЛЭП-35. Расстояние от ГРЭС до собственной ТП – 5 км. Трансформаторная подстанция (ТП) находится вне помещения насосной станции на расстоянии 10 км. Потребители электроэнергии по надёжности относятся ко 2 и 3 категории. Количество рабочих смен – 3.

Основными потребителями являются мощные автоматизированные насосные агрегаты. Перечень и классификация помещений выполнены в соответствии с ССБТ.

Насосы с их приводами являются сильными источниками тепла в помещении, схема помещения насосной станции (см.рисунок 5.1). Например, некоторые части насосной установки (электродвигателя) нагреты постоянно свыше 100 °С. Эти источники тепла достаточно серьезно влияют на микроклимат внутри насосной станции.

В летние месяцы работы насосной станции температура воздуха в помещении может достигать уровня, при котором невозможен комфортный и производительный труд человека. К тому же в любом помещении необходима периодическая замена воздуха.

В проекте необходимо реализовывать вентиляцию на основании опыта уже устроенных систем вентиляции на уже существующих насосных станциях.

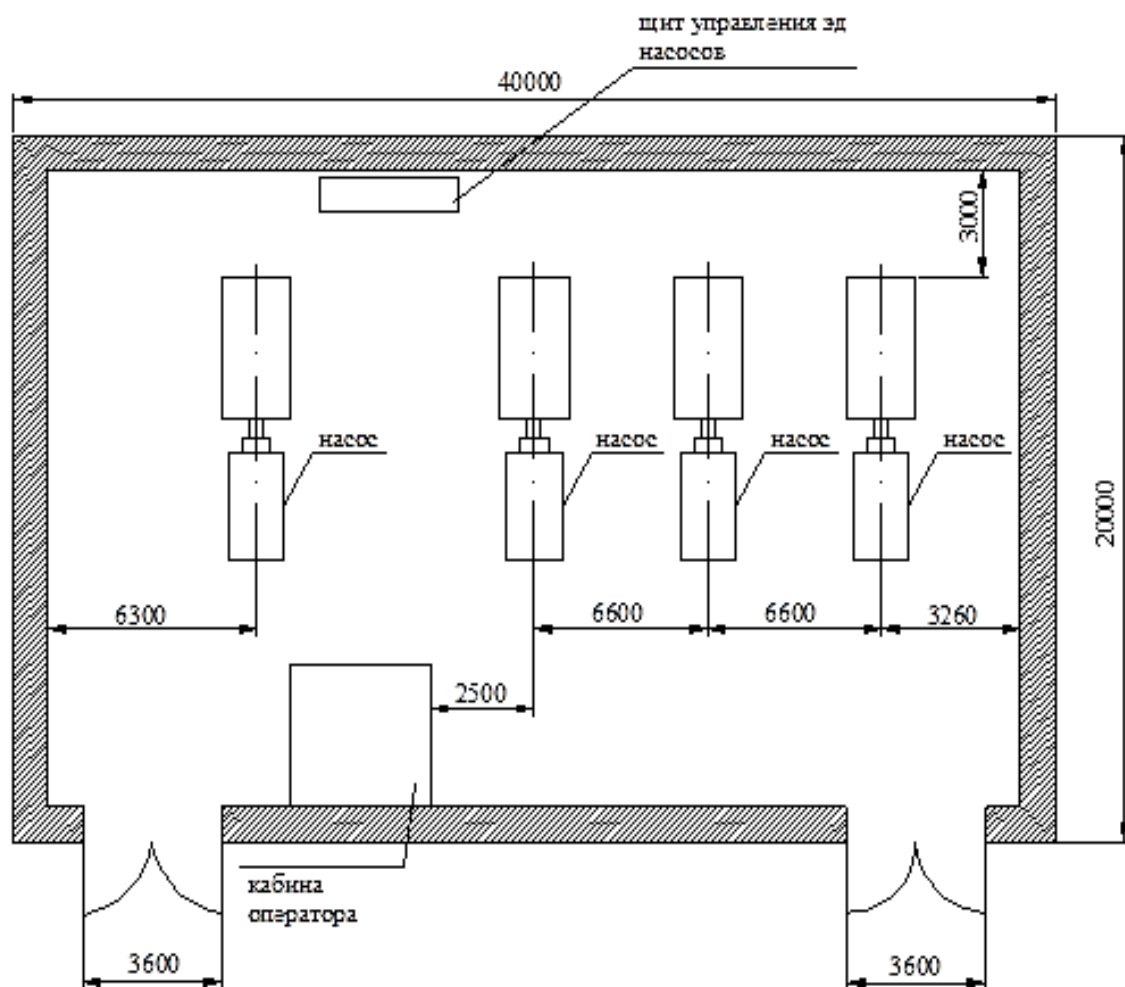


Рисунок 5.1 – Схема помещения насосной станции

Таблица 5.1 – Оптимальные нормы микроклимата на рабочем месте оператора

Период года	Категория работ	Температура воздуха, 0С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	IIa	19-21	40-60	0,1
Теплый		20-22	40-60	0,2

Таблица 5.2 – Допустимые нормы микроклимата на рабочем месте оператора

Период года	Категория работ	Температура воздуха, 0С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	IIa	17-23	15-75	0,1-0,3
Теплый		18-27	15-75	0,1-0,4

При температурах воздуха  $25^{\circ}\text{C}$  и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии со следующими требованиями:

максимально допустимые величины относительной влажности воздуха не должны выходить за пределы:

70% - при температуре воздуха 25° С;

65% - при температуре воздуха 26° С;

60% - при температуре воздуха 27° С;

55% - при температуре воздуха 28° С.

При температурах воздуха 26 – 28° С скорость движения воздуха в теплый период года принимается в соответствии с следующими требованиями: скорости движения воздуха, для теплого периода года, необходимо соответствовать диапазону 0,2 – 0,4 м/с – при категории работ Па.

При обеспечении допустимых величин микроклимата на рабочих местах: перепад температуры воздуха по высоте не допустим более 3° С; допустимый перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены при категории работ Па – 5° С.

Запуск насосов производится при открытых задвижках на напорном водопроводе. Обслуживание насосов и задвижек производится с пола.

Сбор дренажных вод принят через трап в бытовую канализацию насосной станции. В качестве меры защиты от гидравлического удара, вызываемого внезапным выключением насосов, необходимо предусмотреть установку клапана гасителя в первом колодце на напорном водопроводе.

Вокруг здания насосной станции обязательно наличие зоны санитарной охраны, огражденная забором и озелененная.

Граница зоны предусматривается на расстоянии 15 м в соответствии со СНИП 2.04.02-84.

В зоне насосных станций присутствуют шумы и вибрации:

- механические (из-за неуравновешенности движущихся, в частности, вращающихся масс, ударов в сочленениях, стука в зазорах и т.п.);

- аэрогидродинамические (при впуске–выпуске газа компрессоров, из-за образования вихрей и неоднородностей в потоках газа и жидкости в вентиляторах и насосах, автоколебаний в водоразборных кранах);

- электромагнитные (у электродвигателей, трансформаторов).

Имеются две основные группы средств снижения шума и вибрации оборудования в жилых и общественных зданиях – в источнике возникновения и на пути распространения. Необходимо правильно сочетать эти средства.

При проектировании зданий снижение шума и вибрации в источнике обеспечиваются применением малошумного оборудования и выбором правильного (расчетного) режима его работы, при строительстве и эксплуатации зданий – технической исправностью оборудования. Рабочее место оператора для обеспечения производственной деятельности обязательно оборудуется креслом (стулом, сиденьем) с регулируемым наклоном спинки и высотой сиденья.

Предельно допустимые значения вибрации рабочих мест категории III – технологической типа "А" приведены в таблице 5.3.

Эргономические требования при выполнении работ сидя и стоя приведены в ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 12.2.03

Таблица 5.3 – Предельно допустимые значения вибрации рабочих мест категории III – технологической типа "А"

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям $X_0, Y_0, Z_0$							
	Виброускорения				Виброскорости			
	м/кВ.с		дБ		м/с*10 <sup>-2</sup>		дБ	
	1/3 окт.	1/1окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/31окт.
1,6	0,089		99		0,89		105	
2,0	0,079	0,14	98	103	0,63	1,30	102	108
2,5	0,070		97		0,45		99	
3,15	0,063		96		0,32		96	
4,0	0,056	0,10	95	100	0,22	0,45	93	99
5,0	0,056		95		0,18		91	
6,3	0,056		95		0,14		89	
8,0	0,056	0,10	95	100	0,11	0,22	87	93
10,0	0,070		97		0,11		87	
12,5	0,089		99		0,11		87	
16,0	0,110	0,20	101	106	0,11	0,20	87	92
20,0	0,140		103		0,11		87	
25,0	0,180		105		0,11		87	
31,5	0,220	0,40	107	112	0,11	0,20	87	92
40,0	0,280		109		0,11		87	
50,0	0,350		111		0,11		87	
63,0	0,450	0,79	113	118	0,11	0,20	87	92
80,0	0,560		115		0,11		87	

Таблица 5.3 – Предельно допустимые значения вибрации рабочих мест категории III – технологической типа "А"

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям $X_0, Y_0, Z_0$							
	Виброускорения				Виброскорости			
	м/кВ.с		дБ		м/с*10 <sup>-2</sup>		дБ	
	1/3 окт.	1/1окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/31окт.
1,6	0,089		99		0,89		105	
2,0	0,079	0,14	98	103	0,63	1,30	102	108
2,5	0,070		97		0,45		99	
3,15	0,063		96		0,32		96	
4,0	0,056	0,10	95	100	0,22	0,45	93	99
5,0	0,056		95		0,18		91	
6,3	0,056		95		0,14		89	
8,0	0,056	0,10	95	100	0,11	0,22	87	93
10,0	0,070		97		0,11		87	
12,5	0,089		99		0,11		87	
16,0	0,110	0,20	101	106	0,11	0,20	87	92
20,0	0,140		103		0,11		87	
25,0	0,180		105		0,11		87	
31,5	0,220	0,40	107	112	0,11	0,20	87	92
40,0	0,280		109		0,11		87	
50,0	0,350		111		0,11		87	
63,0	0,450	0,79	113	118	0,11	0,20	87	92
80,0	0,560		115		0,11		87	

Для работы сидя, рабочее место машиниста должно иметь кресло (стул, сиденье) с регулируемым наклоном спинки и высотой сиденья. Эргономические требования при выполнении работ сидя и стоя приведены в ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 12.2.033-78.

Для обеспечения необходимых допустимых значений опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте машиниста применена кабина, позволяющая создать заданные параметры освещенности, микроклимата, и защитить от вредного воздействия повышенного шума.

## 5.2 Расчет микроклимата воздухообмена в насосной станции

При выработке требований к системам общеобменной вентиляции необходимо исходить из необходимости удаления из производственного помещения всех присутствующих вредностей, т. е. избытков тепла, влаги, паров газов и пыли. Системе вентиляции необходимо обеспечивать требуемую кратность воздухообмена

$$n = \frac{L_b}{V_n}, \quad (5.1)$$

где  $L_b$  – количество воздуха, поступающего (или удаляемого) в помещение,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  
 $V_n$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ .

В насосных станциях за счет тепловыделений производственного оборудования могут иметь место значительные избытки тепла (разность между тепловыделениями в помещении и теплоотдачей через стены, окна, двери и т. д.), удаление которых прежде всего должны обеспечить системы вентиляции. При наличии теплоизбытков количество воздуха, которое необходимо удалить из помещения [15].

$$L_b = \frac{Q_{\text{изб}}}{C_b \cdot \Delta t \cdot \gamma_b}, \quad (5.2)$$

где  $Q_{\text{изб}}$  – избыточное тепло,  $\text{ккал}/\text{ч}$ ;  
 $C_b$  – теплоемкость воздуха ( $0,24 \text{ ккал}/\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C}$ );

$$\Delta t = t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}}, \quad (5.3)$$

где  $t_{\text{ВЫХ}}$  – температура воздуха выходящего из помещения,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{ВХ}}$  – температура воздуха, поступающего в помещение,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $\gamma_b = 1,206 \text{ кг}/\text{м}^3$  - удельная масса приточного воздуха;

Величина  $\Delta t$  при расчетах выбирается в зависимости от теплонапряженности воздуха

$$Q_n = \frac{Q_{\text{изб}}}{V_n}. \quad (5.4)$$

Если теплонапряженность воздуха  $Q_H \leq 20$  ккал/м<sup>3</sup> ч, то принимают  $\Delta t = 6^\circ \text{C}$ , а при  $Q_H > 20$   $\Delta t = 8^\circ \text{C}$ .

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{об}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{р}} - Q_{\text{отд}},$$

где  $Q_{\text{об}}$ ,  $Q_{\text{осв}}$ ,  $Q_{\text{л}}$  - тепло, выделяемое производственным оборудованием, системой искусственного освещения помещения и работающим персоналом (людьми) соответственно, ккал/ч;

$Q_{\text{р}}$  – тепло, вносимое в помещение солнцем (солнечная радиация), ккал/ч;

$Q_{\text{отд}}$  – теплоотдача естественным путем, ккал/ч. Тепло, выделяемое производственным оборудованием,

$$Q_{\text{об}} = 860 \cdot P_{\text{об}} \cdot \eta, \text{ где } 860 \text{ тепловой эквивалент } 1 \text{ кВт/ч};$$

$P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт/ч;

$\eta$  – коэффициент перехода тепла в помещение.  $\eta = 0,75$

$$Q_{\text{об}} = 860 \cdot P_{\text{об}} \cdot \eta = 860 \cdot 114 \cdot 0,75 = 73530 \text{ ккал/ч}. \quad (5.5)$$

Тепло, выделяемое осветительными установками

$$Q_{\text{осв}} = 860 \cdot P_{\text{осв}} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \cos \alpha, \quad (5.6)$$

где  $P_{\text{осв}}$  – мощность осветительных установок, кВт;

$\alpha$  – КПД перевода электрической энергии в тепловую (для ламп накаливания 0,92-0,97, для вентиляторов 0,4, для другого оборудования 0,1-0,2);

$\beta$  – КПД одновременности работы аппаратуры в помещении (если работает вся аппаратура  $\beta = 1$ );

$\cos \varphi = 0,7 \div 0,8$  – коэффициент.

$$Q_{\text{осв}} = 860 \cdot 1400 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 0,7 = 84280 \text{ ккал/ч}. \quad (5.7)$$

Тепло, выделяемое людьми,  $Q_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot (q - q_{\text{исп}})$ , где  $K_{\text{л}}$  – количество работающих;  $(q - q_{\text{исп}})$  – явное тепло (определяется по графикам рисунка 2), ккал/ч;  $q$  – тепловыделение одного человека при данной категории работ I – III, (см. рис. 5.2), ккал/ч;  $q_{\text{исп}}$  – тепло, затраченное на испарение тела, ккал/ч.

В насосных станциях за счет тепловыделений производственного оборудования могут иметь место значительные избытки тепла (разность между тепловыделениями в помещении и теплоотдачей через стены, окна, двери и т. д.), удаление которых прежде всего должны обеспечить системы вентиляции. При наличии теплоизбытков количество воздуха, которое необходимо удалить из помещения.

При выработке требований к системам общеобменной вентиляции необходимо исходить из необходимости удаления из производственного помещения всех присутствующих вредностей, т. е. избытков тепла, влаги, паров газов и пыли.

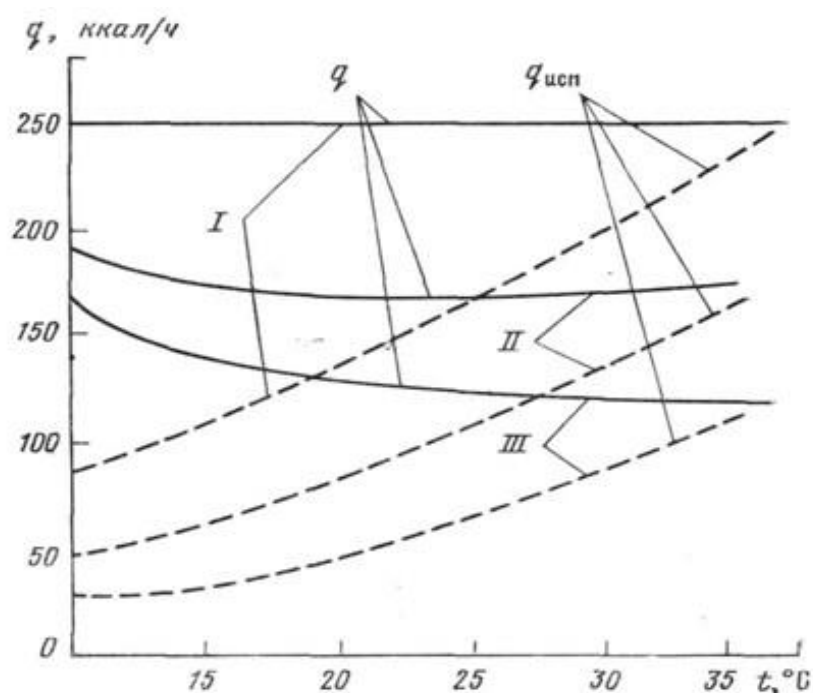


Рисунок 5.2 – Графики для определения тепловыделений человека

$$Q_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot (q - q_{\text{исп}}) = 6 \cdot (120 - 60) = 360 \text{ ккал/ч} . \quad (5.8)$$

Тепло, вносимое солнечной радиацией

$$Q_{\text{р}} = m \cdot F \cdot q_{\text{ост}} , \quad (5.9)$$

где  $m$  – количество окон в помещении;

$F$  – площадь одного окна,  $\text{м}^2$ ;

$q_{\text{ост}}$  – солнечная радиация через остекленную поверхность, т. е. количество тепла, вносимое за один час через остекленную поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$  (определяется по таблице 5.4), ккал/ч.

Таблица 5.4 – Солнечная радиация через остеклённую поверхность.

Частота вращения насоса	$N = 3000$ об/мин (50 Гц)
Масса насосного агрегата	$M = 115$ кг
Диаметр гибких вставок: на всасывании	$d_1 = 65$ мм
на нагнетании	$d_2 = 50$ мм

$$Q_{\text{р}} = 2 \cdot 172 \cdot 140 = 48160 \text{ ккал/ч} , \quad (5.10)$$

Если нет дополнительных условий, то в помещениях с большими теплоизбытками можно считать, что теплоотдача естественным путем через конструкции помещения приблизительно равна количеству тепла, вносимого



в помещения солнечной радиацией через окна, т. е.  $Q_{отд} = Q_p$ . Для теплого периода года при расчетах можно принять  $Q_{отд} = 0,206330$ .

Отсюда

$$Q_{изб} = 73530 + 84280 + 360 + 48160 - 48160 = 158170 \text{ ккал/ч,}$$

для холодного времени

$$Q_{изб} = 75530 + 84280 + 360 + 48160 = 206330 \text{ ккал/ч.}$$

для теплого времени

Кратность воздухообмена находим из полученных данных

$$Q_n = \frac{Q_{изб}}{V_n} = \frac{206330}{21600} = 36,84 \text{ ккал/м}^3, \quad (5.11)$$

Отсюда  $\Delta t = 6^\circ \text{C}$ .

$$L_b = \frac{Q_{изб}}{C_b \cdot \Delta t \cdot \gamma_b} = \frac{206330}{0,24 \cdot 8 \cdot 1,206} = 89107 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.12)$$

$$n = \frac{89107}{5600} = 15,9. \quad (5.13)$$

С учётом полученных данных для поддержания соответствующей чистоты воздуха выбираем два кондиционера серии Mitsubishi Electric MSCGE20VB / MUH-GA20VB с расходом воздуха максимум –  $3020 \text{ м}^3/\text{ч}$ , минимум –  $1940 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

### 5.3 Расчет виброизоляции насосной станции

Рассчитать акустическую виброизоляцию центробежного насосного агрегата ПЭ-65-53, установленного на перекрытии из тяжелого железобетона ( $G = 550 \text{ кг/м}^2$ ) жилого дома категории Б.

Гибкие вставки расположены горизонтально, параллельно одна другой. Агрегат динамически отбалансирован.

Последовательность расчета:

Принимаем эксцентриситет вращающихся частей агрегата  $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Исходя из частоты вращения вентилятора (3000 об/мин), находим по таблице максимально допустимую амплитуду смещения центра масс агрегата

$$a_{доп} = 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (5.14)$$

Исходные данные представлены в таблице 5.5

Таблица 5.5 – Исходные данные

Частота вращения насоса	$N = 3000$ об/мин (50 Гц)
Масса насосного агрегата	$M = 115$ кг
Диаметр гибких вставок: на всасывании	$d_1 = 65$ мм
на нагнетании	$d_2 = 50$ мм

По таблице находим требуемую эффективность виброизоляции насосного агрегата  $\Delta L_{тр} = 26$  дБ.

По графику определяем допустимую частоту собственных колебаний в вертикальном направлении виброизолируемого агрегата при размещении его на железобетонном перекрытии  $z_{доп} f = 6,8$  Гц.

По графику определяем продольную динамическую жесткость гибких вставок.

$$K_{ГВ1} = 200000 \text{ Н/м},$$

$$K_{ГВ2} = 130000 \text{ Н/м}.$$

Определяем требуемую условную массу виброизолируемого агрегата  $M_{тр.усл.}$ , учитывая только продольную динамическую жесткость гибких вставок

$$M_{тр.усл.} = 0,00084 \cdot K_{ГВ} = 277 \text{ кг}, \quad (5.15)$$

где  $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ;

$n$  – количество виброизоляторов.

Определяем расчетную максимальную нагрузку на один виброизолятор по формуле

$$P_{\max.рас} = P_{ст} + 1,5 \frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot a_{доп}}{10g} \cdot P_{ст} = 708 \text{ Н}, \quad (5.16)$$

где  $P_{ст}$  – статическая нагрузка;

$f$  – основная расчетная частота вынуждающей силы агрегата, Гц;

$a_{доп}$  – максимально допустимая амплитуда смещения центра масс агрегата, м.

Определяем требуемую суммарную жесткость виброизоляторов в вертикальном направлении  $K_{зтр.}$  по формуле

$$K_{зтр.} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{zдоп}^2 \cdot M_{тр.} = 505146 \text{ Н/м}, \quad (5.17)$$

где  $f_{\text{доп}}$  – допустимая частота собственных колебаний виброизолированного агрегата в вертикальном направлении, Гц;

$M_{\text{тр}}$  – общая требуемая масса виброизолированного агрегата, кг и требуемую жесткость одного виброизолятора  $k_{\text{зтр}}$  в вертикальном направлении по формуле

$$k_{\text{зтр}} = \frac{K_{\text{зтр}}}{n} = 126286 \text{ Н/м}. \quad (5.18)$$

По нагрузке  $P_{\text{max,пас}}$  и  $k_{\text{зтр}}$ , пользуясь таблицей на рисунке 6, выбираем виброизолятор типа ВР-202. Для него  $P_{\text{max}} = 1000\text{Н}$ ,  $k_z = 50000\text{Н/м}$ .

Проверяем, удовлетворяет ли выбранный тип виброизолятора неравенствам:

$$750 > 708 \text{ Н}$$

$$50000 < 126286 \text{ Н/м}$$

Необходимые условия выполнены.

Определяем общую требуемую массу виброизолируемого агрегата, принимая  $K_x = 0,3 K_z$ .

$$M_{\text{тр}} = \mu \cdot (K_{\text{ГВ}} + K_{\text{В}}) = 327 \text{ кг}, \quad (5.19)$$

где  $\mu = 0,00084\text{с}^2$ ;

$K_{\text{В}}$  – суммарная динамическая жесткость виброизоляторов в направлении, параллельном продольной оси гибкой вставки, Н/м (при расположении одной гибкой вставки вертикально, а второй горизонтально учитывается общая жесткость виброизоляторов в вертикальном направлении). При горизонтальном расположении двух гибких вставок учитывают общую жесткость виброизоляторов в горизонтальном направлении.

Определяем уточненную статическую нагрузку на один виброизолятор, (Н) при  $M_{\text{тр}} = 327 \text{ кг}$ .

$$P_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{тр}} \cdot g}{4} = 801 \text{ Н}. \quad (5.20)$$

Рассчитываем уточненную максимальную нагрузку на один виброизолятор

$$P_{\text{max,пас}} = P_{\text{ст}} + 1,5 \frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot a_{\text{доп}}}{10g} \cdot P_{\text{ст}} = 834 \text{ Н}. \quad (5.21)$$

Определяем уточненные значения требуемой суммарной жесткости виброизоляторов в вертикальном направлении  $K_{\text{зтр}}$  и требуемой жесткости одного виброизолятора в вертикальном направлении  $k_{\text{зтр}}$ .

$$K_{zтр} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{zдоп}^2 \cdot M_{тр} = 596327 \text{ Н/м}, \quad (5.22)$$

$$k_{zтр} = \frac{K_{zтр}}{n} = 149080 \text{ Н/м}. \quad (5.23)$$

Выбранный ранее виброизолятора ВР-202 по новому значению  $P_{\max.рас}$  не удовлетворяет неравенствам  $P_{\max} \geq P_{\max.рас}$   $k_z \leq k_{zтр}$ . В соответствии по расчетным данным выбран тип виброизолятора ВР-203:

$$1500 > 834 \text{ Н}$$

$$100000 < 149080 \text{ Н/м}$$

Необходимые условия при виброизоляторах ВР-203 выполнены.

Определяем собственную частоту колебаний виброизолированного агрегата в вертикальном направлении, (Гц)

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z \cdot g}{P_{ст}}} = 5,6 \text{ Гц}, \quad (5.24)$$

где  $g = 9,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ;

Определяем величину эффективности акустической виброизоляции  $\Delta L$ , (дБ) по формуле:

$$\Delta L = 201g \left| \frac{f^2}{f_z^2} - 1 \right| = 37 \text{ дБ}, \quad (5.25)$$

где  $f$  - основная расчетная частота вынуждающей силы агрегата, Гц;

$f_z$  - собственная частота колебаний виброизолированного агрегата, в вертикальном направлении, Гц.

$$37 \text{ дБ} > 26 \text{ дБ} = \Delta L_{тр}. \quad (5.26)$$

Подобранная виброизоляция обеспечивает требуемую эффективность. Следует помнить, что пружинные виброизоляторы, обладая меньшей частотой  $f_0$ , обеспечивают большую виброизоляцию на низких частотах, чем другие виды виброизоляторов из эластичных материалов.

## 6 Экономическая эффективность внедрения вентиляционного двигателя с ШИМ

### 6.1 Достоинства применения ВД с ШИМ

Существуют различные способы управления производительностью вентиляторов и насосов дросселирование нагрузки, снижение единичной мощности агрегатов и увеличение их количества и т.д. Наиболее эффективным способом является регулирование скорости вращения.

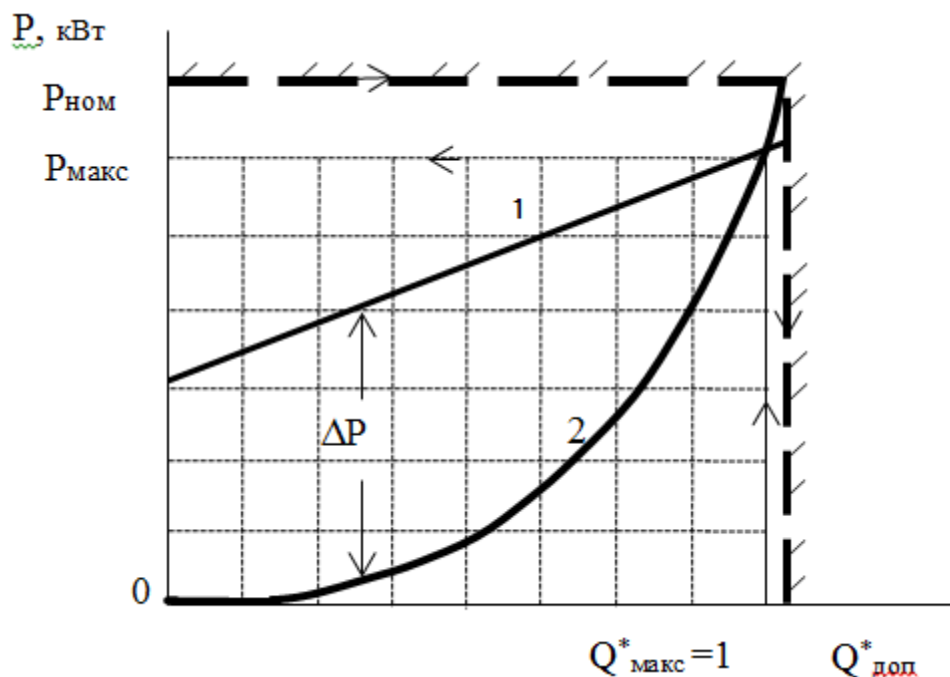


Рисунок 6.1 – График экономии мощности при использовании ВД с ШИМ взамен дросселя

На рисунке 6.1,  $\Delta P$  – экономия мощности при использовании вентиляционного двигателя с ШИМ (кривая 2), взамен синхронному двигателю с дросселем, которому соответствует характеристика 1. Для получения, например, половины полного расхода при регулировании скорости будет затрачено около 13% полной мощности, тогда как при дросселировании - около 75%. экономия составит примерно 60%.

Применение ВД с ШИМ на насосах и вентиляторах обеспечивает интегральное снижение потребляемой мощности на 25-40% и позволяет увеличить мощность энергоблока в среднем на 1-2% за счет исключения в водяных и воздушных трактах дросселей и заслонок, а также улучшения технологических процессов выработки электроэнергии, например, сжигания топлива. Поэтому для механизмов собственных нужд ТЭС непосредственно участвующих в процессе производства электроэнергии (прежде всего дымососы и дутьевые вентиляторы, питательные насосы и т.п.), должны

учитываться совокупно как фактор увеличения мощности энергоблока, так и фактор энерго и ресурсосбережения.

В состав вентильного двигателя входят стандартный или специальный синхронный электродвигатель, транзисторный или тиристорный преобразователь частоты, датчик положения ротора. По сути, это машина постоянного тока, где механический коллектор заменен статическим преобразователем. В таком электроприводе полностью сохраняются все достоинства машины постоянного тока, и отсутствуют недостатки, обусловленные наличием коллектора и щеток.

Не менее эффективно применение ВД в коммунальном хозяйстве. Переход от нерегулируемого синхронного электропривода насосов и вентиляторов в системах водо- и воздухоснабжения городских РТС, котельных и центральных тепловых пунктах (ЦТП) к регулируемому ВД с ШИМ позволяет экономить до 60% электроэнергии, а в системах водоснабжения - до 25% потребления холодной воды и до 15% горячей воды.

Экономия воды в системах водоснабжения связана с устранением при регулируемом электроприводе ненужных избытков давления (напора). Для существующих систем водоснабжения в коммунальной сфере каждая лишняя атмосфера (10 м в.ст.) вызывает за счет больших утечек дополнительные 7-9% потерь воды.

Наряду с изложенными составляющими энергосбережения, которые легко учитываются и оцениваются, применение ВД с ШИМ дает ряд дополнительных преимуществ:

- экономию тепла в системах горячего водоснабжения за счет снижения потерь воды, несущей тепло;
- возможность создавать при необходимости напор выше основного;
- уменьшение износа основного оборудования за счет плавных пусков, устранения гидравлических ударов, снижения напора: по имеющемуся опыту в коммунальной сфере количество мелких ремонтов основного оборудования снижается в два раза;
- снижение шума, что особенно важно при расположении насосов или вентиляторов вблизи жилых или служебных помещений;

## **6.2 Энергосбережение, достигаемое при использовании частотно-регулируемых электроприводов**

В подавляющем большинстве случаев электроприводы технологических насосных установок являются нерегулируемыми, что не обеспечивает режим рационального электропотребления.

Выбранные по максимуму производительности эти рабочие машины могут значительную часть времени работать с меньшей производительностью и со значительным удельным расходом энергии на транспорт перекачиваемого компонента.

Существующие в настоящее время системы нерегулируемого электропривода турбомашин с регулированием расхода дросселированием (задвижкой) не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощности при уменьшении расхода. Мощность, потребляемая турбомашинной (в кВт) определяется по формуле

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot g \cdot \rho}{\eta}, \quad (6.1)$$

где  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор, м;  $g = 9,8$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\rho$  – плотность перекачиваемого компонента,  $\text{кг}/\text{дм}^3$ ;  $\eta$  – КПД установки,  $\eta$  (соотв. буква) – КПД соответственно электродвигателя, турбомашин и преобразователя частоты.

Определим потребляемую мощность при регулировании расхода задвижкой для случая, когда привод турбомашин нерегулируемый. При работе в номинальном режиме (точка А рисунок 6.2), т.е. при номинальных значениях расхода  $Q$ , и напора  $H$ , мощность, потребляемая из сети, будет пропорциональна площади прямоугольника АВОС. Точка А номинального режима получается в результате пересечения характеристики турбомашин (кривая 1) с характеристикой гидравлической сети (кривая 3). Если требуется уменьшить расход до значения  $0,6Q$ , то с помощью задвижки нужно увеличить гидравлическое сопротивление сети, которой теперь будет соответствовать характеристика 4. Мощность, потребляемая из электрической сети, будет теперь пропорциональна площади прямоугольника EFOD.

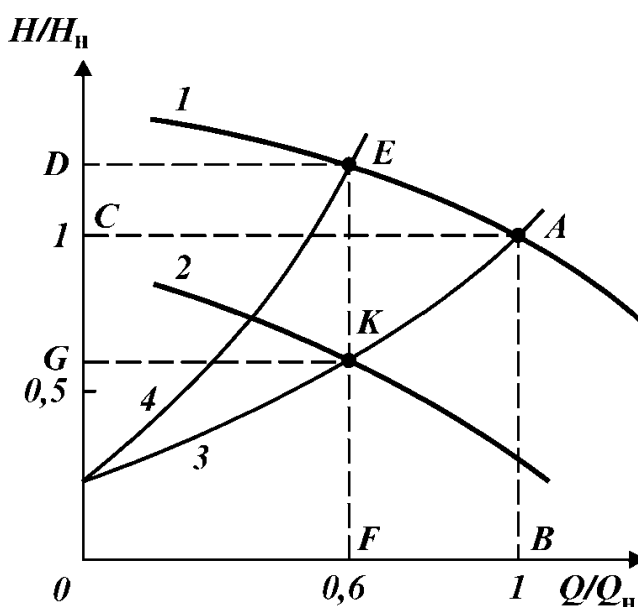


Рисунок 6.2 – Регулирование режима работы центробежного насоса

Расход можно уменьшить, не используя задвижку, а уменьшив частоту вращения приводного двигателя турбомашин. При этом получим

регулирующую характеристику турбомашин (кривая 2) и установившийся режим работы в точке К, полученной в результате пересечения характеристик 2 и 3. Мощность, потребляемая из сети, в этом случае будет пропорциональна площади прямоугольника KFOG. При применении регулируемого электропривода и отказе от регулирования задвижкой

получили снижение потребляемой мощности, пропорциональной площади прямоугольника EKGD.

Регулирование задвижкой является весьма неэкономичным способом регулирования расхода. Кроме того, при таком способе регулирования происходит увеличение напора (точка 0), что приводит к дополнительным утечкам и неблагоприятно сказывается на работе запорно-регулирующей аппаратуры.

Преобразование частоты связано с потерями энергии в выпрямителе и инверторе ПЧ. Возникает вопрос об определении границы регулирования дросселированием и применении частотно-регулируемого электропривода.

Поскольку КПД современных ПЧ достаточно высокий (0,96—0,98), то частотно-регулируемый электропривод экономичнее регулирования задвижкой при глубине регулирования давления  $a > (0,03+0,05)$ .

### 6.3 Расчет капитальных вложений ВД с ШИМ

Начальные затраты определяются путем расчета капитальных вложений, которые состоят из сметной стоимости преобразователя частоты с непосредственной связью, датчика положения ротора, стоимости монтажных работ, транспортно-заготовительных расходов и плановых накоплений монтажной организации. Наиболее дорогостоящими составляющими ВД являются преобразователь частоты. Преобразователь частоты рассчитан на 2500 кВт. Принимаем стоимость одного кВт оборудования за 400 USD. Соответственно стоимость преобразователя 1000000 USD, что по нынешнему курсу доллара в Казахстане составляет 335 млн. тг. Таким образом, сметная стоимость преобразователя при :

$$k_{\text{эп}} = n \cdot k_{\text{дпр}} + k_{\text{п}} = 4 \cdot 150000 + 335000000 = 335600000 \text{ тг}, \quad (6.2)$$

где  $n=4$  – количество двигателей на станции;

$k_{\text{дпр}}= 150000$  – стоимость датчика положения ротора, тенге;

$k_{\text{п}}= 335600000$  – стоимость преобразователя частоты, тенге

Стоимость монтажных работ вычисляется отдельно для преобразователя и рабочего механизма. Для преобразователя эту величину можно принять равной 6% от стоимости преобразователя  $k_{\text{п}}$ , для рабочего механизма – 5% стоимости преобразователя. Таким образом, стоимость монтажных работ:

$$k_{\text{мр}} = 0,11 \cdot k_{\text{п}} = 0,11 \cdot 335600000 = 36916000 \text{ тг}. \quad (6.3)$$



Найдем транспортно-заготовительные расходы, они составляют около 2% от суммы стоимости преобразователя и стоимости монтажных работ:

$$k_{\text{тзр}} = 0,02 \cdot (k_{\text{п}} + k_{\text{мр}}) = 0,02 \cdot (335600000 + 36916000) = 7450320 \text{ тг}$$

Найдем общие капиталовложения по внедрению системы ВД с ШИМ:

$$K = k_{\text{п}} + k_{\text{мр}} + k_{\text{тзр}} \cdot \quad (6.4)$$

$$K = 335600000 + 36916000 + 7450320 = 379966320 \text{ тг.} \quad (6.5)$$

#### 6.4 Расчет текущих годовых эксплуатационных издержек

Текущие годовые издержки на эксплуатацию

$$И = И_{\text{ФОТ}} + И_{\text{СН}} + И_{\text{М}} + И_{\text{Э}} + И_{\text{А}} + И_{\text{Н}} \cdot \quad (6.6)$$

где  $И_{\text{ФОТ}}$  – фонд оплаты труда (основная и дополнительная заработные платы); – социальный налог (11%);

$И_{\text{М}}$  – материальные затраты и запасные части (0,5% от капитальных вложений);

$И_{\text{Э}}$  – электроэнергия для производственных нужд;

$И_{\text{А}}$  – амортизационные отчисления (нормы амортизационных отчислений для отрасли 5-10%);

$И_{\text{Н}}$  – накладные расходы (косвенные расходы, сюда можно отнести все неучтенные расходы – управленческие, хозяйственные, затраты за обучение кадров, транспортные расходы). Обычно это 15 % от суммы всех остальных затрат.

Для вычисления заработной платы в таблице 6.1 приведем среднемесячные оклады обслуживающего персонала.

Таблица 6.1 – Среднемесячные оклады обслуживающего персонала

Список персонала	Кол-во	Должностная ставка 1-го рабочего, тенге	З/пл в год 1-го рабочего, тенге
Мастер	3	70000	840000
Машинист 5-го разряда	4	50000	600000
Слесарь	3	55000	660000
Электрик	4	50000	600000
<b>Итого</b>	<b>14</b>		<b>2700000</b>

Основная заработная плата за год составит:

$$I_{3П} = 3 \cdot 840000 + 4 \cdot 600000 + 3 \cdot 660000 + 4 \cdot 600000 = 9300000 \text{ тенге}$$

Издержки на социальный налог

$$I_{СН} = (I_{3П} - 10\% \cdot I_{3П}) \cdot 11\% , \quad (6.7)$$

где  $10\% \cdot I_{3П}$  – издержки на пенсионный фонд ( $I_{ПФ}$ ).

$$I_{СН} = (9300000 - 930000) \cdot 0,11 = 920700 \text{ тенге}$$

Издержки на материальные затраты и запасные части (0,5% от капитальных вложений)

$$I_M = K \cdot 0,005 = 335600000 \cdot 0,005 = 1678000 \text{ тг.} \quad (6.8)$$

Определение издержек годовых затрат на электроэнергию с учётом потерь (для системы ВД с ШИМ):

$$I_{Э} = W \cdot I_{уэ} \cdot N , \quad (6.9)$$

где  $W$  – годовое потребление электроэнергии ВД с ШИМ

$I_{уэ}$  – тариф на электроэнергию

$I_{уэ} = 16,02 \text{ тенге/кВт}\cdot\text{ч}$

$N$  – количество двигателей (в нашем случае  $N = 4$ )

Потери электроэнергии:

$$\Delta W = \Delta P_c \cdot T_r = 432,541 \cdot 1404 = 607287,564 \text{ кВт} , \quad (6.10)$$

где  $P_c$  – средние потери активной мощности рассматриваемого элемента электропривода;

$T_r$  – годовое время работы ( $T_M - 10\%T_M$ ).

Средние потери активной мощности:

$$\Delta P_c = 4 \cdot \Delta P_M \cdot \tau = 4 \cdot 138,635 \cdot 0,78 = 432,541 \text{ кВт} , \quad (6.11)$$

где  $\Delta P_M$  – максимальные потери активной мощности;

$\tau$  – относительное время использования максимума потерь;

$$\tau = 0,7 \cdot \frac{T_M}{T_r} , \quad (6.12)$$

где  $T_M$  – годовое число часов использования максимума нагрузки, 5 дней в неделю по 6 часов.

$$T_m = 5 \cdot 6 \cdot 52 \frac{\text{ч}}{\text{год}}, \quad (6.13)$$

$$\tau = 0,7 \cdot \frac{1560}{1560 - 0,1 \cdot 1560} = 0,78.$$

Максимальные потери активной мощности определяются:

$$\Delta P_m = \Delta P_{xx} + \Delta P_{нн} \cdot K_3^2 = 64,075 + 116,5 \cdot 0,8^2 = 138,635 \text{ кВт}, \quad (6.14)$$

где  $P_{xx}$  – потери холостого хода

$$\Delta P_{xx} = 0,55 \cdot \Delta P_{нн} = 0,55 \cdot 116,5 = 64,075 \text{ кВт}, \quad (6.15)$$

где  $P_{нн}$  – номинальные загрузочные потери

$$\Delta P_{нн} = 0,67 \cdot \Delta P_n = 0,67 \cdot 173,91 = 116,5 \text{ кВт}, \quad (6.16)$$

$K_3$  – коэффициент загрузки,  $K_3=0,8$

$$\Delta P_n = P_n \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \cdot K_3 = 2500 \cdot \frac{1-0,92}{0,92} \cdot 0,8 = 173,91 \text{ кВт}, \quad (6.17)$$

$P_n = 2500$  кВт (по паспортным данным).

Годовое потребление электроэнергии:

$$W = T_m \cdot 4 \cdot P_n = 1560 \cdot 4 \cdot 2500 = 15600000 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{год}}. \quad (6.18)$$

Годовое потребление электроэнергии плюс потери:

$$\Delta W_n = W + \Delta W = 15600000 + 607287,564 = 16207287,564 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

Годовые издержки на потребление электроэнергии

$$I_э = W \cdot I_{yэ} \cdot N = 15600000 \cdot 16,02 \cdot 4 = 999648000 \text{ тенге}. \quad (6.19)$$

Издержки на амортизацию

$$I_A = K \cdot 0,05 = 335600000 \cdot 0,05 = 16780000 \text{ тенге}. \quad (6.20)$$

Издержки на накладные расходы

$$I_n = 0,15 \cdot (I_{зп} + I_{сн} + I_m + I_A + I_э). \quad (6.21)$$

$$I_H = 0,15 \cdot (9300 + 920,7 + 1678 + 16780 + 999648) = 0,15 \cdot 1028326,7 \\ = 154249,005 \text{ тыс. тенге}$$

Найдем текущие годовые издержки на эксплуатацию

$$I = I_{\text{ФОТ}} + I_{\text{СН}} + I_M + I_{\text{Э}} + I_A + I_H. \quad (6.22)$$

$$I = 9300 + 920,7 + 1678 + 999648 + 16780 + 154249,005 \\ = 1182575,705 \text{ тыс. тенге}$$

## 6.5 Расчет экономической выгоды за счет внедрения системы ВД с ШИМ

Автоматизация электропривода сетевого насоса при помощи ВД с ШИМ позволит значительно сократить потребляемую электроэнергию, а также сократить численность персонала, обслуживающего СН, что в свою очередь приведет к уменьшению фонда оплаты труда. Так как регулирование подачи и напора воды будет осуществляться автоматически, а не вручную (как это было при регулировании дросселировании), СН могут обслуживать меньшее количество персонала, а именно необходимость в работе машинистов отпадает.

Рассчитаем годовую заработную плату персонала, обслуживающего СН до и после модернизации.

Определяем заработную плату до модернизации за год:

$$I_{\text{ЗП}} = 12 \cdot (I_{\text{ЗПМ}} + I_{\text{ЗПМаш}} + I_{\text{ЗПС}} + I_{\text{ЗПЭ}}). \quad (6.23)$$

$$I_{\text{ЗП}} = 12 \cdot (3 \cdot 70 + 4 \cdot 50 + 3 \cdot 55 + 4 \cdot 50) = 9300 \text{ тыс. тенге}$$

где  $I_{\text{ЗПМ}}$  – среднемесячная заработная плата мастера (70000Тг);  
 $I_{\text{ЗПМаш}}$  – среднемесячная заработная плата машиниста (50000Тг);  
 $I_{\text{ЗПС}}$  – среднемесячная заработная плата слесаря (55000Тг);  
 $I_{\text{ЗПЭ}}$  – среднемесячная заработная плата электрика (50000 Тг);

Рассчитаем годовую заработную плату  $I_{\text{ЗП1}}$ , персонала обслуживающего насосную станцию после модернизации

$$I_{\text{ЗП1}} = 12 \cdot (I_{\text{ЗПМ}} + I_{\text{ЗПС}} + I_{\text{ЗПЭ}}), \quad (6.24)$$

$$I_{\text{ЗП1}} = 12 \cdot (3 \cdot 70 + 3 \cdot 55 + 4 \cdot 50) = 6900 \text{ тыс. тенге}.$$

Подсчитаем экономию на зарплате по выражению

$$\Delta I_{3П} = I_{3П} - I_{3П1} = 9300 - 6900 = 2400 \text{ тыс. тенге} . \quad (6.25)$$

Издержки на социальный налог:

$$I_{СН1} = (6900 - 690) \cdot 0,11 = 683,1 \text{ тыс. тенге} , \quad (6.26)$$

$$\Delta I_{СН} = 920,7 - 683,1 = 237,6 \text{ тыс. тенге} .$$

Применение автоматизированного электропривода СН с помощью ВД с ШИМ позволяет обеспечить экономию электроэнергии 20-40%. [40]

Рассчитаем годовую экономию электроэнергии при внедрении регулируемого электропривода с системой ВД с ШИМ после модернизации

$$\Delta I_{Э} = I_{Э} \cdot 0,4 = 999648 \cdot 0,2 = 199929,6 \text{ тыс. тенге/ год} . \quad (6.27)$$

В целом экономия средств за счет модернизации электропривода ЦН получается равной

$$\Sigma_{ЭК} = \Delta I_{3П} + \Delta I_{Э} + \Delta I_{СН} , \quad (6.28)$$

$$\Sigma_{ЭК} = 2400 + 199929,6 + 237,6 = 202567,2 \text{ тыс. тенге / год} .$$

Определим приблизительный срок окупаемости внедрения ВД с ШИМ в электропривод СН:

$$T = \frac{K}{\Sigma_{ЭК}} = \frac{379966320}{202567000} = 1,87 \approx 1,9 . \quad (6.29)$$

В результате проделанных расчетов пришли к выводу, что денежный поток поступает за счет экономии денежных средств на заработной плате обслуживающего персонала и экономии электроэнергии.

Установка ВД с ШИМ позволяет нам отказаться от услуг машинистов СН, при этом мы экономим на их заработной плате 2400 тысяч тенге. Также автоматизированный электропривод экономит до 20% [40] электроэнергии, что составляет 199929,6 тысяч тенге, при этом суммарная экономия составляет 202567,2 тысяч тенге в год.

Технико-экономический расчет модернизации насосной станции наглядно показывает, что потребуются капитальные вложения в сумме 379966,320 тыс. тенге, которые окупаются в течении 1,9 года в результате экономии энергии за счет регулируемого электропривода и экономии на заработной плате машинистов.

## Заключение

В дипломном проекте был рассмотрен вопрос разработки вентильного двигателя на базе преобразователя частоты с непосредственной связью и широтно-импульсной модуляцией, а также возможности применения подобного привода в мощных насосных установках. Был обоснован метод формирования выходного напряжения, и дано определение основных параметров вентильного двигателя. На основе схемы замещения определили коэффициент мощности, потери и КПД двигателя. Рассмотрено построение системы управления вентильным двигателем на основе микропроцессорной техники. Дано экспериментальное определение параметров двигателя и моделирование системы.

Была написана программа регулятора. Реализовано проведение испытаний элементов системы вентильного двигателя. На основании уравнений (4.5) и параметров, рассчитанных в разделе 3, в программной среде MATLAB была построена структурная модель ВД. Модель, составленная на основании блоков Simulink.

Внедрение ВД с ШИМ в автоматизации насосных установок отвечает всем современным требованиям и позволяет существенно экономить электроэнергию, снизить эксплуатационные затраты на обслуживание электропривода и турбомашин, повысить производительность труда, увеличить срок службы двигателей и насосов, избежать опасных последствий гидравлических ударов, а также снизить нагрузку на персонал.

Также в проекте были рассмотрены вопросы охраны труда и техники безопасности. Был проведен анализ условий труда сотрудников. Был произведен расчет микроклимата воздухообмена в насосной станции, расчет виброизоляции насосной станции. Экономический эффект внедрения системы ВД с ШИМ был подтвержден технико-экономическим расчетом.

## Список литературы

1. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
2. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Ларионов В.Н. и др. Проблема создания регулируемых электроприводов с вентильными двигателями на основе синхронной машины и зависимого инвертора тока ( напряжения). – Автоматизированный электропривод ( под общей ред. И.И. Петрова, М.М. Соколова, М.Г. Юнькова), М. : Энергия, 1980., С.106 – 113.
3. Зиннер Л.Я., Скороспешкин А.И. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока. – М.: Энергоиздат. – 1981.
4. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. – М.: Энергоатомиздат. – 1985 – С.225.
5. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. / Под ред. Р.С. Сарбатова. – М.: Энергия. – 1980.
6. Алексеев С.Б., Рогозовский Л.А., Туганбаев И.Т. Стабилизация выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты. - // Электрификация, электромеханика и прикладная электротехника. – 1982 - С.48 – 50.
7. А.с. № 1309240 СССР Способ регулирования частоты вращения вентильного электродвигателя / С.Б.Алексеев (СССР). – Оpubл. в Б.И. – №17 – 1987.
8. Барков В.А. Полупроводниковые преобразователи для управления электрическими машинами переменного тока. – Л.: ЛПИ. – 1982.
9. Бернштейн И.Я. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока. – М.: Энергия, 1968. – С.88.
10. Богрый В.С., Русских А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. – М.: Энергия, 1972.
11. Бутаев Ф.И., Эттингер Е.Л. Вентильный электропривод. – М.: Госэнергоиздат. – 1951.
12. Бутаев Ф.И. Вентильный двигатель с отдельным питанием фаз статора – // Электротехника. – №7 – 1971 – С.6 – 8.
13. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. - М.: Госэнергоиздат. – 1960.
14. Вейнгер А.М. и др. О возможностях регулируемого электропривода с синхронным двигателем – // Электричество. – №9 – 1971.
15. Ганага Е.Ф., Шин Е.И., Алексеев С.Б. Режим работы вентильного двигателя с искусственной коммутацией – // Электротехника. – Вып.3. – 1976. – С.54 – 57.
16. Глазенко Т.А., Гончаренко Р.Б. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах. – Л.: Энергия. – 1969.
17. Глебов И.А., Левин В.Н., Ровинский Н.А. Вентильные преобразователи в цепях электрических машин. – Л: Наука. - 1971.

18. Данилевич Я.Б., Кашарский З.Г. Добавочные потери в электрических машинах. – М.: Госэнергоиздат. – 1963.
19. Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: теория, характеристики, применение / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
20. Елисеев В.Н., Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергоатомиздат. – 1983.
21. Зиновьев Г.С., Попов В.И. Способ управления непосредственным преобразователем частоты с искусственной коммутацией – // Преобразовательная техника. – Новосибирск, НЭТИ.- 1972. – С.88 – 95.
22. Иньков Ю.М. Вентильные преобразователи частоты с непосредственной связью. – М.: Информэлектро. – 1974.
23. Карташов Р.П., Кулиш А.К., Чехет Э.М. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. – Киев.: Техника. – 1979.
24. Касьянов В.Г. Электрическая машина двойного питания, как общий случай машины переменного тока – // Электричество. – № 21 – 22. – 1981. – С.58 – 75.
25. Копылов И.П., Фрумин В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. - М.: Энергоатомиздат. – 1986.
26. Овчинников И.Е. Коммутационная устойчивость, электромагнитный момент и главные размеры вентильного двигателя - // Сб. научных трудов ВНИИЭлектромаш. – Л.: Наука. – 1981. – С.3- 21.
27. Рытвин А.Ф., Семенов В.В. Анализ электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе с искусственной коммутацией для вентильного двигателя – // Преобразовательная техника. – Новосибирск. – 1972. – С.123 – 130.
28. Рытвин А.Ф. Схемы и регулирование преобразователей с искусственной коммутацией для вентильных двигателей. – В кн. Современные задачи преобразовательной техники. – Киев.: Наукова думка. –1975.- С.140 – 143.
29. Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с широтно - импульсной модуляцией. - М.: Энергия. - 1968.
30. Структура систем управления автоматизированным электроприводом / О.П. Ильин, В.И. Панасюк, Ю.Н. Петренко и др. – Минск.: Наука и техника. – 1978.
31. Состояние и перспективы внедрения электроприводов с вентильным двигателем ( Б.С. Александровский, Н.И. Эпштейн, Е.Л. Эттингер и др. – в кн.: Автоматизированный электропривод / Под ред. И.И. Петрова, М.М. Соколова, М.Г. Юнькова. – М.: Энергия. - 1980.
32. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. / Пер. с англ. – Л.: Энергия. – 1973.
33. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконверторы. – Минск.: Наука и техника. – 1973.



34. Фрумин В.Л. Метод ориентированных координат для анализа энергетических процессов в вентильных двигателях. – В кн.: Бесконтактные электрические машины. – Рига.: Зинатне. – Вып. 21. - 1982. – С.6 – 20.
35. Фрумин В.Л. Динамические характеристики вентильных двигателей. - В кн.: Бесконтактные электрические машины. - Рига.: Зинатне. - Вып. 21. - 1982. - С.21 - 35.
36. Эттингер Е.Л., Бернштейн А.Я. Особенности характеристик систем регулируемого электропривода с вентильными двигателями. - В кн.: Автоматизированный электропривод / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат. – 1986.
37. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центра «Академия», 2004. – 256 с.
38. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. ил.
39. Герман–Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб., КОРОНА принт, 2001 г. – 320 с.
40. Шакарян Ю.Г. Ильинский Н.Ф. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно – регулируемого электропривода. – М.: Москва 1997 г. – 13 с.

## Приложение А

### Программа регулятора

Таблица 3.1 А – Программа регулятора

Адрес	Метка	Мнемокод	Кол-во цик	Комментарий
0000		JMP N1	2	; БП к начальной программе
1				
2			2	
3		JMP INT	2	; БП к ПП обработки прерываний
4				
5	NI:	MOV A,#FBH	2	; Установка режима K580BI53:
6				
7		OUTL P2, A	2	
8		MOV A, #32H	2	
9				
A		OUTL BUS, A	2	
B		MOV A,#FFH	2	
C				$\tau=12$
D		OUTL P2, A	2	
E		CLR A	1	; Обнуление ячеек ОЗУ
F		MOV R0,	2	
10		#3FH		
11	N2:	MOV @R0, A	1	
12		DJNZ R0, N2	2	$\tau=7$
13				
14		EN I	1	; разрешение прерываний
15	REG:	MOV A, #EF	2	; ввод значения $N_3^0$ [n]:LOW→04H; HIG→05H
16				
17		OUTL P2, A	2	
18		INS A, BUS	2	
19		MOV R4, A	1	
1A		CLR A	1	
1B		MOV R5, A	1	
1C		MOV A, #DF	2	; ввод значения $N_{oc}^1$ [n]:LOW→06H; HIG→07H
1D				
1E		OUTL P2, A	2	
1F		MOV A, #FF	2	
20				
21		OUTL P2, A	2	$\tau=26+10\mu s$
22	L1	IN A, P1	2	
23		JBB L2	2	
24				
25		JMP L1	2	
26				
27	L2	MOV A, #FF	2	
28				
29		OUTL P1, A	2	
2A		INS A, BUS	2	
2B		MOV R6, A	1	
2C		IN A, P1	2	
2D		ANL A, #CO	2	
2E				

Продолжение таблицы 3.1 А

2F		MOV R7, A	1	
30		MOV R0,	2	; Вычисление $\Delta^{\omega} = N_3^0 [n] - N_{oc}^0 [n]$ ,
31		#04H		
32		MOV R1,	2	Результат: LOW→26H, HIG→27H $\tau=2$
		#1AH		
33				
34		CALL SUB		
35				
36		MOV R0,	2	
37		#27H		
38		CALL ZAG1	2	
39				
3A		MOV R0,	2	; вычисление $\Delta N_3^0 = N_3^0 [n] - N_3^0 [n-1]$
3B		#04H		
3C		MOV R1,	2	
3D		#22H		
3E		CALL SUB	2	
3F				
40		MOV R0,	2	
41		#29H		
42		CALL ZAG1	2	
43				
44		MOV R0,	2	; вычисление $\Delta N_{oc}^0 = N_{oc}^0 [n] - N_{oc}^0 [n-1]$ , Результат: LOW→2AH; HIG→2BH
45		#1AH		
46		MOV R1,	2	
47		#20H		
48		CALL SUB	2	
49				
4A		MOV R0,	2	
4B		#28H		
4C		CALL ZAG1	2	
4D				
4E		MOV R0,	2	; вычисление $\Delta^{\omega} = \Delta N_3^0 - \Delta N_{oc}^0$ , Результат: LOW→2CH, HIG→2DH
4F		#28H		
50		MOV R1,	2	
51		#2AH		
52		CALL SUB	2	
53				
54		MOV R0,	2	
55		#2DH		
56		CALL ZAG1	2	
57				
58		MOV A, R7	1	; умножение на 2 (сдвиг влево) $N_{oc}^i [n]$ $\tau=38$
59		RL A	1	
5A		MOV R3, A	1	
5B		MOV A, R6	1	
5C		CLR C	1	
5D		RIC A	1	
5E		MOV R2, A	1	
5F		CLR A	1	
60		ADDC R3	2	
61		MOV R0,		
62		#02H		

Продолжение таблицы 3.1 А

63		MOV R1,		
64		#24H		
65		CALL SUB	2	
66				
67		MOV	2	
68				
69		CALL ZAG1	2	
6A				
6B		MOV	2	;вычисление $K_1^0 \Delta'' \omega$ , Результат: LOW→2EH; HIG→2FH  $\tau=111$
6C		R0,#2DH		
6D		MOV	2	
6E		R1,# $K_1^0$ H		
6F		CALL MUL	2	
70				
71		MOV R0,	2	
72		#2FH		
73		CALL ZAG2	2	
74				
75		MOV	2	;вычисление $K_2^0 \Delta' \omega$ , Результат: LOW→30H; HIG→31H
76		R0,#27H		
77		MOV R1,	2	
78		# $K_2^0$		
79		CALL MUL	2	
7A				
7B		MOV	2	
7C		R0,#31H		
7D		CALL ZAG2	2	
7E				
7F		MOV	2	;вычисление $K_3 \Delta'' \omega$ , Результат: LOW→3AH; HIG→3BH  $\tau=111$
80		R0,2#DH		
81		MOV	2	
82		R1,# $K_3$ H		
83		CALL MUL	2	
84				
85		MOV R0,	2	
86		#27H		
87		CALL ZAG2	2	
88				
89		MOV	2	; вычисление $K_4 \Delta' \omega$ , Результат: LOW→3CH; HIG→3DH  $\tau=111$
8A		R0,#27H		
8B		MOV	2	
8C		R1,# $K_4$ H		
8D		CALL MUL	2	
8E				
8F		MOV R0,	2	
90		#3DH		
91		CALL ZAG2	2	
92				
93		MOV R0,	2	;вычисление $K_1^1 \Delta I$ , Результат: LOW→3EH; HIG→3FH
94		#1DH		
95		MOV R1,	2	
96		# $K_1^1$ H		
97		CALL MUL	2	

Продолжение таблицы 3.1 А

98				
99		MOV R0, #3FH	2	
9A				
9B		CALL ZAG2	2	$\tau=111$
9C				
9D		MOV	2	; вычисление $(N_{pc}[n-1]-K_1^0 \Delta^2 \omega)=\alpha$ , Результат: LOW→26H; HIG→27H
9E		R0,#32H		
9F		MOV	2	
A0		R1,#2EH		
A1		CALL ADD	2	
A2				
A3		MOV R0,	2	$\tau=25$
A4		#27H		
A5		CALL ZAG1	2	
A6				
A7		MOV	2	
A8		R0,#26H		
A9		MOV	2	; вычисление $(\alpha+K_2^0 \Delta^2 \omega)=N_{pc} [n]$ , Результат: LOW→34H; HIG→35H
AA		R1,#30H		
AB		CALL ADD	2	
AC				
AD		MOV	2	
AE		R0,#35H		
AF		CALL ZAG1	2	$\tau=25$
B0				
B1		MOV	2	;вычисление $K_2^1 N_{pc} [n]$ , Результат: LOW→38H; HIG→39H
B2		R0,#35H		
B3		MOV	2	
B4		R1,# $K_2^1$ H		
B5		CALL MUL	2	
B6				
B7		MOV R0,	2	; вычисление $(N_{pt} [n-1]-K_2^1 N_{pc} [n] = \beta_1$ , Результат: LOW→28H; HIG→29H
B8		#39H		
B9		CALL ZAG2	2	
BA				
BB		MOV R0,	2	
BC		#36H		
BD		MOV R1,	2	$\tau=25$
BE		#38H		
BF		CALL ADD	2	
C0				
C1		MOV R0,	2	
C2		#29H		
C3		CALL ZAG1	2	
C4				
C5		MOV R0,	2	; вычисление $(\beta_1+K_3 \Delta^2 \omega)=\beta_2$ , Результат: LOW→2AH; HIG→2BH
C6		#28H		
C7		MOV R1,	2	
C8		#3AH		
C9		CALL ADD	2	
CA				
CB		MOVR0,#2BH	2	$\tau=25$

Продолжение таблицы 3.1 А

CC				
CD		CALL ZAG1	2	
CE				
CF		MOV R0,	2	; вычисление $(\beta_2 + K_4 \Delta \omega) = \beta_3$ , Результат: LOW→2CH; HIG→2DH $\tau=25$
D0		#2AH		
D1		MOV R1,	2	
D2		#3CH		
D3		CALL ADD	2	
D4				
D5		MOV R0,	2	
D6		#2DH		
D7		CALL ZAG1	2	
D8				
D9		MOV R0,	2	; вычисление $(\beta_3 - K_1^i \Delta^i) = N_{pt} [n]$ , Результат: LOW→1EH; HIG→1FH $\tau=29$
DA		#2CH		
DB		MOV R1,	2	
DC		#3EH		
DD		CALL SUB	2	
DE				
DF		MOV R0,	2	
E0		#1FH		
E1		CALL ZAG1	2	
E2				
E3		MOV R0,	2	; формирование $N_3^o [n-1]$ , LOW→22H; HIG→23H $\tau=14$
E4		#04H		
E5		MOV R1#22H	2	
E6				
E7		CALL ZAG3	2	
E8				
E9		MOV R0,	2	; формирование $N_{oc}^o [n-1]$ , LOW→20H; HIG→21H $\tau=14$
EA		#1AH		
EB		MOV R1,	2	
EC		#20H		
ED		CALL ZAG3	2	
EE				
EF		MOV R0,	2	; формирование $N_{oc}^1 [n-1]$ , LOW→24H; HIG→25H $\tau=14$
F0		#06H		
F1		MOV R1,	2	
F2		#24H		
F3		CALL ZAG3	2	
F4				
F5		MOV	2	; формирование $N_{pt} [n-1]$ , LOW→32H; HIG→33H $\tau=20$
F6		R0,#34H		
F7		MOV	2	
F8		R1,#32H		
F9		CALL ZAG3	2	
FA				
FB		MOV R0,	2	; формирование $N_{pt} [n-1]$ , LOW→36H; HIG→37H $\tau=14$
FC		#1FH		
FD		MOV R1,	2	
FE		#36H		
FF		CALL ZAG3	2	
100				

Продолжение таблицы 3.1 А

101		MOV A,#BFH	2			
102				; вывод значения N <sub>рт</sub> на ЦАП , τ=20 ; возврат к началу цикла REG		
103		OUTL P2, A	2			
104		MOV R0, #1FH	2			
105						
106		MOV A, @R0	1			
107		MOV D, P1,A	1			
108		DEC R0	1			
109		MOV A, #R0	1			
10A		OUTL A,BUS	2			
10B		MOV A, #FFH	2			
10C						
10D		OUTL P2, A	2			
10E		OUTL P1, A	2			
10F		JPM REG	2			
110						
111	SUB:	MOV A, @R1	1	; вызов в А вычитаемого (В) LOW ; инвертирование (В) LOW ; дополнение до 2 (В+1) LOW  ; получение суммы LOW (А+В+1+S)  ; подготовка адр. (А) HIG ; подготовка фдр. (В) HIG ; пересылка ∑ LOW в рг.Т. ; вызов в А В HIG ; инвертирование В HIG ; сложение с переносом (А+В+S) HIG ; возврат из подпрограммы	ПП «SUB» вычитание 2-х байт. чисел HIG→А LOW→R1	
112		CPL A	1			
113		ADD A, #1	2			
114						
115		ADD A, @R0	1			
116		INC R0	1			
117		INC R1	1			
118		MOV T, A	1			
119		MOV A, @R1	1			
11A		CPL A	1			
11B		ADDC A. @R0	1			
11C		RET	2			
11D	ADD:	MOV A, @ R1	1		; вызов в А слагаемого В LOW ; сумм: (А+В) LOW; S ; подготовка адр. А HIG ; подготовка адр. В HIG  ; пересылка ∑ LOW в рг. Т.  ; вызов слагаемого В HIG ; получение суммы ст. байтов ∑HIG ; возврат из подпрограммы	ПП «ADD» слож. 2-х байт. чисел HIG→А LOW→Т
11E		ADD A, @ R0	1			
11F		INC R0	1			
120		INC R1	1			
121		MOV T, A	1			
122		MOV A, @ R1	1			
123		ADDC A@R0	1			
124		RET	2			
125	MUL:	MOV @ R0,A	1	; вызов в А ст. Байта множ-го (А HUG)  ; анализ знака (если А7=1, то М1)  ; загрузка в R2 мл. Байта мн-го		ПП «MUL» Умножение с учетом знака 2-х одноразряд- ных чисел; результат-
126		JBB M1	2			
127						
128		DEC R0	1			
129		MOV R2, A	1			
12A		MOV R2, A	1			
12B		JMP M2	2			
12C				; БП к М2 (умножение) ; получение модуля мн-го и загрузка его в R2 (LOW)	2-х байт. число	

Продолжение таблицы 3.1 А

12D	M1:	DEC R0	1		
12E		MOV @ R0, A	1		
12F		CLR A	1		
130		INC A	1		
131		MOV R2, A	1		
132	M2:	MOV R3, #09H	2	; загрузка счетчика циклов: R3:= 09H	Отриц. результат предст. в дополнит. коде  A→HIG R1→LOW
133					
134		CLR A	1	; обнуление A	
135		CLR C	1	; обнуление C ( разр. переноса)	
136	M3	RRC A	1	; двойной циклический сдвиг мн-го в аккумуляторе	
137		XCH A, R1	1		
138		RRC A	1		
139		XCH A, R1	1		τ <sub>max</sub> =95
13A		JNC M4	2	; анализ переноса: если c=0, то M4	
13B					
13C		ADD A, R2	1	; сложение мн-го и акк-ра	
13D	M4:	DJNZ R3, M3	2	; (R3)-1, если (R3)≠0, то M3	
13E					
13F		INC R0	1	; анализ знака результата: если «+», то RET, если «-», то M5	
140		XCH A, @ R0	1		
141		JBB M5	2		
142					
143		XCH A, @ R0	1		
144		RET	2		
145	M5:	XCH A, @R0	1	; представить результат в обратном коде и RET	
146		XCH A, R1	1		
147		CPL A	1		
148		XCH A, R1	1		
149		CPL A	1		
14A		RET	2		
14B	ZAG1:	MOV @R0, A	1	; загрузка в ОЗУ HIG	ПП «ZAG1» - загрузка в ОЗУ 2-х байт
14C		DEC R0	1	; подг.адр. LOW	
14D		MOV A, T	1	; вызов в A LOW	
14E		RET	1	; загрузка в ОЗУ LOW	τ=6
14F		MOV @R0, A	2	; возврат из подпрограммы	
150	ZAG2:	MOV @R0, A	1	Загрузка HIG в ОЗУ	ПП «ZAG2» - загрузка в ОЗУ 2-х байт
151		DEC R0	1	; подготовка адр. LOW	
152		MOV A, R1	1	Вызов LOW в A	
153		MOV @ R0, A	1	; загрузка LOW в ОЗУ	
154		RET	2	; возврат из подпрограммы	τ=6
155	ZAG3:	MOV A, @ R0	1	; вызов в A LOW x [n] ; загрузка в ОЗУ LOW x [n-1]	ПП «ZAG3» Перезагр. 2-х байт Числа
156		MOV @ R1, R1	1	; подг.адр. HIG x [n] ; подг.адр. x [n-1]	
157		INC R0	1	; вызов в A HIG x [n]	
158		INC R1	1	; загрузка в ОЗУ HIG x [n-1]	
159		MOV A, @R0	1	; возврат из подпрограммы	
15A		MOV @ R1, A	1		



Продолжение таблицы 3.1 А

15B		RET	2		$\tau=8$
15C	INT:	SEL RB1	1	; установка банка РОН1 ; запоминание знач. А	ПП «INT»- обработки внешнего прерыван ия. Ввод
15D		MOV R0, A	1		
15E		MOV A,	2	; подготовка адреса счетчика	
15F		#F8H			
160		OUTL P2, A	2	; вывод адреса сч-ка К580 ВИ53	
161		INS A, BUS	2	; ввод LOW $N_{oc}^{00}$ [n] в А ; загрузка LOW $N_{oc}^{00}$ [n] в ОЗУ	в ОЗУ значения $N_{oc}^{00}$ [n]
162		MOV R2, A	1		
163		INS A, BUS	2	; ввод HIG $N_{oc}^{00}$ [n] в А ; загрузка HIG $N_{oc}^{00}$ [n] в ОЗУ	
164		MOV R3, A	1		
165		MOV A,	2	; А-[11111111] <sub>2</sub>	Тайм. К580ВИ53
166		#FFH			
167		OUTL P2, A	2	; вывод FFH в порт P2 (выкл. P2)	$\tau=20$
168		MOV A, R0	1	; восстановление значения А	
169		SEL RB0	1	; установка банка РОНО	
16A		RETR	2	; возврат из прерывания	
16B					
16C					
16D					
16E					
16F					
170					
171					