

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ АГРЕГАТА КОТЕЛЬНОЙ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение  
(по отраслям)  
профилю подготовки «Энергетика»  
специализации «Управление производством: электроснабжение,  
электромеханика и автоматика

Идентификационный код ВКР: 176

Екатеринбург 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный профессионально-педагогический  
университет»  
Институт инженерно-педагогического образования  
Кафедра энергетики и транспорта

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:  
Заведующий кафедрой ЭТ  
\_\_\_\_\_ А.О. Прокубовская  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ АГРЕГАТА  
КОТЕЛЬНОЙ**

Исполнитель:  
студент группы УПЭ-401

А.Е. Честюнин

Руководитель:  
старший преподаватель кафедры ЭТ

В.В. Ипполитов

Нормоконтролер:  
старший преподаватель кафедры ЭТ

Т.В. Лискова

Екатеринбург 2018

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 68 страницах, содержит 13 рисунков, 5 таблиц, 30 источников литературы, а также приложения на страницах.

Ключевые слова: КОТЕЛЬНАЯ, ДУТЬЕВОЙ ВЕНТИЛЯТОР, ЭЛЕКТРОПРИВОД, АВТОМАТИЗАЦИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.

Честюнин А.Е. Проектирование системы автоматизации агрегата котельной: выпускная квалификационная работа / А.Е. Честюнин; Рос. гос. проф.-пед. ун-т, Ин-т инж.-пед. образования, Каф. энергетики и транспорта. – Екатеринбург, 2018. – 68 с.

Краткая характеристика содержания ВКР:

1. Тема выпускной квалификационной работы «Проектирование системы автоматизации агрегата котельной». В работе проведен анализ режимов работы котельной и вентилятора, определен оптимальный технологический цикл, разработана современная система автоматизации. Цель работы: выполнить проектирование автоматизации агрегата котельной.

2. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы разработан дидактический тест по специальности «Тепловые электрические станции» дисциплины «Электрооборудование теплоэлектрических станций».

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОПИСАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА И ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА	8
1.1 Назначение и техническое описание котла.....	8
1.2. Назначение и технические характеристики дутьевого вентилятора ....	12
1.3 Технологическая схема работы котла и вентилятора .....	13
1.4 Обоснование необходимости модернизации .....	15
1.5 Обоснование технических решений для повышения энергоэффективности дутьевого вентилятора .....	16
2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ...	31
3 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.....	33
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА.....	39
4.1. Разработка структурной схемы системы автоматического управления .....	39
4.2 Синтез регулятора третьего контура (расход воздуха) и его свойства .	42
4.3. Анализ математической модели системы автоматического управления .....	43
5 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	56

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современном промышленном производстве, коммунальном хозяйстве и наших домах электропривод нашел наибольшее применение, на которое приходится 60% потребляемой в стране энергии. Такое широкое применение объясняется рядом его преимуществ по сравнению с другими типами приводов: большой диапазон мощности и скорости движения; различные конструкции, возможность регулирования скорости вращения двигателя [5].

Исторически двигатели постоянного тока использовались для регулирования скорости вращения. Преобразователь в этом случае регулировал только напряжение, был простым и дешевым. Однако двигатели постоянного тока относительно дороги, имеют сложную конструкцию и критичный в эксплуатации щеточный аппарат. Асинхронные двигатели широко распространены, надежны, имеют относительно низкую стоимость, хорошую производительность, но регуляторы скорости их вращения из-за сложности их электронных систем регулирования напряжения стояли до недавнего времени дорого и не обладали качествами, необходимыми для широкого внедрения в промышленность. Благодаря быстрому развитию электроники и появлению недорогих частотных преобразователей стало возможно регулировать скорость вращения асинхронных двигателей в широких масштабах. Понять эту возможность можно было только с появлением силовых полупроводниковых приборов - тиристоров, а затем транзисторов IGBT. В настоящее время частотный режим управления асинхронной машиной широко внедряется во всем мире, что сегодня рассматривается не только с точки зрения экономии потребляемой энергии, но и с точки зрения совершенствования управления технологическим процессом.

В промышленно развитых странах технология использования частотно-регулируемых приводов используется более тридцати лет. В нашей стране несколько другая ситуация. Частотные контроллеры, отвечающие требованиям надежности и электромагнитной совместимости с электрическими сетями, появились на российском рынке относительно поздно, и их цена в рыночной экономике довольно высока. Действительно, учитывая относительно высокую стоимость полупроводниковых преобразователей, используемых для управления скоростью асинхронных приводов, сегодня наиболее важной проблемой является возврат средств, вложенных в их реализацию.

Использование частотных преобразователей для управления насосами и вентиляторами позволяет получить экономический эффект не только от снижения потребляемой электроэнергии из сети, но и для значительного сокращения эксплуатационных расходов и увеличения срока службы оборудования. Современные частотные преобразователи позволяют получить более двадцати параметров состояния электропривода. Соответствующая обработка этих параметров позволяет провести глубокую диагностику как системного оборудования, так и текущих процессов. Существует возможность не только реагировать на случившееся, но и предупредить её, что для энергетических объектов гораздо важнее.

Следует отметить, что уже сегодня в нашей стране есть опыт внедрения и эксплуатации систем с частотным контролем. Разработаны различные методы для определения экономического эффекта от внедрения частотно-регулируемых приводов для расчета требуемой мощности преобразователя. Кроме того, на российском рынке представлено огромное количество частотных преобразователей в самом широком диапазоне мощностей, организовано их техническое обслуживание и техническая подготовка. Как показывают статистические данные, с каждым годом растет число энергосберегающих электроприводов, причем не только в центральных городах России.

Объектом исследования является котельная.

Предметом исследования является электропривод выдувного вентилятора котельной.

Цель работы: модернизировать электропривод и автоматизировать вентилятор котельной.

Задачи работы:

- проанализировать технологический цикл;
- рассчитать мощность электродвигателя в соответствии с указанными техническими условиями вентилятора;
- выбрать электродвигатель;
- выбрать преобразователь для управления двигателем;
- выбрать и рассчитать систему автоматического управления;
- проанализировать работу системы управления с использованием математического моделирования.

# 1 ОПИСАНИЕ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА И ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

## 1.1 Назначение и техническое описание котла

В котельной используется бойлер с горячей водой на газовом или мазутном топливе типа ПТВМ - 100. Он предназначен для нагрева сети водонагревательной системы и установки горячего водоснабжения. В зависимости от различных внешних условий (расход воды, температура воздуха, пределы газа), по режимной карте выбирается режим работы котла. Режим работы котла определяется скоростью потока газа, которая связана с давлением воздуха на входе в котел и отрицательным давлением на выходе. Давление создается с помощью продувочного вентилятора и вакуума с дымоходом.

Основная цель механизмов тяги в водогрейных котлах заключается в поддержании оптимального режима горения в котловой печи. В соответствии с концепцией оптимального режима это означает поддержание оптимального соотношения «топливо-воздух» и создание наиболее благоприятных условий для полного сжигания топлива. Для того чтобы выполнить это условие, необходимо, с одной стороны, обеспечить нужное количество воздуха в печи - с другой стороны, с заданной интенсивностью, извлекать продукты сгорания из него [17].

Котел является водотрубным прямоточным с П-образным расположением нагревательных поверхностей. Печь полностью экранирована трубами диаметром 60x3 мм с шагом  $8 = 64$  мм. Котел оборудован 16 газомазутными горелками типа МГМГ – 8 расположены попарно на фронтальной и задней стенках по восемь штук с каждой стороны. Каждая горелка оснащена индивидуальным дутьевым вентилятором. Топку от конвективной части отделяет газонепроницаемым промежуточный экран.



Конвективная нагревательная поверхность состоит из 3-х пакетов, состоящих из труб.

Котел выполнен без опорной рамы. Экраны камеры сгорания и конвективного газового дымохода опираются нижними коллекторами через опоры на портал. Оболочка котла изготовлена из легкого трубного, толщиной 110 мм и состоит из трех слоев: шамотобетона, минеральных матрасов и магнезиального покрытия.

Выход продуктов сгорания осуществляется в общую железобетонную дымовую трубу котельной.

Циркуляция сетевой воды осуществляется тремя сетевыми насосами. Для поддержания расчетной температуры воды на входе в котёл установлены два рециркуляционных насоса.

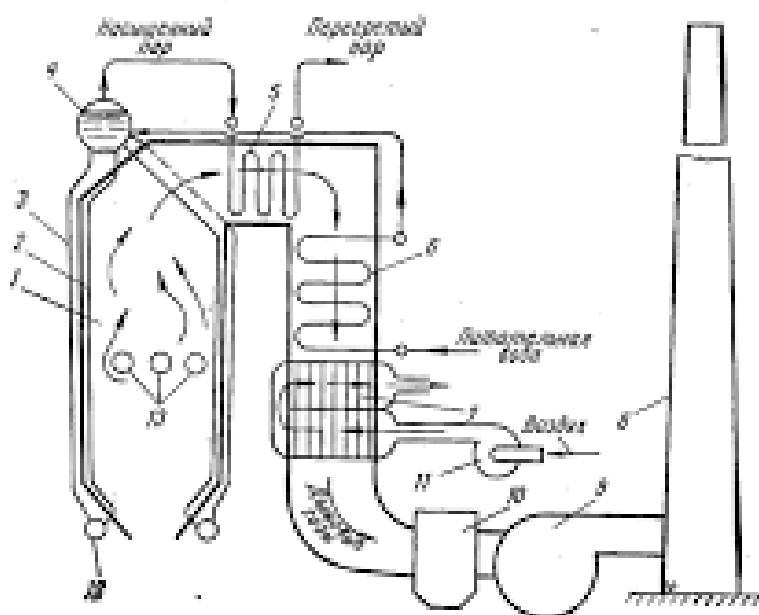


Рисунок 1 - Общий вид котельной

Котел предназначен для работы на жидком и газообразном топливе. Воздух, необходимый для сжигания, подается в топку дутьевыми вентиляторами, а вода в котле-насосами, дымовые газы выходят из котла в атмосферу через вытяжную трубу. На крыше здания установлен котел деаэратор. Вода, нагретая в котле, подается потребителю, где она выделяет часть тепла и с пониженной температурой снова возвращается в котел для последующего нагрева. Печь оснащена горелками.

Процесс изготовления осуществляется в такой последовательности (рисунок 2): жидкое топливо, подаваемое в котел по трубопроводу, и газообразное по линии, смешивается в горелке с воздухом из воздушного подогревателя и сжигается в печи. Воздух, необходимый для сжигания топлива, взят вентилятором из верхней зоны котельной, подается в воздухонагреватель для нагрева из-за высокой температуры дымовых газов. Тепло, выделяемое при сжигании топлива, переносится в воду через поверхности нагрева котла излучением в печи и конвекцией из нагретых газов сгорания в дымоходах котла.

Образовавшийся в экранных трубах котла насыщенный пар собирается в барабане котла, откуда после прохождения сепарационного устройства направляется через коллектор в пароперегреватель, где перегревается до заданной температуры, а затем через коллектор и главный паропровод (через запорный клапан или заслонку) поступает потребителю. Конденсат отработанного пара, возвращенный от потребителя, отправляется в деаэратор, который служит для удаления воздуха и активных газов из воды. Там насос также подает добавочную химически очищенную воду. После деаэрации вся питательная вода подается питательным насосом или в экономайзер, где из-за нагрева воды дымовыми газами, проходящими через водяной экономайзер, нагревается и подается в барабан котла, а из барабана - в систему экранных труб, где происходит процесс испарения.

Выходящие из топки нагретые последовательно проходят между трубами пароперегревателя, водяного экономайзера и внутри труб воздухонагревателя, давая тепло на перегрев пара, подогрев питательной воды и воздуха, охлаждаются дымососом и удаляются через трубу в атмосферу.

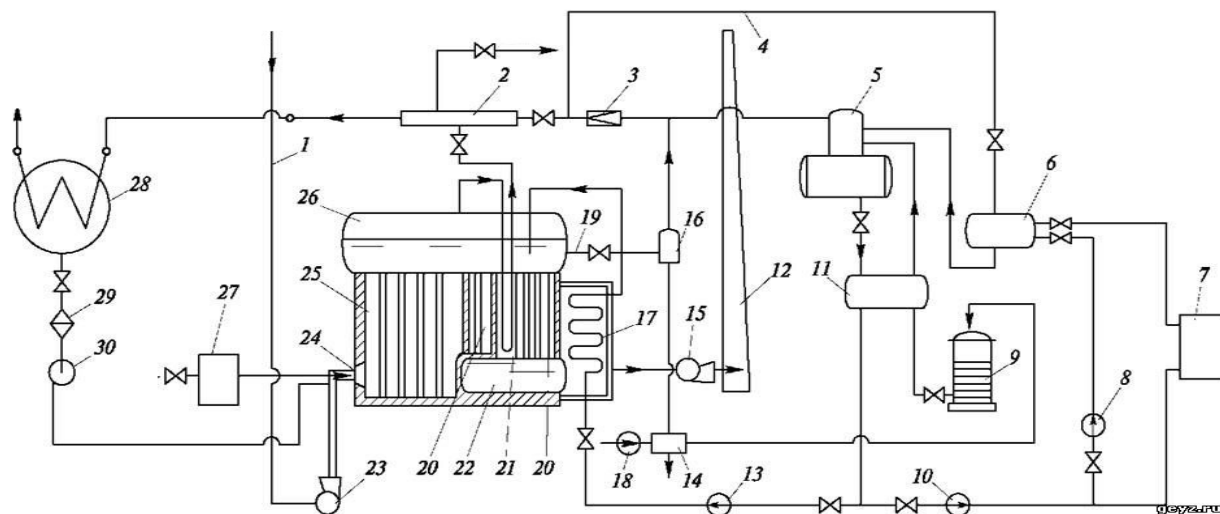


Рисунок 2 - Схема котельной установки

Основные технические характеристики котла приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики котла

Наименование параметра	Единица измерения	Величина или характеристика
Теплопроизводительность	Гкал/ч	100
Расход воды через котел, не менее	м <sup>3</sup> /ч	1235
Расчетное давление воды на выходе из котла, не менее	Па	98
Расчетное давление воды на входе в котел	Па	245
Температура воды на входе в котел, не менее	°С	70
Температура воды на выходе из котла, не более	°С	150
Расчетное гидравлическое сопротивление котла	Па	2,5
Расчетный КПД брутто на природном газе	%	88,6
Общая поверхность нагрева котла	м <sup>2</sup>	3150
Общий водяной объем	м <sup>3</sup>	30
Объем топки	м <sup>3</sup>	388

## 1.2. Назначение и технические характеристики дутьевого вентилятора

Дутьевые вентиляторы предназначены для подачи воздуха в камеры сгорания котлов больших промышленных котельных [21].

Вентилятор дутьевой (ВДН - 15) – вентилятор одностороннего всасывания с загнутыми вперёд лопатками, 1,35 - диаметр рабочего колеса в метрах, мощность,  $Q = 50000 \text{ м}^3 / \text{ч}$ .

Внешний вид вентилятора показан на рисунке 3.

Ходовая часть состоит из литого корпуса, вала, двух подшипников и упругой муфты. В конце ходовой части предусмотрена полость, заполненная маслом.

Рабочее колесо сварной конструкции выполнено с тридцатью двумя рабочими лопастями. Улитка изготовлена из листового материала. Сварное восьмилопастное направляющее устройство установлено на входе потока газов в улитку и служит для регулирования производительности машины. Привод вентилятора осуществляется непосредственно от двигателей через упругую пальцевую муфту.

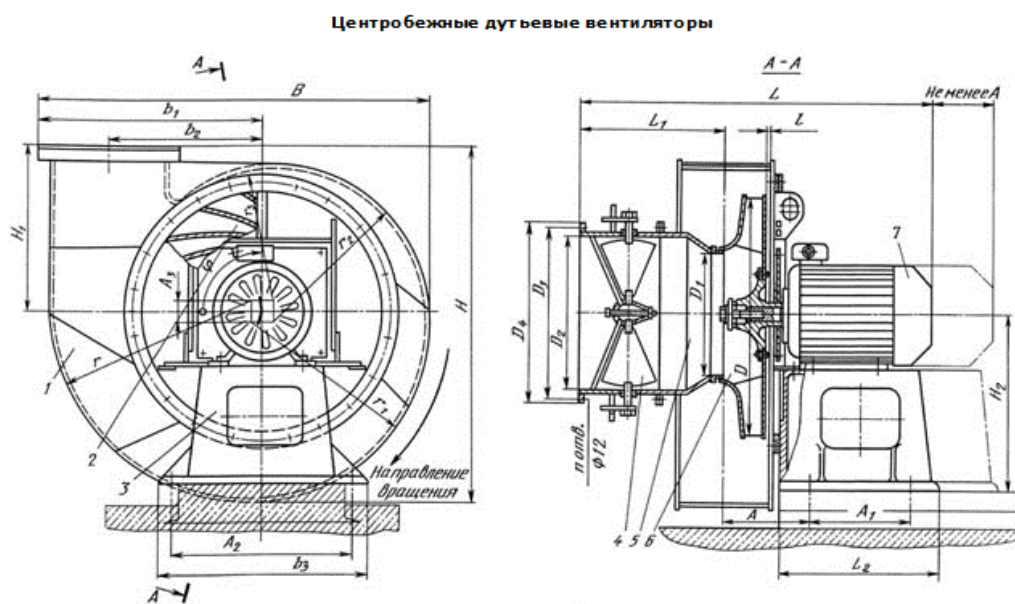


Рисунок 3 - Внешний вид вентилятора:

1 - ходовая часть; 2 - улитка; 3 - направляющее устройство; 4 - приводной двигатель

Вентилятор управляется осевой направляющей (ОНА), которая представляет собой набор лопастей, радиально расположенных во входном патрубке, которые могут одновременно и синхронно вращаться под любым углом вокруг радиальных осей, что позволяет закручивать поток в направление вращения колеса.

Основными параметрами тягодутьевых машин являются их производительность и напор. Создаваемый напор (разряжение) представляет собой общую разность давлений в выпускных и впускных патрубках машины. Аэродинамическая характеристика вентилятора представляет собой соотношение между общим давлением  $H$  и производительностью  $Q$  при заданной частоте вращения, температуре  $20^\circ \text{C}$  и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

Зависимость работы вентилятора от нагрузки котла показана в рабочей диаграмме котла и показана в таблице 2.

Таблица 2 - Зависимость работы вентилятора от нагрузки на котел

Нагрузка, т/ч	19,5	26	29,5	33
Давление воздуха перед горелками, кгс/м <sup>2</sup>	25– 35	55 – 65	85 – 95	115– 125

### 1.3 Технологическая схема работы котла и вентилятора

Данные о нагрузке котла регистрируется каждый час в специальном журнале. Согласно данным о ежедневном изменении нагрузки котла и вентилятора на отдельные дни каждого сезона; полученных диаграмм (рисунок 4 и 5).

Анализируя технологические диаграммы, можно выявить некоторые закономерности. Из диаграмм видно, что нагрузка котла, работающего в пиковом режиме, не существенно зависит от отопительного сезона. И в зависимости от времени суток нагрузка меняется в довольно большом диапазоне: от 17 до 28 т/ч. Самые большие пики встречаются в основном в 9

- 10 утра и 20 - 21 часов вечера. Самую маленькую нагрузку можно увидеть в 5-6 часов утра.

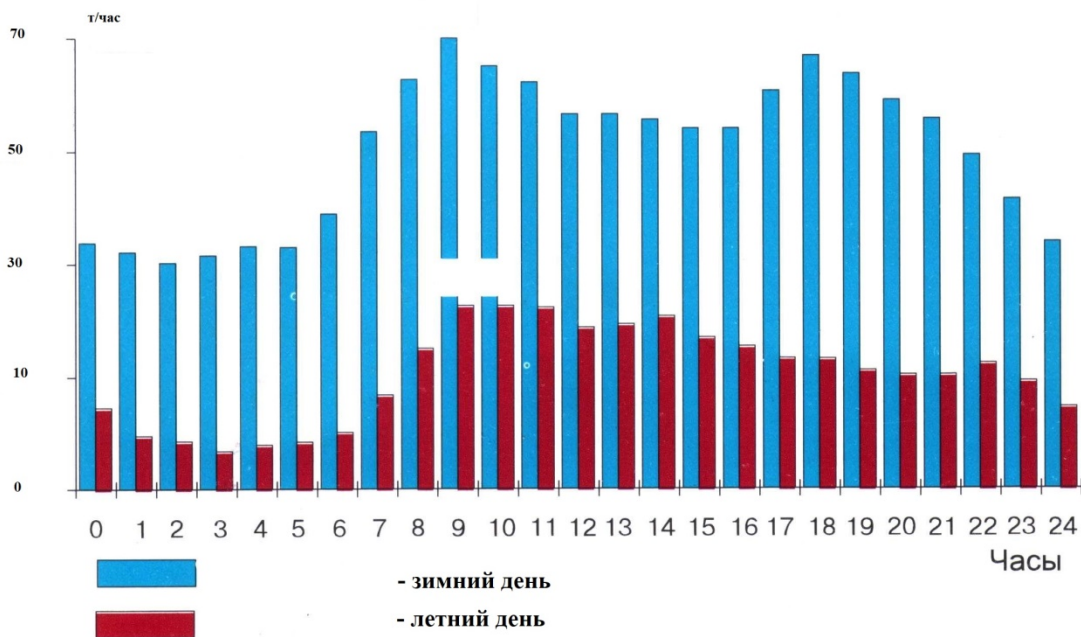


Рисунок 4 - Диаграмма нагрузки парового котла за сутки

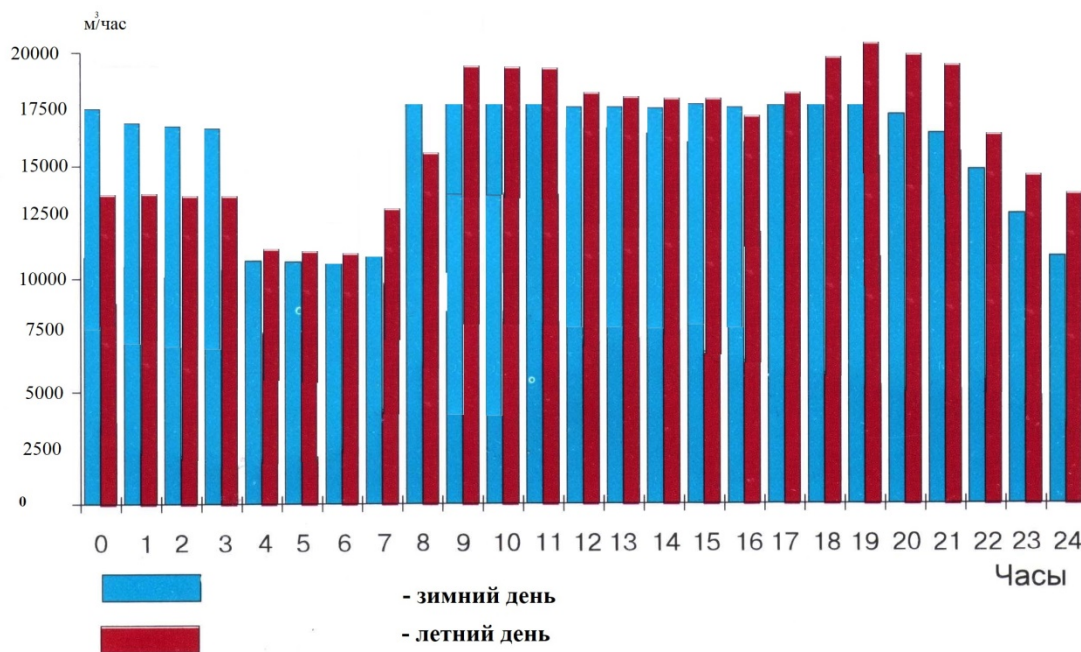


Рисунок 5 - Диаграмма нагрузки дутьевого вентилятора за сутки

## 1.4 Обоснование необходимости модернизации

Введение в производство новых механизмов или систем управления, соответствующих текущему уровню развития науки и техники, обеспечивает повышение эффективности производства. Автоматизация производства связана с созданием различных систем управления, которые выполняют функции мониторинга и регулирования производственных процессов, заменяя человека [10,21].

Производительность вентилятора напрямую связана с работой котла, так как изменение мощности требует соответствующего изменения количества воздуха в печи. Увеличение избыточного воздуха приводит к дополнительным тепловым потерям с отходящими газами и уменьшению химического и механического недофинансирования топлива. Поэтому подача воздуха в печь должна обеспечивать поддержание оптимального избыточного воздуха, что обеспечивает экономичное сжигание топлива.

В настоящее время в котельной управление работой дутьевого вентилятора осуществляется вручную. Для этого в соответствии с режимной картой требуется незначительное, но постоянное подрегулирование подачи воздуха при отклонении от заданного значения. Это требует постоянного внимания человека, что сложно, особенно ночью, потому что рабочий может отвлекаться или засыпать.

Кроме того, в режимной карте показаны конкретные значения нагрузки и соответствующее давление воздуха перед горелками с достаточно большим шагом. Более того, коэффициент пропорциональности изменяется с увеличением нагрузки. Рабочий соответственно не будет вычислять промежуточные значения.

Автоматическое управление позволяет своевременно более точно регулировать подачу воздуха в котел, что обеспечит рациональное сжигание топлива. Регулирующее устройство должно обеспечивать плавное изменение производительности вентилятора в требуемом диапазоне. В то же время

сокращение расхода воздуха должно осуществляться с наибольшим сокращением потребления энергии.

Производительность вентилятора может регулироваться различными способами: с помощью ОНА, дросселированием, регулировкой гидравлической муфты. Также используются многоскоростные двигатели и частотные преобразователи. Из всех этих способов экономически выгодно контролировать изменение скорости вращения вала, поскольку изменение эффективности вентилятора незначительно.

Широко распространенный недавно получил регулируемый электрический привод АС. Частота вращения асинхронного двигателя зависит от частоты тока питания, количества пар полюсов и проскальзывания. Изменяя один из этих параметров, вы можете изменить скорость вала двигателя и, следовательно, работу вентилятора. Хотя метод контроля частоты является наиболее экономичным, он требует специального оборудования, что приводит к дополнительным расходам. Поэтому, чтобы выбрать наиболее выгодный метод регулирования, необходимо сравнить потери, связанные со старым оборудованием, и затраты, необходимые для приобретения нового.

## **1.5 Обоснование технических решений для повышения энергоэффективности дутьевого вентилятора**

### **Формулирование требований к электроприводу вентилятора**

Чтобы поднять электропривод к дутьевому вентилятору, необходимо учитывать условия, в которых он будет работать. В то же время выбранный электропривод должен обеспечивать максимальную эффективность использования энергии во время работы. В дополнение к экономической эффективности процесса управления также важны конструктивные и эксплуатационные характеристики регулирующего устройства, что может



повлиять на надежность работы вентилятора, удобство и гибкость управления, простоту или трудность ремонта [16].

Следующие требования предъявляются к электроприводу вентилятора вентилятора:

- малый диапазон регулировки - 1: 5;
- двигатель вентилятора питается от сети  $\sim 380$  В, поэтому, чтобы избежать дополнительных затрат, привод должен быть выбран при одинаковом напряжении;
- рабочая температура электропривода от 0 до 50 °С, поскольку в помещении, где предполагается установка привода, температура, особенно в теплое время года, может достигать 40 °С;
- необходимо обеспечить плавное регулирование работы вентилятора;
- работа в энергосберегающем режиме из-за постоянной адаптации к оптимальным режимам работы;
- сопротивление короткому замыканию и замыкания на землю, поскольку в сети с изолированной нейтралью в случае отказа изоляции возможны замыкания на землю;
- регулирование давления воздуха в котловой печи должно проводиться с точностью до 5%;
- требования к скорости не представлены, поскольку вентилятор работает в непрерывном режиме.

Описание различных способов управления работой вентилятора

Вентилятор можно управлять различными способами [27]:

а) регулирование с постоянной скоростью вращения вентилятора:

- дросселирование, то есть введение в вентиляционную сеть дополнительного сопротивления;
- скручивание воздушного потока, поступающего в колесо вентилятора;
- нанесение заслонки на конце лопастей колеса;

- уменьшение активной ширины колеса с помощью подвижного диска;

б) управление с изменением частоты вращения вала вентилятора:

- с постоянной скоростью вала приводного двигателя (регулировка гидравлической муфты, индукционная муфта вариатора скорости скольжения и ремня);

- переменная скорость вала приводного двигателя (это многоскоростные двигатели, частотные преобразователи, а также регулируемые электроприводы).

Наиболее распространенными на практике являются такие методы контроля, как дросселирование, скручивание воздушного потока перед колесом и регулировка с переменной скоростью вала двигателя.

Регулирование производительности вентилятора путем введения дополнительного сопротивления (дросселирования) в сеть используется на практике довольно часто.

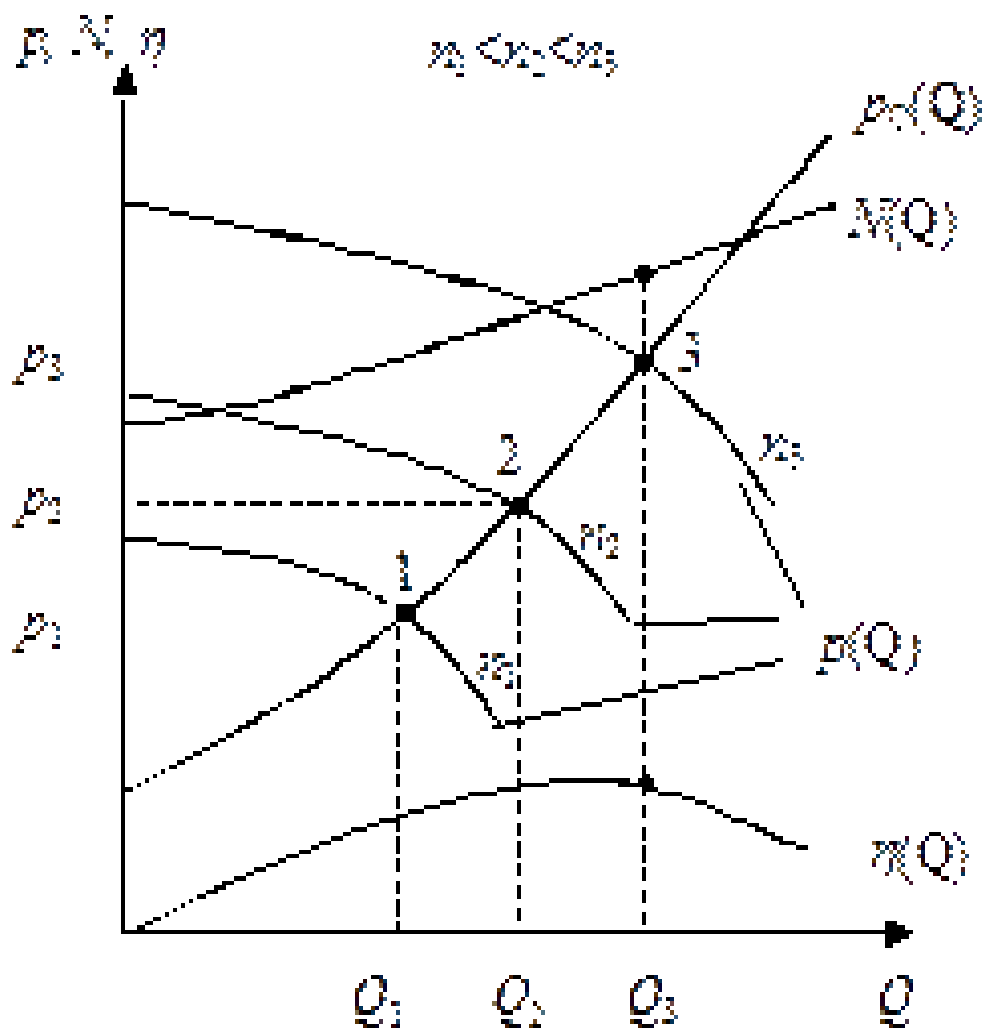


Рисунок 6 - Регулирование вентилятора дросселированием

Когда дополнительное сопротивление вводится в сеть (рис. 6), кривая перемещается влево на графике  $Q - P_v$ . Рабочая точка вентилятора также перемещается влево, соответственно, производительность уменьшается.

Если до введения в сеть дополнительного сопротивления (дроссельной заслонки) вентилятор производительностью  $Q_a$  при давлении  $P_{va}$  потребляет мощность:

$$N = (Q_a \cdot P_{va}) / (3600 \cdot 1000 \cdot \eta_A).$$

После введения дроссельной заслонки производительность снижалась до значения  $Q_v$  при давлении  $P_{vb}$ , тогда мощность, потребляемая для преодоления сопротивления сети с дросселем, стала:

$$N \approx Q_a \cdot P_{va} / \eta_V \approx Q_v \cdot P_{vv} / \eta_V \cdot P_{vb} / P_{vb} \approx N_b \cdot P_{vv} / P_{vb}.$$

Следовательно, значительная часть потребляемой энергии вентилятором тратится на преодоление сопротивления дроссельной заслонки.

Графически падение мощности при дросселировании происходит по кривой от точки А до В. Эта кривая называется кривой дроссельной заслонки.

Следовательно, можно сделать вывод, что эффективность дросселирования во многом зависит от типа вентилятора.

Направляющие устройства, которые осуществляют закручивание потока воздуха перед входом в колесо вентилятора, делятся на четыре типа:

- осевое направляющее устройство (ОНА) представляет собой набор лопастей, радиально расположенных во входном патрубке вентилятора, которые могут одновременно и синхронно поворачиваться под любым углом вокруг радиальных осей;
- упрощенное осевое направляющее устройство конструкции Л.А. Рихтера (УОНА), состоящее из двух секторов, которые разворачиваются в разных направлениях и тем самым обеспечивают частичное закручивание проходящего между ними воздуха;
- радиальное направляющее устройство (РНА), которое представляет собой спиральный кожух с набором поворотных лопастей, расположенных по окружности, параллельной оси вала вентилятора;
- упрощенное радиальное направляющее устройство конструкции А.Г. Бычкова, состоящая из коробки с набором вращающихся лопастей, расположенных не по кругу, как у РНА, а по прямой, параллельной оси вала.

Чаще всего используется осевые направляющие устройства (ОНА), поскольку они имеют меньший размер по сравнению с размером направляющих устройств других типов с одинаковой эффективностью и экономичностью.

Снижение потребления энергии вентилятором (рисунок 7) происходит при настройке направляющих устройств вдоль кривой Б1Б5 и при регулировке дроссельной заслонки - по кривой Б1Б6.

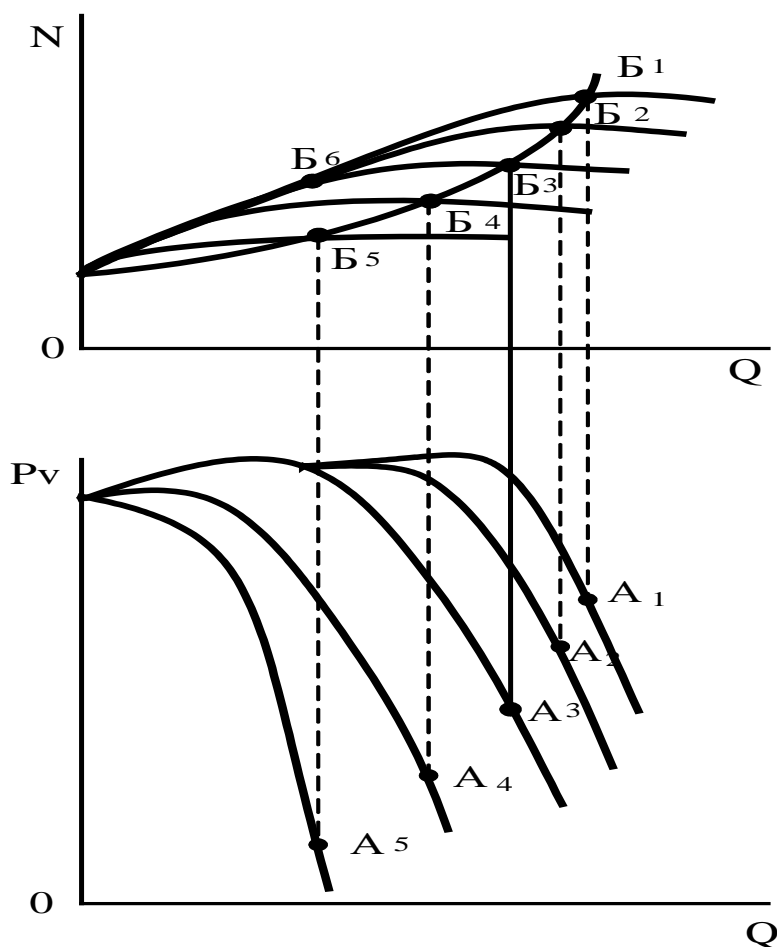


Рисунок 7 - Уменьшение потребляемой мощности при регулировании дроссельной заслонки и САУ

Взаимное расположение этих кривых показывает, что регулирование направляющим устройством является более эффективным и экономичным, чем дросселирование.

Эффективность управления вентилятором направляющим устройством зависит от относительного диаметра входа в колесо, угла выхода лопастей колеса, начального режима работы вентилятора.

Понижение кривой давления с вращением направляющих лопаток под тем же углом будет более значительным для вентилятора с большим относительным диаметром входа в колесо.

Наиболее эффективным способом производительности дутьевого вентилятора является изменение скорости вала приводного двигателя. Это позволяет регулировать его производительность в широком диапазоне и реализовывать автоматическое управление вентилятором в зависимости от технологического процесса. Кроме того, когда частота вращения вала двигателя изменяется, потребляемая ею мощность определяется выражением:

$$P_2 / P_1 = (n_2 / n_1)^3,$$

где  $P_2$  - мощность двигателя со скоростью  $n_2$ , кВт,

$P_1$  - мощность двигателя со скоростью  $n_1$ , кВт.

Поэтому такой метод является наиболее эффективным для потребления электроэнергии.

Рассмотрим основные способы регулирования частоты вращения вала двигателя.

Изменение скорости асинхронного двигателя возможно параметрическим способом - путем изменения амплитуды подводимого напряжения. Изменение амплитуды может быть достигнуто с помощью полупроводниковых преобразователей напряжения. Полупроводниковые регуляторы напряжения в цепи статора асинхронного двигателя используются в приводах вентиляторного типа, благодаря простоте конструкции и удобству включения в систему автоматического управления. Особенно оправданным является их использование в электроприводах, где требуется относительно небольшая зона регулирования.

При использовании вентильных преобразователей управление электроприводом осуществляется путем изменения длительности проводящих и непроводящих состояний силовых полупроводниковых элементов (тиристоров, семисторов, транзисторов), включенных в цепь статора асинхронного двигателя, что приводит к изменению напряжения в асинхронном двигателе [23].

В схемах преобразователей для параметрического регулирования статорных цепей асинхронных двигателей используются различные

полупроводниковые элементы с полной или неполной управляемостью. Широкое распространение получили преобразователи на основе вентильных элементов с неполной управляемостью (тиристоров и семисторов), работающие в режиме естественной коммутации. Этот тип преобразователей реализует так называемый фазовое управление (ФУ) в цепях статора асинхронного двигателя. Двигатель управляется за счет изменения угла управления вентилей  $\alpha$ , который обычно измеряется от нулевого значения соответствующего фазного напряжения.

Однако использование регуляторов напряжения для управления частотой вращения ротора двигателя очень ограничено. Как отмечено выше, их использование целесообразно при малом диапазоне регулирования в области номинального скольжения.

Применение параметрического регулирования с диапазоном, требуемым для дутьевого вентилятора, возможно только в закрытой системе с обратной связью по скорости. Для этого необходимо установить тахогенератор на одном валу с двигателем. Кроме того, параметрическое регулирование приводит к увеличению скольжения двигателя, когда его скорость вращения снижается и, следовательно, увеличивает потери в двигателе. Поэтому применение этого метода с точки зрения энергосбережения является неэффективным, хотя при реализации требует малых затрат.

В последнее время широко распространено частотное регулирование скорости вращения асинхронного двигателя (регулирование путем изменения частоты питающего напряжения), которое является результатом следующего соотношения:

$$\Omega = \frac{2\pi f_1}{p_{II}}(1 - S),$$

где  $\Omega$  - скорость вращения асинхронного двигателя, об/мин,  
 $f_1$  - частота напряжения питания, подаваемого на обмотку статора двигателя, об/мин.

$S = (\Omega_0 - \Omega) / \Omega_0$  - проскальзывание двигателя;

$\Omega_0 = 2\pi f_1 / p_n$  - скорость вращения статорного поля электродвигателя;

$p_n$  - число пар полюсов.

Чтобы регулирование асинхронного двигателя было эффективным, необходимо одновременно изменять частоту напряжения, подводимого к статору, с изменением его амплитуды. Соотношение между амплитудой и частотой напряжения питания может быть разным.

Наиболее часто используемый закон  $U_1 / f_1 = \text{const}$ , который при  $f_1 = v_{ar}$  для мощных двигателей позволяет поддерживать номинальный поток в двигателе. Такое управление позволяет регулировать скорость электродвигателя в широком диапазоне с потерями, не превышающими номинальные.

На практике преобразование частоты представляет собой технически более сложную задачу, чем регулирование напряжения, и обычно требует дополнительных шагов преобразования энергии.

Теперь используют полупроводниковые преобразователи частоты, содержащие управляемый выпрямитель и управляемый инвертор, реализованный на тиристорах. Широкое распространение также получили вентильные преобразователи, имеющие неконтролируемый выпрямитель, выполненный на диодах, и управляемый инвертор, реализованный на IGBT-транзисторах или тиристорах.

Для изменения опорных сигналов частоты и напряжения при управлении скоростью вращения асинхронных двигателей используются специальные аналоговые или микропроцессорные системы управления, которые реализуют требуемые законы управления  $U_1 / f(f_1)$ .

Этот метод обеспечивает эффективный контроль при низких потерях мощности. Но стоимость частотных преобразователей намного выше, чем у тиристорных преобразователей.

Таким образом, выбор того или иного метода на основе их сопоставления является довольно сложной задачей. Для их рационального



выбора необходимо рассчитать эффект каждого из них и сделать выбор с точки зрения надежности, затрат на модернизацию и понижения энергии.

Обоснование выбора и сравнения эффективности использования энергии различными способами контроля производительности дутьевого вентилятора.

Чтобы выбрать наиболее эффективный способ управления скоростью электродвигателя вентилятора, необходимо сравнить значения потребляемой мощности с несколькими различными методами управления [27].

Вентилятор имеет следующие характеристики:

- производительность,  $Q$  - 50000 м<sup>3</sup> / ч;
- напор,  $H$  - 251,6 кгс / м<sup>2</sup>.

Для выполнения расчетов мы используем аэродинамическую характеристику и диаграммы нагрузки вентилятора. Из диаграмм давление вентилятора колеблется от 30 кгс / м<sup>2</sup> до 67 кгс / м<sup>2</sup>. Используя формулу:

$$H = \alpha \cdot Q^2,$$

где  $\alpha$  - постоянный коэффициент пропорциональности.

Можно рассчитать производительность вентилятора.

Вычислим значение  $\alpha$  в точке номинального режима вентилятора. При  $H_{\text{ном}} = 251,7$  кгс / м<sup>2</sup> поток воздуха, создаваемый вентилятором, составляет

$Q_{\text{ном}} = 50 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> / ч, затем:

$$\alpha = H_{\text{ном}} / Q_{\text{ном}}^2 = 251,7 / (50 \cdot 10^3)^2 = 0,143 \cdot 10^{-6}.$$

Мы вычисляем минимальную и максимальную производительность вентилятора:

$$Q_{\text{min}} = \sqrt{\frac{H_{\text{min}}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{30}{0,143 \cdot 10^{-6}}} = 14484 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{\frac{H_{\text{max}}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{67}{0,143 \cdot 10^{-6}}} = 21645 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Рассчитаем мощность, потребляемую вентилятором в обеих точках:

$$P = \frac{QP_v}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta} = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta},$$

где  $Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/ч;

$P_y$  – давление, создаваемое вентилятором, Па, при регулировании дросселем и ОНА;

$H$  – напор, создаваемый вентилятором, кгс/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность среды, для воздуха  $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для минимальных данных  $Q_{\min} = 14484$  м<sup>3</sup>/ч,  $H_{\min} = 30$  кгс/м<sup>2</sup>, по аэродинамической характеристике определяем  $\eta = 0,36$ , тогда:

$$P_{\min} = \frac{Q_{\min} \cdot H_{\min} \cdot \rho \cdot g}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\min}} = \frac{14484 \cdot 30 \cdot 1.29 \cdot 9.81}{3600 \cdot 1000 \cdot 0.36} = 4.2 \text{ кВт}.$$

Для максимальных значений  $Q_{\max} = 21645$  м<sup>3</sup>/ч,  $H_{\max} = 67$  кгс/м<sup>2</sup>,  $\eta = 0,41$ , тогда:

$$P_{\max} = \frac{Q_{\max} \cdot H_{\max} \cdot \rho \cdot g}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\max}} = \frac{21645 \cdot 67 \cdot 1.29 \cdot 9.81}{3600 \cdot 1000 \cdot 0.41} = 12.4 \text{ кВт}.$$

Таким образом, при регулировании осевым направляющим аппаратом энергопотребление приводом вентилятора изменяется от 4,2 до 12,4 кВт.

При регулировании производительности дутьевого вентилятора изменением частоты вращения приводного вала характеристика вентилятора при нулевом угле поворота осевого направляющего аппарата будет перемещаться параллельно вниз. Расчет параметров такой характеристики можно осуществить по приведенным соотношениям:

$$Q_{\text{НОМ}}/Q_{\min} = n_{\text{НОМ}}/n_{\min};$$

$$P_{\text{ВНОМ}}/P_{\min} = (n_{\text{НОМ}}/n_{\min})^2;$$

$$P_{\text{НОМ}}/P_{\min} = (n_{\text{НОМ}}/n_{\min})^3.$$

Так как номинальный расход воздуха  $Q_{\text{НОМ}} = 42 \cdot 103$  м<sup>3</sup>/ч происходит при номинальной частоте вращения двигателя  $n_{\text{НОМ}} = 585$  об/мин, то для

получения расхода воздуха  $Q_{\min} = 14484 \text{ м}^3/\text{ч}$  необходимо обеспечить следующую частоту вращения двигателя:

$$n_{\min} = n_{\text{ном}} \cdot Q_{\min} / Q_{\text{ном}} = 585 \cdot 14484 / 42000 = 201,7 \text{ бо/мин};$$

$$\text{Для } Q_{\max} = 21645 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$N_{\max} = n_{\text{ном}} \cdot Q_{\max} / Q_{\text{ном}} = 585 \cdot 21645 / 42000 = 301,5 \text{ об/мин.}$$

Рассчитаем мощность, потребляемую вентилятором, при различной производительности. При этом будем считать, что КПД вентилятора равно  $\eta_{\text{ном}} = 0,84$ , остается постоянным, тогда:

$$P_{\min} = \frac{14484 \cdot 30 \cdot 1.29 \cdot 9.81}{3600 \cdot 1000 \cdot 0.84} = 1.8 \text{ кВт};$$

$$P_{\max} = \frac{21645 \cdot 67 \cdot 1.29 \cdot 9.81}{3600 \cdot 1000 \cdot 0.84} = 6 \text{ кВт}.$$

Как было отмечено выше, регулирование частоты вращения двигателя вентилятора наиболее целесообразно с точки зрения надёжности осуществлять с помощью параметрического или частотного преобразователя.

При расчетах мощности, потребляемой вентилятором, не учитывались КПД таких преобразователей. Поэтому необходимо определить мощность, потребляемую электродвигателем этого вентилятора с учетом потерь на преобразование энергии.

Как было показано выше, мощность на валу двигателя, необходимая для работы механизма с вентиляторной характеристикой, пропорциональна кубу скорости. Учитывая, что электромагнитная мощность двигателя равна:

$$P_{12} = \frac{P_{\text{н}}}{1-s} = P_{\text{н}} \cdot \frac{\omega_0}{\omega}, \text{ находим:}$$

$$P_{12} = P_{\text{н}} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^3 \cdot \frac{\omega_0}{\omega} = P_{\text{н}} \frac{\omega_0}{\omega_{\text{н}}} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 = P_{\text{н}} \frac{n_0}{n_{\text{н}}} \cdot \left( \frac{n}{n_{\text{н}}} \right)^2,$$

где  $P_{\text{н}}$  и  $\omega_{\text{н}}$  - соответственно мощность, и скорость механизма при его работе в номинальном режиме;

$\omega_0, n_0$  - скорость идеального холостого хода двигателя;

$\omega, n$  - рабочая скорость двигателя.

Потери в роторной цепи при регулировании скорости, если не учитывать потери в стали и механические потери, находятся из выражения:

$$\Delta P = P_{12} - P_{\min} = P_n \frac{n_0}{n_n} \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 - P_n \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right)^3 = P_n \cdot \left( \frac{n_0}{n_n} \cdot \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 - \left( \frac{n}{n_n} \right)^3 \right).$$

Итак, при регулировании с наименьшей производительностью  $n = 201.7$  об/мин:

$$\Delta P_1 = P_n \cdot \left( \frac{600}{585} \cdot \left( \frac{201.7}{585} \right)^2 - \left( \frac{201.7}{585} \right)^3 \right) = 0,08 P_n = 0,08 \cdot 55 \cdot 10^3 = 4,4 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_2 = P_n \cdot \left( \frac{600}{585} \cdot \left( \frac{301.5}{585} \right)^2 - \left( \frac{301.5}{585} \right)^3 \right) = 0,135 \cdot P_n = 0,135 \cdot 55 \cdot 10^3 = 7,4 \text{ кВт}.$$

Тогда мощность, потребляемая при параметрическом регулировании будет равна:

$$P_{1\text{пар}} = \frac{P_{\min} + \Delta P_1}{\eta_{\text{преобр}}} = \frac{1,8 + 4,4}{0,95} = 6,5 \text{ кВт};$$

$$P_{2\text{пар}} = \frac{P_{\max} + \Delta P_2}{\eta_{\text{преобр}}} = \frac{6 + 7,4}{0,95} = 14,1 \text{ кВт}.$$

где  $\eta_{\text{преобр}} = 0,95$  – КПД регулятора напряжения.

При частотном регулировании изменяется скорость идеального холостого хода, поэтому дополнительные потери в двигателе не возникают.

Тогда мощность, потребляемая при частотном регулировании будет равна:

$$P_{1\text{част}} = \frac{P_{\min}}{\eta_{\text{преобр}}} = \frac{1,8}{0,95} = 2 \text{ кВт};$$

$$P_{2\text{част}} = \frac{P_{\max}}{\eta_{\text{преобр}}} = \frac{6}{0,95} = 6,3 \text{ кВт}.$$

Сопоставляя диапазон мощностей, потребляемых дутьевым вентилятором, таблица 3, при различных способах регулирования производительности, можно сделать вывод о том, что наиболее экономичным является регулирование с использованием преобразователя частоты.

Таблица 3 - Потребляемая мощность при разных способах регулирования

Способ регулирования	Диапазон мощностей, кВт
Осевым направляющим аппаратом	4,2 – 12,4
Параметрическое регулирование	6,5 – 14,1
Частотный преобразователь	2 – 6,3

На рисунке 8 приведены графики потребляемой мощности дутьевого вентилятора за один летний и за один зимний день при регулировании ОНА и частотным преобразователем.

Рассчитаем электроэнергию, потребляемую вентилятором в течение года, при регулировании осевым направляющим аппаратом и при регулировании частотным преобразователем. Установка работает круглосуточно 364 дня в году.

Суммарная мощность, потребляемая вентилятором, за один летний, осенний, зимний и весенний день соответственно, составит:

- при регулировании ОНА:  $W_1=216,4$ кВт•ч,  $W_2=246,7$  кВт•ч,  $W_3=225,8$  кВт•ч,  $W_4=199,5$  кВт•ч;

- при регулировании частотным преобразователем:  $W_1=108,1$  кВт•ч,  $W_2=121,4$  кВт•ч,  $W_3=111,2$  кВт•ч,  $W_4=96,8$  кВт•ч.

$$W_{\text{год}} = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) \cdot 91;$$

$$W_{\text{ОНА}} = (216,4 + 24,7 + 225,8 + 199,5) \cdot 91 = 242533,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{ЧП}} = (108,1 + 121,4 + 111,2 + 96,8) \cdot 91 = 119437,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Экономия электроэнергии за год составит:

$$\Delta W = W_{\text{ОНА}} - W_{\text{ЧП}} = 242533,2 - 119437,5 = 123095,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Таким образом, видно, что применение частотного преобразователя позволяет получить существенную экономию электроэнергии за год.



## 2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

От правильного выбора электродвигателя по мощности зависит надежность электропривода и его энергетических характеристик во время работы. В тех случаях, когда нагрузка на двигатель значительно меньше номинальной, она недоиспользуется по мощности, что указывает на чрезмерные капиталовложения. Если нагрузка на вал двигателя превышает номинальное значение, это приводит к увеличению токов в его обмотках, и потери мощности увеличиваются, так что температура двигателя может превышать допустимое значение, что приводит к уменьшению электрической прочности электроизоляционного материала, вследствие изменения их физико-химических свойств. Это связано с опасностью разрушения изоляции обмоток и отказа двигателя. Температура нагрева изоляции обмоток не должна превышать допустимого значения [22].

Вторым условием выбора двигателя является то, что его перегрузочная способность должна быть достаточной для стабильной работы электропривода в периоды максимальной нагрузки.

При проектировании электропривода мощность выбирается выше по сравнению с расчетной.

Основными параметрами тягодутьевых машин являются их производительность и создаваемое давление. Создаваемое давление представляет собой разницу общего давления в выходной и входном патрубках машин. Характеристикой дутьевых вентиляторов считается связь между общим давлением  $H$  и выходом  $Q$  при заданной скорости вращения и плотности перемещаемой среды.

Максимальная мощность тягодутьевой машины, установленной на котле, предназначена для вентилятора:

Потребляемая мощность при полной нагрузке тягового двигателя определяется по формуле:

$$N = \frac{1.2 \cdot Q \cdot h_n}{\eta_n \cdot 3600 \cdot 102}, \text{кВт},$$

где  $Q$  - производительность машины;

$h_n$  - полный напор машины, мм вод. ст.;

$\eta_n$  - к.п.д. машины по полному напору в долях единицы.

Потребляемая мощность для вентилятора:

$$N = \frac{1,2 \cdot 43000 \cdot 155}{0,75 \cdot 3600 \cdot 102} = 16,88 \text{ кВт}.$$

Для вентилятора мы выбираем двигатель 280S6. Номинальные данные двигателя приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Данные оценки двигателя

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВт	$P_2$	18,5
Номинальная частота вращения, об/мин	$n_H$	585
Синхронная частота вращения, об/мин	$n_0$	600
КПД, %	$\eta$	88,5
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,83
Номинальный ток при 380 В, А	$I_H$	33,77
Номинальный момент, Н·м	$M_H$	242,15
Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	$J$	0,4
Параметры схемы замещения, отн. ед.	$X_\mu$	6,6
	$R_1'$	0,057
	$X_1'$	0,13
	$R_2''$	0,026
	$X_2''$	0,16



### 3 ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Управление тяговыми параметрами осуществляется с помощью частотно-управляемого асинхронного электропривода с использованием индивидуального преобразователя частоты (инвертора) серии А300 (см. Рис. 9).

Для вентилятора мы выбираем инвертор – А300-022-Т4 с техническими характеристиками:

- полная мощность, кВА-30;
- номинальная мощность двигателя, кВт - 22;
- номинальный ток нагрузки, А - 45;
- сеть питания - 3 380 В, + 10%, -15%, 50 Гц 2%;
- выходное напряжение 3 0 ... 380 В 2%;
- выходная частота - 1 ... 50 (400) Гц 0,1%;
- ток перегрузки - 150% от номинального значения 60 с, время усреднения 10 мин;
- КПД - не менее 0,95 (без учета электродвигателя);
- сопротивление изоляции - не менее 1 мм (между электрически неразъемными частями и относительно корпуса);
- электрическая прочность изоляции - 2500 В, 50 Гц в течение 1 мин.

Электропривод А300-022-Т4 базовой конструкции (климатическая модификация УХЛ, категория размещения 4 по ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543.1-89) входящие в его состав, должны эксплуатироваться в помещениях, отвечающих требованиям «Правило установки электроустановок» при соблюдении следующих условий:

- сухое закрытое пространство;
- температура окружающей среды от +1 до +50;
- относительная влажность 80% при температуре 20<sup>0</sup> С (без конденсации);

- содержание коррозионных агентов разрешено работать в атмосфере типа 2 по ГОСТ 15150-69;
- содержание непроводящей пыли не должно превышать  $0,7 \text{ мг} / \text{м}^3$ ;
- среда не взрывоопасна, не содержит агрессивных газов и паров в концентрациях, которые разрушают металлы и изоляцию, а также окружающую среду, которая не насыщена проводящей пылью и водяным паром;
- влияние механических факторов внешней среды должно соответствовать группе условий эксплуатации МЗ по ГОСТ17516.1-90Е;
- место установки должно быть защищено от воды, эмульсии, масла и т. д. .;
- рабочее положение шкафов электропривода в пространстве вертикально, отклонение от вертикали до 5% возможно в любом направлении.

Все вышеуказанные рабочие условия полностью совпадают с требуемыми условиями эксплуатации в технической задаче этого проекта, поэтому выбранный привод полностью подходит для этого проекта.

Электрическая схема силовой части преобразователя приведена на рисунке 9.

Переменное напряжение сети питания с постоянной амплитудой и частотой переходит в неконтролируемый выпрямитель. Выпрямитель и емкостный фильтр образуют звено постоянного тока. На выходе фильтра на вход автономного инвертора напряжения подается напряжение постоянного тока [24].

Автономный инвертор напряжения выполнен на основе силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT.

В инверторе напряжение постоянного тока преобразуется в трехфазное импульсное напряжение переменной амплитуды и частоты. Согласно сигналам системы управления каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующие силовые транзисторы инвертора к

положительным и отрицательным полюсам постоянного тока. Длительность соединения каждой обмотки в период повторения импульсов модулируется синусоидальным законом. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода и уменьшается до начала и конца полупериода.

Таким образом, система управления обеспечивает широтно - импульсную модуляцию.

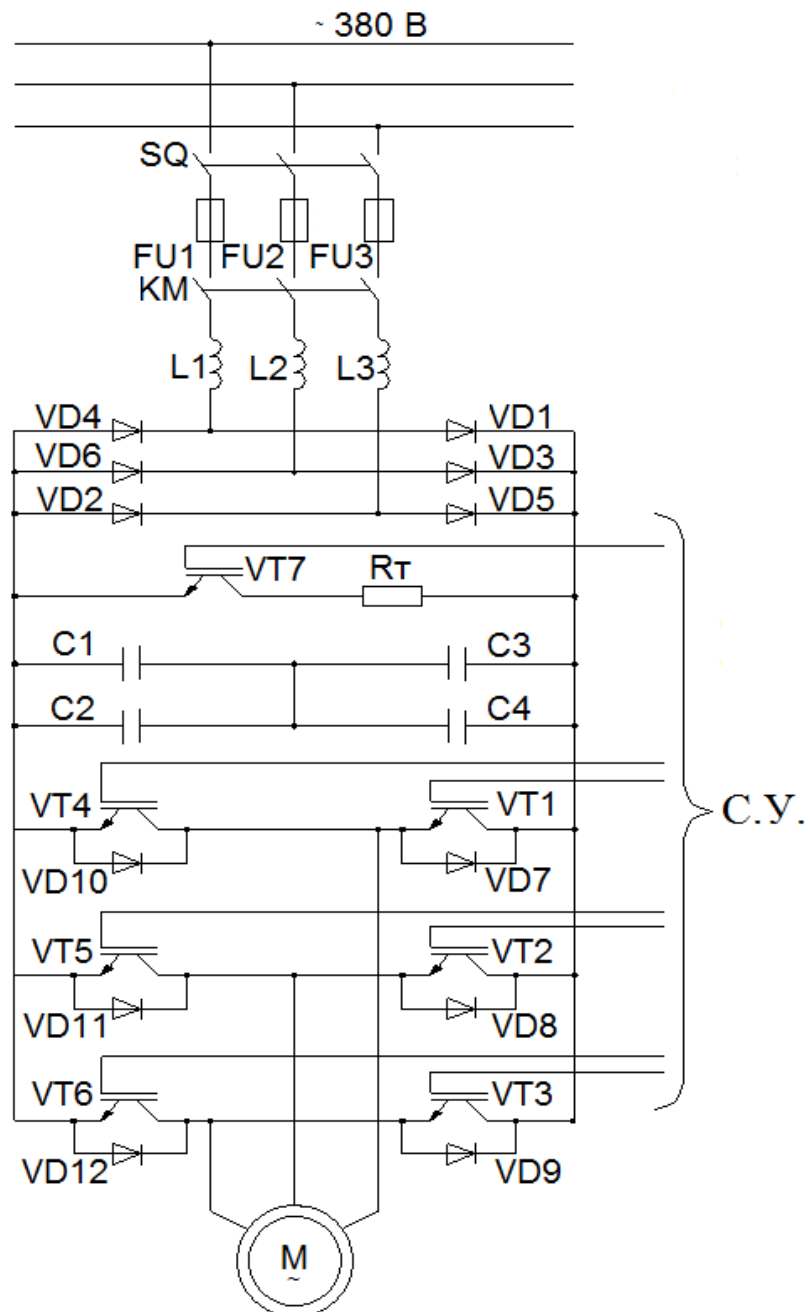


Рисунок 9 - Электрическая схема силовой части преобразователя

(ШИМ) напряжения, приложенного к обмоткам двигателя, амплитуда и частота напряжения определяются параметрами модулирующей синусоидальной функции.

При высокой несущей частоте ШИМ (2 ... 16 кГц) обмотки двигателя работают как фильтр из-за их высокой индуктивности. Поэтому в них течет синусоидальный ток [24].

Таким образом, на выходе преобразователя частоты формируется трехфазное переменное напряжение переменной частоты и амплитуды.

Схема содержит следующие элементы SQ и FU1 - FU3 - разъединитель с высокоскоростными предохранителями; KM - стартер; L1 - L3 - входной (сетевой) дроссель; VD1 - VD6 - входной неконтролируемый двухполупериодный выпрямитель; VT7, R<sub>T</sub> - блок управления тормозным резистором; C1 - C4 - мощность фильтра; VT1 - VT6 и VD7 - VD12 - выходной преобразователь; M - асинхронный двигатель.

Использование асинхронного двигателя в сочетании с преобразователем частоты позволяет создать эффективную и недорогую систему для регулирования электропривода. Для управления асинхронным двигателем переменного тока преобразователь частоты контролирует и изменяет частоту и напряжение, приложенные к обмоткам.

Требования к электроприводу определяются диапазоном заданных скоростей и типа нагрузки. В зависимости от характера нагрузки преобразователь частоты обеспечивает различные режимы управления двигателем, реализуя ту или иную связь между скоростью вращения двигателя и выходным напряжением. Для регулирования электроприводов насосов и вентиляторов используется напряжение и частота ( $U / f = \text{const}$ ) [24].

Принцип частотного преобразователя или, как его часто называют, инвертор: напряжение переменного тока промышленной сети выпрямляется выпрямительным диодным блоком и фильтруется конденсаторной емкостью большой емкости для минимизации пульсаций принимаемого напряжения.

Это напряжение применяется к мостовой схеме. Включая шесть управляемых транзисторов IGBT с диодами, подключенными антипараллельно для защиты транзисторов от обратной полярности напряжения пробоя, которая возникает при работе с обмотками двигателя (рисунок 10).

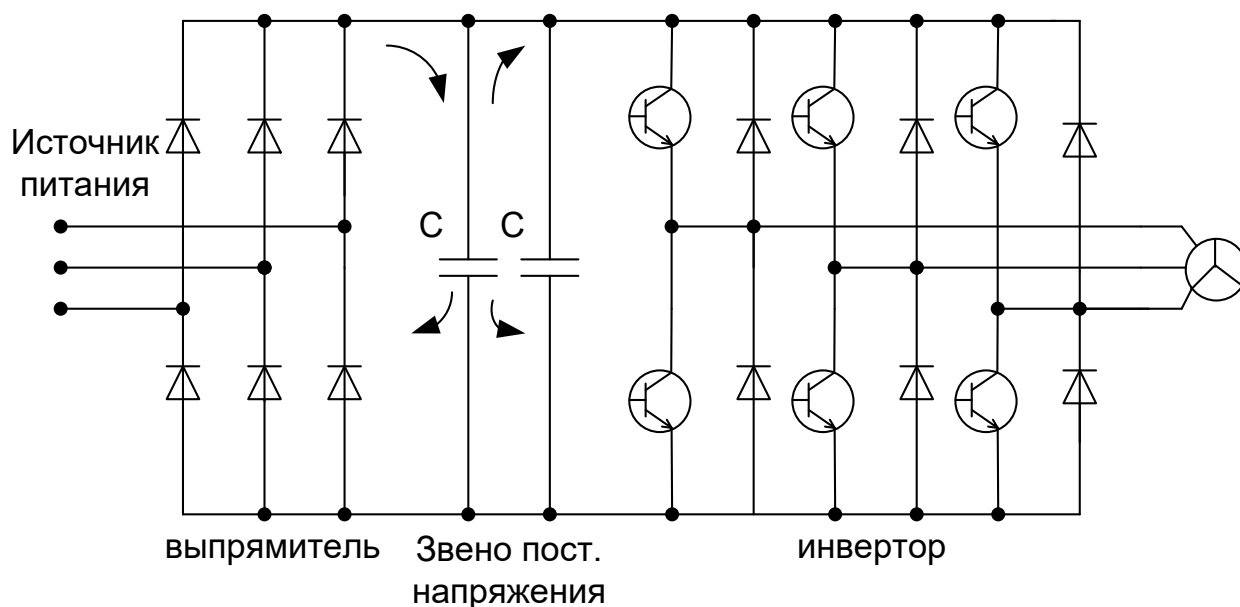


Рисунок 10 - Блок-схема преобразователя частоты

Используя специальный алгоритм управления - открывающие и закрывающие поперечные пары транзисторов образуют последовательность импульсов напряжения разных рабочих циклов - это называется широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в фазах двигателя. В то же время ток в фазах двигателя принимает вид синусоидов, сдвинутых во времени, что является достаточным для формирования вращающегося магнитного поля и вращения двигателя. Использование (ШИМ) позволяет контролировать и регулировать потребляемую мощность двигателя, а точнее управлять им с помощью специальных оптимизированных алгоритмов. При увеличении частоты переключения импульсов ШИМ (выше 4 кГц) шум двигателя и преобразователя становится менее заметным и обеспечивает более комфортную работу окружающего персонала. Однако по мере увеличения частоты в ШИМ управляемые переключатели питания - транзисторы IGBT

обеспечивают более высокую температуру, чем при более низких частотах переключения. В этом случае встроенная защита может отключить преобразователь, если температура транзисторов близка к максимальной, и инвертор полностью загружен. Рекомендуется использовать высокочастотную ШИМ с неполной нагрузкой преобразователя частоты и только там, где требуется бесшумная работа.

## **4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА**

Система автоматического управления должна обеспечивать подачу воздуха в камеру котла, в соответствии с объемом поступающего газа к своим горелкам в соотношении 5:1: при увеличении объема газа из трубопровода до горелок, необходимо увеличить объем подаваемого воздуха и, наоборот, подавать в котел. Это регулирование необходимо для создания стабильного режима горения горелки на горелках и максимального сгорания газа, поступающего из магистрали, что, в свою очередь, приводит к максимальной эффективности котла.

### **4.1. Разработка структурной схемы системы автоматического управления**

Чтобы получить значение постоянных времени интегрирования и коэффициентов регулятора, чтобы изучить особенности электропривода дутьевого вентилятора, проведем моделирование его работу с использованием математической модели, реализованной на ПЭВМ в среде программного пакета Matlab, используя Приложение Simulink [6,29].

Чтобы построить математическую модель, Simulink предоставляет необходимое количество библиотек, в которых есть всевозможные элементы, необходимые для структурных схем. Соответственно, задача проектирования заключается в воссоздании структуры объекта управления и САУ с этим объектом с реализацией в нем математической модели силовой части электропривода, регулятора воздушного потока, в зависимости от цели и объема задача решается, вычисленные данные каждого структурного элемента в относительных единицах заменяются. В процессе расчета можно ввести необходимые эффекты на систему (по возмущению и управлению), что приведет к получению осциллограмм различных процессов.

Конструкция модели объекта управления должна выполняться так, чтобы модель вентилятора и двигателя использовала общее значение - скорость вращения ротора. В этом случае будет использоваться электрическая угловая скорость.

Основной характеристикой вентиляторов является зависимость развитого давления  $H$  от скорости потока этих механизмов  $Q$ , Па:

$$H = H_0 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - CQ^2,$$

где  $H$  - давление, создаваемое вентилятором, Па;

$\omega$  - электрическая скорость вращения вала, об/мин;

$\omega_n$  - номинальная механическая скорость вращения вала вентилятора, об/мин;

$H_0$  - давление, создаваемое при закрытой задвижке (то есть когда отсутствует расход  $Q = 0$ ) на номинальной скорости;

$C$  - конструктивный коэффициент вентилятора, принимаем  $C = 1$ ;

$Q$  - расход,  $м^3 / ч$ .

В дополнение к характеристикам вентилятора также характерна воздушная сеть (котельная камера), на которой она работает. Характеристикой воздушной сети является соотношение между скоростью потока  $Q$  и давлением  $H$ , необходимым для преодоления избыточного давления на выходе из трубопровода для инъекций:

$$H = H_C + RQ^2,$$

где  $H_C$  - давление, обусловленное разностью высот нагнетания и всасывания, в нашем случае примем  $H_C = 0$ ;

$R$  - сопротивление воздушной сети, примем  $R$  учитывая конструкцию камеры минимальным, равным 0,001;

$Q_B$  - расход воздуха,  $м^3 / ч$ .

Соответственно уравнение примет вид:



$$H = R \cdot Q^2.$$

После преобразования:

$$Q = \sqrt{\frac{H}{R}}.$$

Из формулы видно, что при постоянном давлении  $H$ , чем больше сопротивление воздушной сети  $R$ , тем меньше будет расход  $Q$  и наоборот.

Расход воздуха (объем воздуха)  $Q_v$  в котле, создаваемый ВД, зависит от количества потока газа  $Q_g$ , поступающего в котел в соотношении 1 условная единица газа - 5 условная единица воздуха.

Основываясь на приведенных выше формулах с использованием Simulink, мы строим модель системы вентилятор - магистраль (рис. 11).

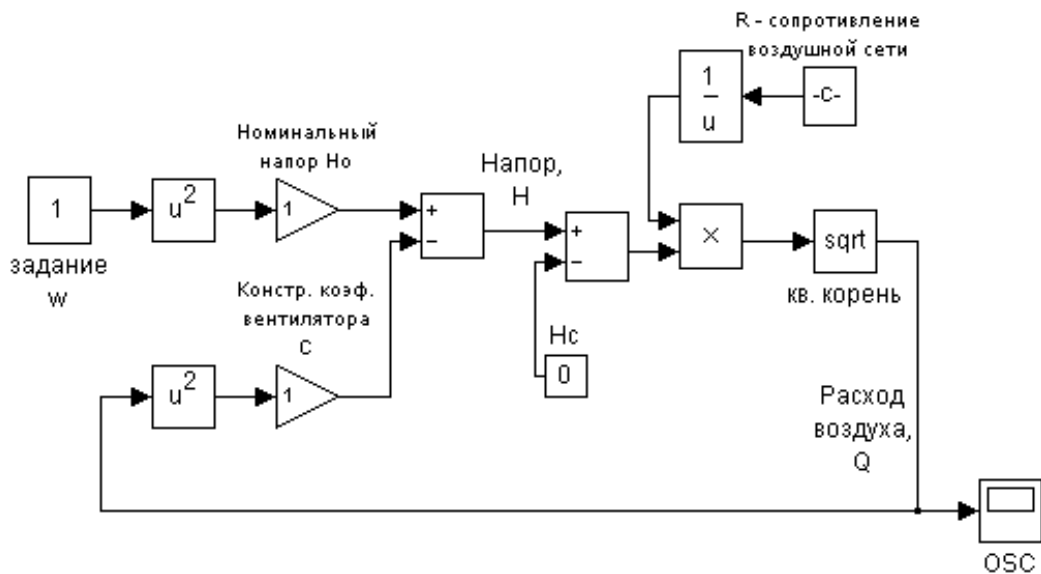


Рисунок 11 - Модель системы вентилятор - магистраль

Левая половина модели получена из формулы, описывающей характеристику вентилятора, с его параметрами, такими как напор, созданный при закрытой задвижке  $H_0$ , и расчетный коэффициент вентилятора  $C$ . В правой половине характеристика основная часть выполнена с ее статической головкой и сопротивлением воздушной сети  $R$ .

Созданная модель отражает реальный объект, который можно отрегулировать и контролировать. Изменяя параметры, модель позволяет

анализировать любые процессы, происходящие в системе. Дополнив модель переменного тока электроприводом, мы моделируем существующую модель вентилятора.

Наша цель - найти способ автоматического управления потоком воздуха котла, поступающего в камеру, в соответствии с описанным выше соотношением, для которого необходимо создать замкнутую систему подчиненного регулирования путем отклонения, элементами которого являются регулятор, фильтр и звено объекта, с передаточными функциями  $W_p$ ,  $W_\phi$ ,  $W_o$ , соответственно.

Инерция звена объекта создает электрический привод асинхронного двигателя, преобразователя частоты и датчиков регулируемых величин. Инерция датчиков намного меньше, чем инерция привода, поэтому при построении регулятора его можно игнорировать, а систему можно рассматривать как неинерциальную одиночную обратную связь.

Преобразователь частоты имеет два внутренних контура - токовый контур и контур скорости, схему управления разрядом - технологическая схема будет считаться третьей.

Таким образом, передаточные функции канала частотного преобразователя, объекта и фильтра представлены в виде апериодической линии второго порядка, стандартная передаточная функция второй замкнутой системы имеет вид [30]:

$$\Phi_2(p) = \frac{1}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1}.$$

#### **4.2 Синтез регулятора третьего контура (расход воздуха) и его свойства**

На входе САУ имеется сумматор, на котором выделяется ошибка между заданным значением и сигналом обратной связи (настройка коэффициента обратной связи доступна для пользователя). Таким образом,

мы получаем математическую модель электропривода САУ вентилятора (рисунок 12), САУ включает в себя математическую модель системы вентилятор - магистраль (см. Рисунок 11) и регулятор «И» системы управления воздушным потоком.

Согласно стандартной процедуре, передаточная функция регулятора воздушного потока имеет вид:

$$R_3(p) = [W_3(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_3 p}.$$

В результате преобразований получаем И интегральный регулятор с постоянной времени:

#### **4.3. Анализ математической модели системы автоматического управления**

Воспользуемся моделью автоматической системы управления дутьевым вентилятором. Запустим модель установки. Первая секунда осциллограммы показывает (рисунок 13), что заданный расход (объем) газа поступает в камеру котла одновременно с десятикратным превышением скорости потока газа (объема), дутьевой вентилятор обеспечивает подачу воздуха, переходный процесс стабилизируется, котел работает в номинальном режиме. Кроме того, моделируется уменьшение потока газа, и, как видно из осциллограмм, система управления уменьшает поток воздуха к котлу. Свидетельством работоспособности системы в различных режимах работы котла является уже описанное изменение подачи воздуха по отношению к подаче газа в котел, а также поддержание пропорции подачи воздуха по отношению к газу без изменений в разных режимах работы режимы котла в соотношении 1:5 [28,29]. При создании подчиненных систем регулирования, в общем, принимаются следующие обобщения:

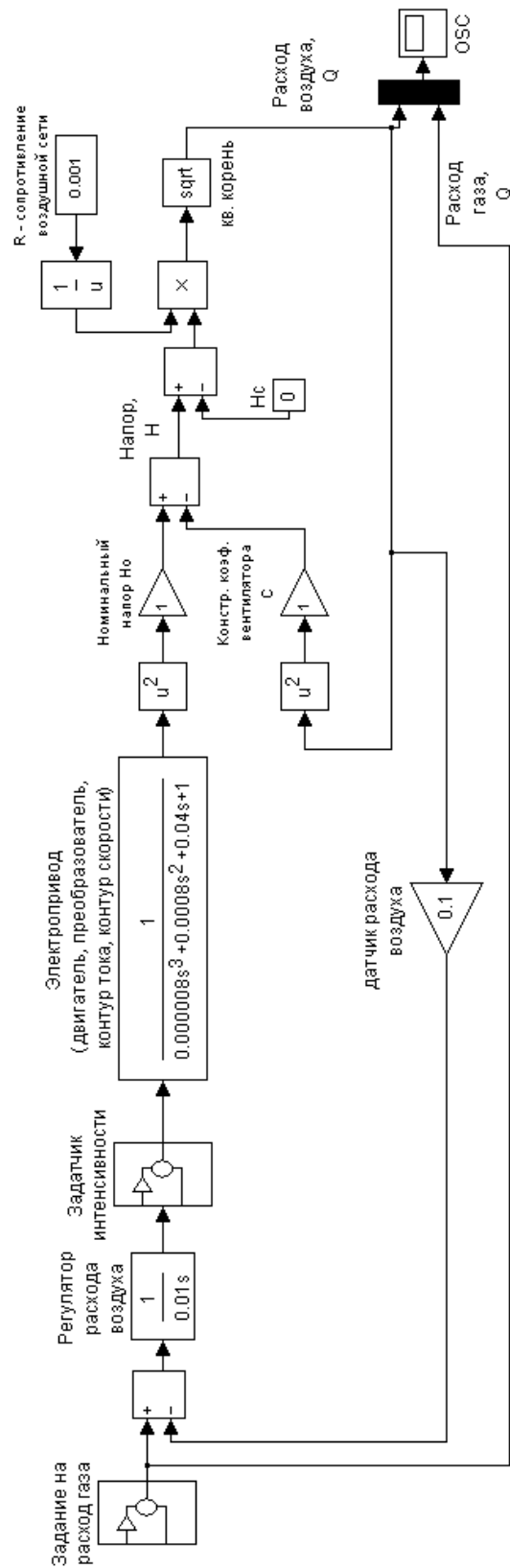


Рисунок 12 - Математическая модель электропривода САУ дутьевого вентилятора

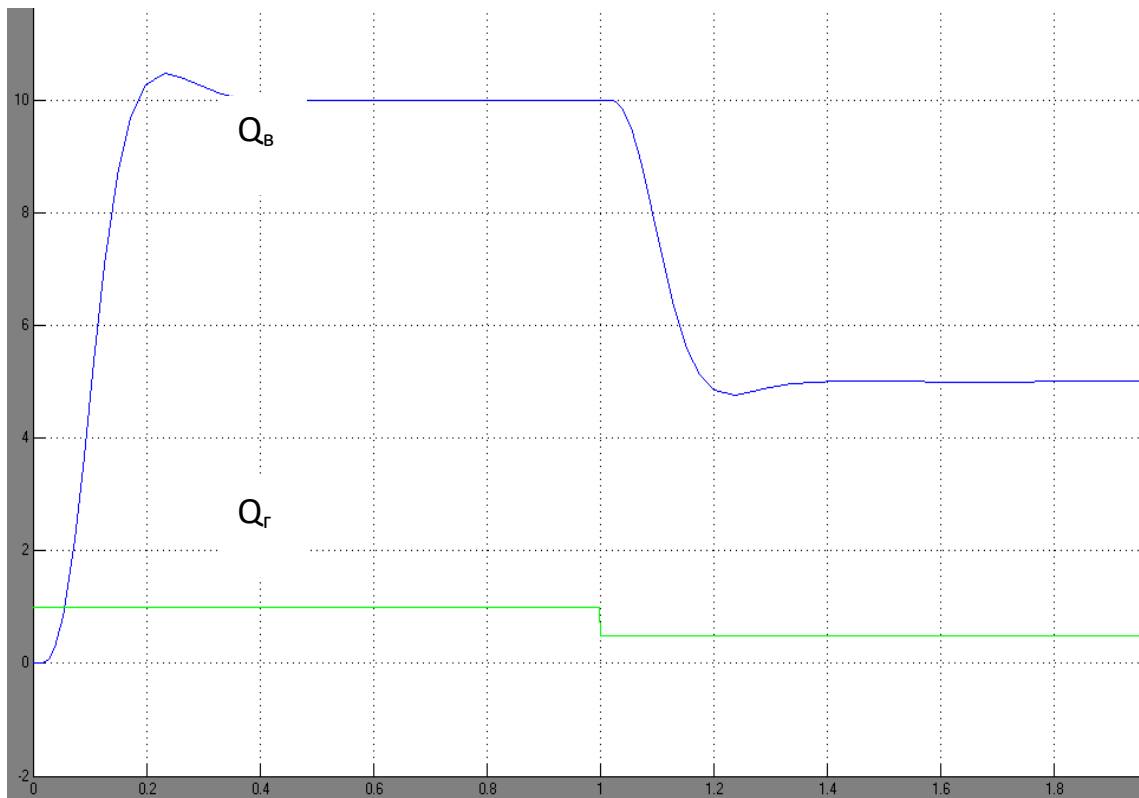


Рисунок 13 - Осциллограмма работы воздушного потока ACS

- каждый последующий контур системы подчиненного регулирования имеет скорость, примерно вдвое меньшую, чем в предыдущем;
- все схемы обеспечивают переходные процессы с относительно небольшим превышением;
- динамические свойства многоконтурной системы и, прежде всего, ее скорости полностью определяются количеством схем и величиной не компенсированной постоянной времени  $T_{\mu}$ .

## 5 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Техническая эксплуатация и обслуживание электрооборудования котельных невозможно без знания основных понятий технического обслуживания котельных.

Для проверки и закрепления результатов обучения по различным дисциплинам существует дидактический тест. Дидактический тест – это набор заданий по определенному материалу, устанавливающий степень усвоения его обучающимися. Существует ряд требований к дидактическому тесту:

1. надежность – то есть в сходных условиях показывать те же результаты;
2. валидность – тест обнаруживает и измеряет те знания, которые хочет измерить разработчик теста;
3. объективность – соответствии действительности, свобода от субъективных факторов.

Так же выделяют следующие виды тестовых заданий дидактического теста:

- задания открытого типа;
- задания закрытого типа;
- задания на установку соответствия;
- задания на установление правильной последовательности.

В данной выпускной квалификационной работе был разработан дидактический тест по дисциплине «Организация работ по ремонту оборудования электрических сетей» специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции, для проверки и закрепления полученных обучающимися знаний.

## Разработка дидактических средств для занятия

### АННОТАЦИЯ

дидактического теста

для проведения контрольного опроса обучающихся

по дисциплине «Электрооборудование теплоэлектрических станций» по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

Дидактический тест содержит 20 тестовых заданий.

Время, отводимое для выполнения теста, – 40 минут.

Проверка тестового задания осуществляется с помощью утверждённого ключа.

Оценка тестовых заданий производится в соответствии с утверждёнными критериями:

№	Процент правильных ответов	Оценка по общепринятой шкале
1	90-100%	отлично
2	60-89%	хорошо
3	30-59%	удовлетворительно
4	0-29%	неудовлетворительно

## ИНСТРУКЦИЯ

по выполнению дидактического теста

по дисциплине «Электрооборудование теплоэлектрических станций» по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

Уважаемые студенты!

Вашему вниманию представляется дидактический тест для проведения контрольного опроса. Вы должны выполнить предложенные вам тестовые задания за 40 минут и внести ответы в **бланк** ответа.

Предварительно вам необходимо заполнить справочные позиции бланка.

При внесении в бланк ответов на тестовые задания вы должны соблюдать правила заполнения бланка ответов в зависимости от вида тестового задания.

При выполнении заданий с формулировкой «**Выберите номер правильного варианта ответа**» вы должны выбрать **один** правильный ответ из предложенных и проставить его номер в соответствующую позицию в бланке ответа.

При выполнении заданий с формулировкой «**Установите соответствие**» вы должны найти такие однозначные связи между позициями первого и второго столбиков, чтобы одной позиции первого столбика соответствовала только одна позиция второго, а повтор используемых позиций категорически запрещён. Установленное соответствие внести в бланк ответа.

При выполнении заданий с формулировкой «**Установите правильную последовательность**» необходимо расставить предложенные позиции в нужной последовательности и отразить ее в бланке ответа.

При выполнении заданий с формулировкой «**Дополните**» вы должны определить пропущенную информацию и внести ее в соответствующую позицию бланка ответа.



## ДИДАКТИЧЕСКИЙ ТЕСТ

для проведения контрольного опроса обучающихся

по дисциплине «Электрооборудование теплоэлектрических станций» по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

1. Дополните

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

УСТАНАВЛИВАЕТ РАВЕНСТВО МЕЖДУ \_\_\_\_\_

2. Дополните

ДЛЯ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

НЕОБХОДИМЫ \_\_\_\_\_

3. Дополните

ВОДЯНЫЕ ЭКОНОМАЙЗЕРЫ ПРЕДНАЗНАЧЕНЫ ДЛЯ \_\_\_\_\_

4. Дополните

ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ \_\_\_\_\_

5. Дополните

К ОСНОВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

ОТНОСЯТСЯ \_\_\_\_\_

6. Дополните

ПО КОНСТРУКЦИИ ПАРОВЫЕ КОТЛЫ ДЕЛЯТСЯ НА \_\_\_\_\_

7. Дополните

ПО ДАВЛЕНИЮ ПОЛУЧАЕМОГО ПАРА КОТЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ  
ДЕЛЯТСЯ НА \_\_\_\_\_

8. Дополните

КОТЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 0,01 – 5,5  
КГ/С ОТНОСЯТСЯ К КОТЛАМ \_\_\_\_\_

9. Дополните

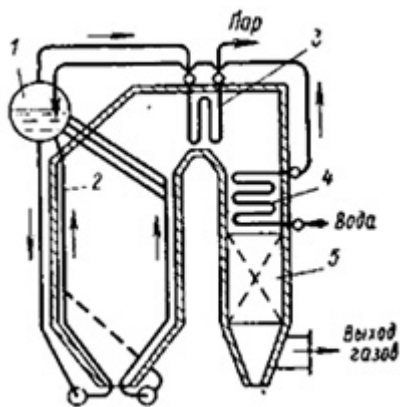
\_\_\_\_\_ - ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

10. Дополните

СОВРЕМЕННЫЕ ТОПОЧНЫЕ УСТРАЙСТВА РАЗДЕЛЯЮТ НА \_\_\_\_\_

---

11. Установите соответствие



НОМЕР ЭЛЕМЕНТА

1.

2.

3.

4.

5.

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА

А. Воздухоподогреватель

В. Барабан

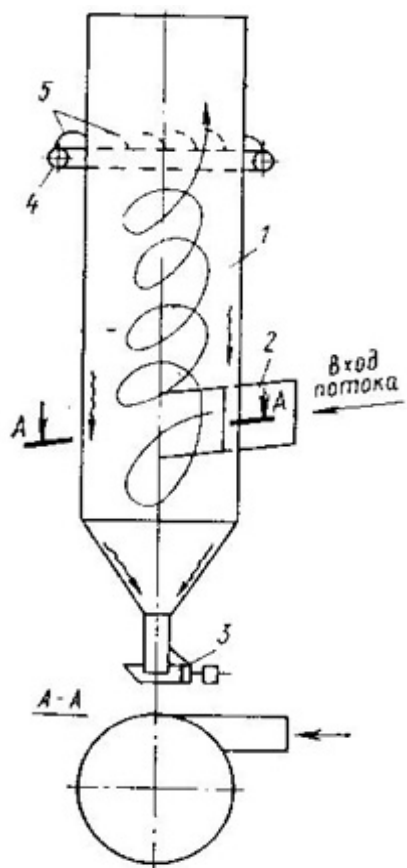
С. Пароперегреватель

Д. Испарительные

поверхности

Е. Экономайзер

12. Установите соответствие



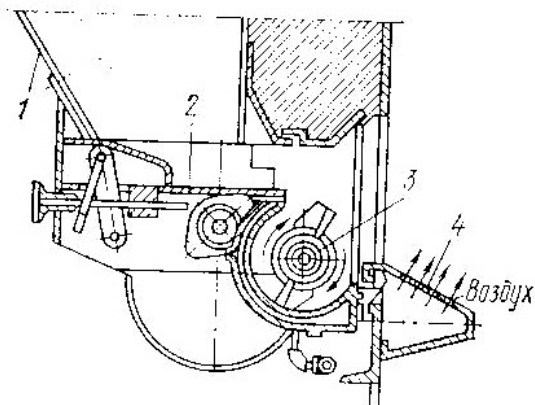
НОМЕР ЭЛЕМЕНТА

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА

- А. Входной патрубок
- В. Корпус
- С. Коллектор подвода вода
- Д. Оросительные сопла
- Е. Клапан

13. Установите соответствие



НОМЕР ЭЛЕМЕНТА	НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА
1.	А. Роторный метатель
2.	В. Бункер
3.	С. Сопловая решетка
4.	Д. Питатель

14. Выберите правильный ответ

СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ПРИЗВАНО РЕШИТЬ ЗАДАЧИ

1. Контроля устройств автоматического регулирования
2. Проверки правильности функционирования горелок
3. Определения актуального состояния внутренних элементов нагрева

оборудования

4. Все перечисленные

15. Дополните

\_\_\_\_\_ - КОМПЛЕКС УСТРОЙСТВ ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

16. Дополните

\_\_\_\_\_ - СОВОКУПНОСТЬ УСТРОЙСТВ И МЕХАНИЗМОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДЯНОГО ПАРА ИЛИ ПОЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ

17. Выберите правильный ответ

ПО ХАРАКТЕРУ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В  
ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОТЕЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ  
ДЕЛЯТСЯ НА

1. Естественно и принудительно циркулирующие
2. Естественно циркулирующие и прямоточные
3. Прямоточные и не проточные
4. Естественно и принудительно циркулирующие и прямоточные

18. Выберите правильный ответ

ФЕСТОН ЭТО

1. полурadiaционная поверхность нагрева, располагаемая в выходном окне топки и образованная, как правило, трубами заднего экрана, разведенными в несколько рядов
2. система параллельно включенных труб конвективной парообразующей поверхности котельного агрегата, соединенных общими коллекторами или барабанами
3. радиационные поверхности, расположенные в одной плоскости возле внутренней поверхности стен топочной камеры
4. горизонтально расположенный толстостенный полый стальной цилиндр большого диаметра имеющий ряды отверстий цилиндрической формы, в которые вварены или завальцованы трубы кипяточного пучка

19. Выберите правильный ответ

БАРАБАН ЭТО

1. горизонтально расположенный толстостенный полый стальной цилиндр большого диаметра имеющий ряды отверстий цилиндрической формы, в которые вварены или завальцованы трубы кипяточного пучка
2. радиационные поверхности, расположенные в одной плоскости возле внутренней поверхности стен топочной камеры

3. полурадиационная поверхность нагрева, располагаемая в выходном окне топки и образованная, как правило, трубами заднего экрана, разведенными в несколько рядов

4. система параллельно включенных труб конвективной парообразующей поверхности котельного агрегата, соединенных общими коллекторами или барабанами

20. Выберите правильный ответ

**ТОПОЧНЫЕ ЭКРАНЫ ЭТО**

1. радиационные поверхности, расположенные в одной плоскости возле внутренней поверхности стен топочной камеры

2. полурадиационная поверхность нагрева, располагаемая в выходном окне топки и образованная, как правило, трубами заднего экрана, разведенными в несколько рядов

3. система параллельно включенных труб конвективной парообразующей поверхности котельного агрегата, соединенных общими коллекторами или барабанами

4. горизонтально расположенный толстостенный полый стальной цилиндр большого диаметра имеющий ряды отверстий цилиндрической формы, в которые вварены или завальцованы трубы кипяточного пучка

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе, в соответствии с заданием, были сделаны необходимые расчеты для выполнения электропривода дутьевого водогрейного котла котельной.

На основе анализа существующих схем электрооборудования дутьевого вентилятора показаны возможные преимущества от введения электропривода с частотным управлением.

Сравнение показателей энергии различных способов регулирования производительности, показало целесообразность введения электропривода с частотным управлением.

Выбран преобразователь частоты.

Исследование динамических режимов запуска асинхронного электродвигателя показало, что при установке частотно-регулируемого привода улучшилось качество переходных процессов, исчезли большие токовые броски, и появилась возможность автоматического регулирования расхода воздуха.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алиев Электротехнический справочник
2. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). / Под ред. С.И. Мочана. Л.: Энергия, 1977. 256 с.
3. Аэродинамический расчет котельных установок. Нормативный метод. - М.:Энергия, 1977.-256 с.
4. Балансовые испытания парогенератора. Методические указания лабораторным работам. Саратов: СГТУ, 2000. - 27 с.
5. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
6. Гидравлический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. -М.:Энергия, 1978.-255 с.
7. Киселев, Н.А. Котельные установка / Н.А. Киселев. - М.: Высшая школа, 2015. - 270 с.
8. Ковалев А.П. Лелеев И.С., Виленский Т.В. Парогенераторы. - М.: Энергоатомиздат, 1985. 376 с.
9. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты/Под ред. Л.Н. Сидельковского. М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А., - Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
11. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Модель З.Г. Компоновка и тепловой расчет парогенератора. — М.: Энергия. 1975. — 173 с.
12. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 томах. Раздел 4. Расчет и конструирование машин. Том 4-18. Котельные установки. - М.: Машиностроение, 2010. - 400 с
13. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов. - М.: РАСХН, 2012. - 320 с.

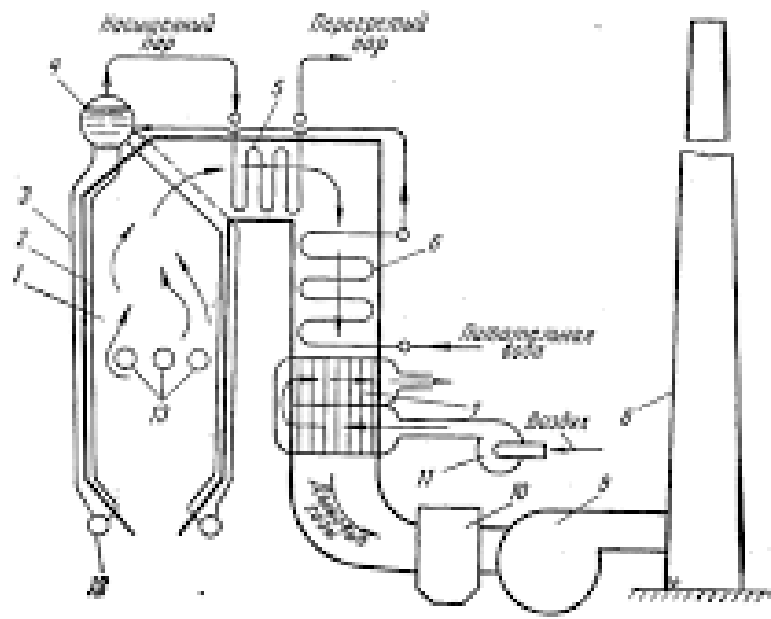


14. Осипов О. И. – Частотно – регулируемый асинхронный электропривод, Учебное пособие по курсу «Типовые решения и техника современного электропривода», - М.: Издательство МЭИ, 2004. – 80 с.
15. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. М.:Атомиздат, 1980.-360с.
16. Резников М.И., Липов Ю.М. Котельные установки электростанций. - М.:Энергоатомиздат, 1987 283 с.
17. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. М:Энергоиздат, 1981. - 240 с.
18. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промпредприятий. М.: Энегроатомиздат,1988.
19. Соколов, Б. А. Котельные установки и их эксплуатация / Б.А. Соколов. - М.: Академия, 2011. - 432 с.
20. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. - Москва: Изд-во АСАДЕМА, 2006. – 259 с.
21. Соломахова Т. С., Чебышева К. В. – Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с., ил.
22. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
23. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. - М.: Энергия,1973.-296 с.
24. Томашевский Н.И., Томашевский Д.Н., Емельянов А.А., Ипполитов В.В. Разработка электроприводов производственных механизмов: Учебно-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2006. – 229 с.
25. Тягодутьевые машины: Каталог. «Сибэнергомаш». 2005.
26. Усольцев А. А. – Частотное управление асинхронным двигателем, Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, - 94 с.

27. Фираго Б. И., Павлячик Л. Б. – Регулируемые электроприводы переменного тока, Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
28. Черкасский В. М. – Насосы, вентиляторы, компрессоры, - М., «Энергоатомиздат», 1984. - 416 с.
29. Чучкалова Е.И., Козлова Т.А., Суриков В.П. Технико-экономические расчеты в выпускных квалификационных работах: Учебное пособие. Екатеринбург: изд. ГОУ ВПО "РГППУ", 2010. - 66с.
30. Шерстюк А. Н. Насосы, вентиляторы и компрессоры, - Учебное пособие для втузов, М, «Высшая школа», 1972, - 344 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Графическая часть



Общий вид котельной

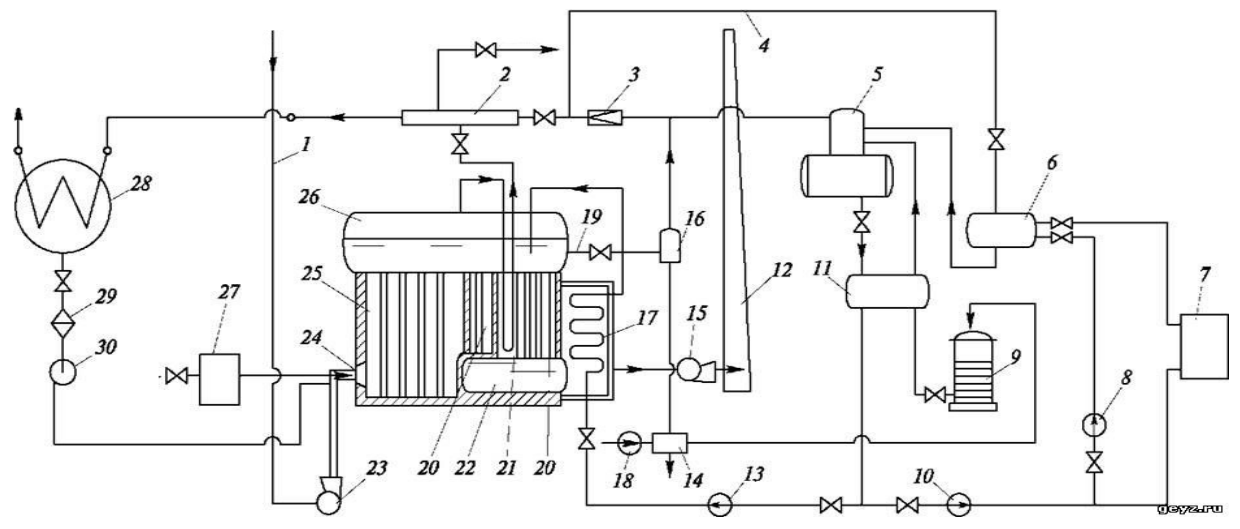
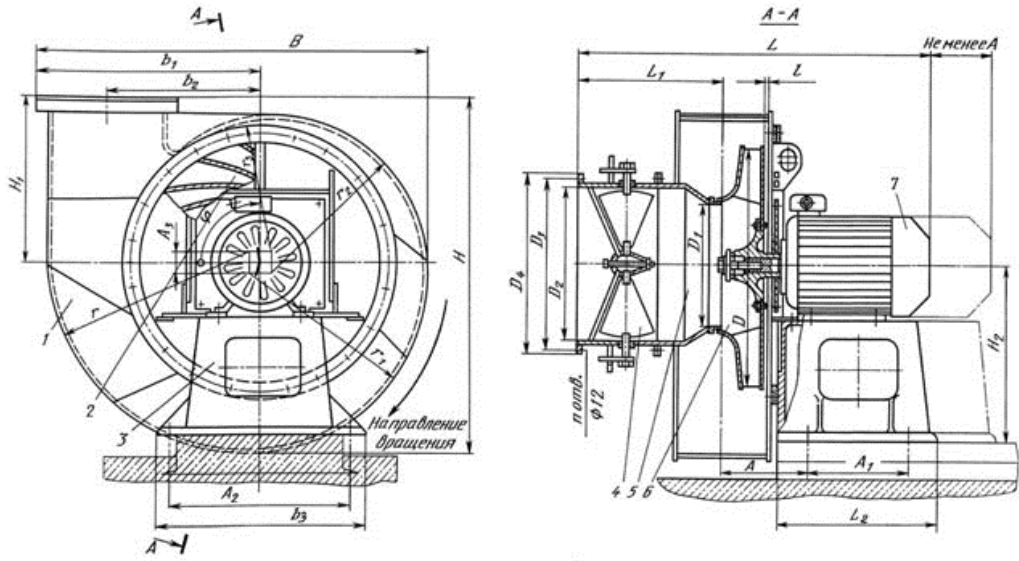


Схема котельной установки

### Центробежные дутьевые вентиляторы



### Внешний вид вентилятора

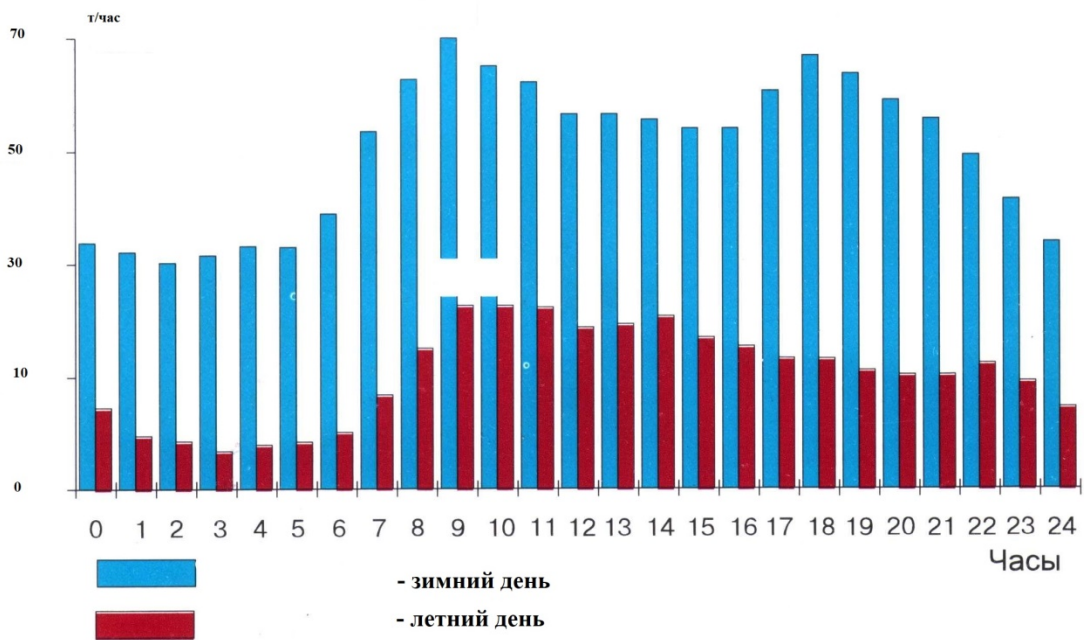


Диаграмма нагрузки парового котла за сутки

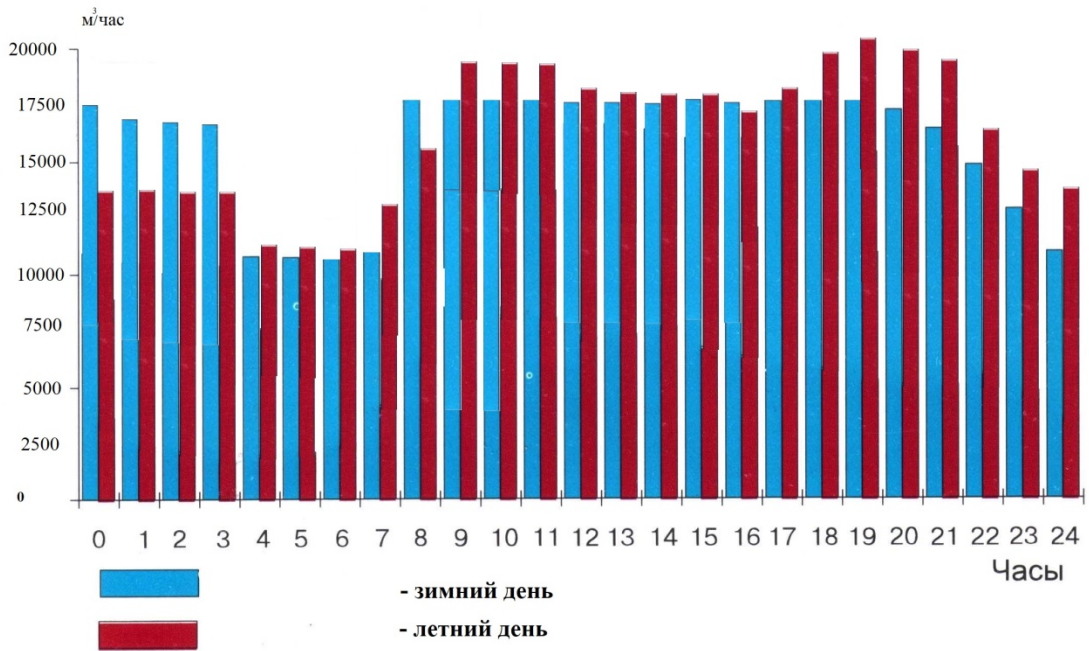
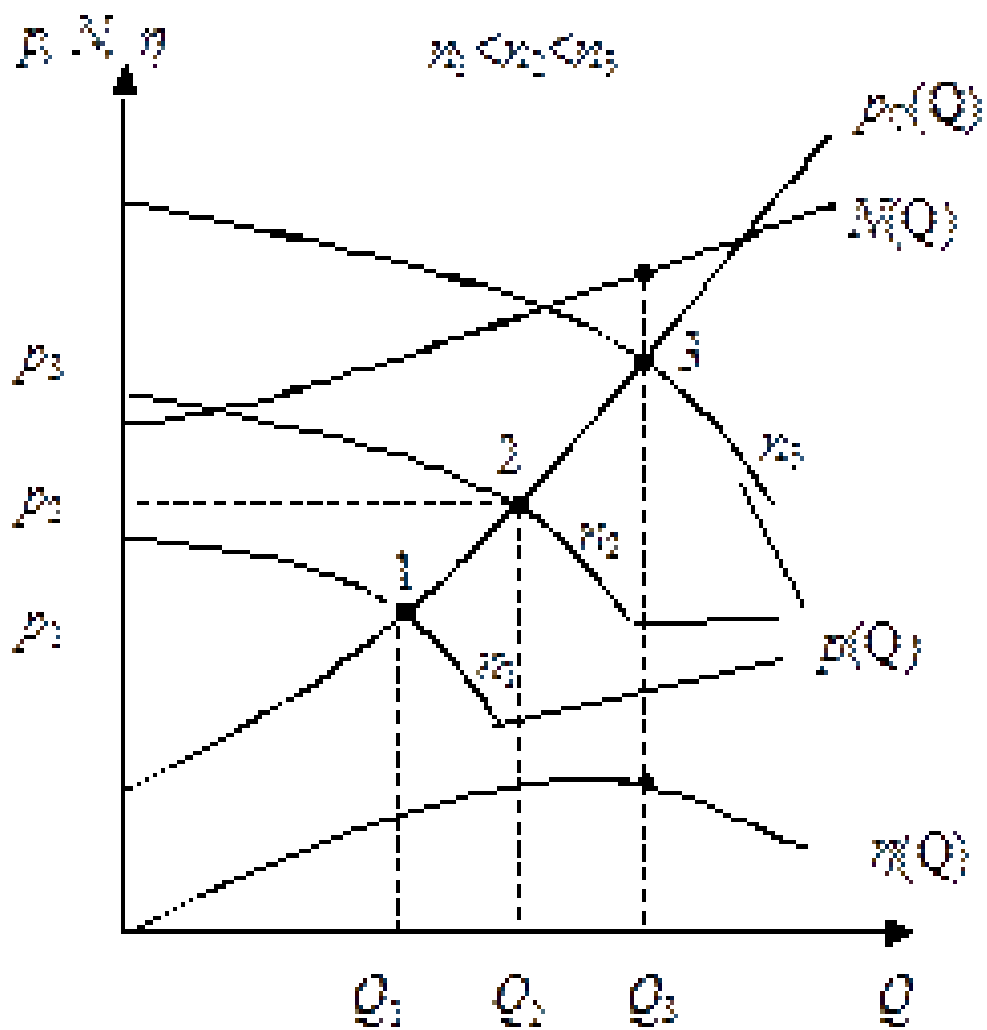
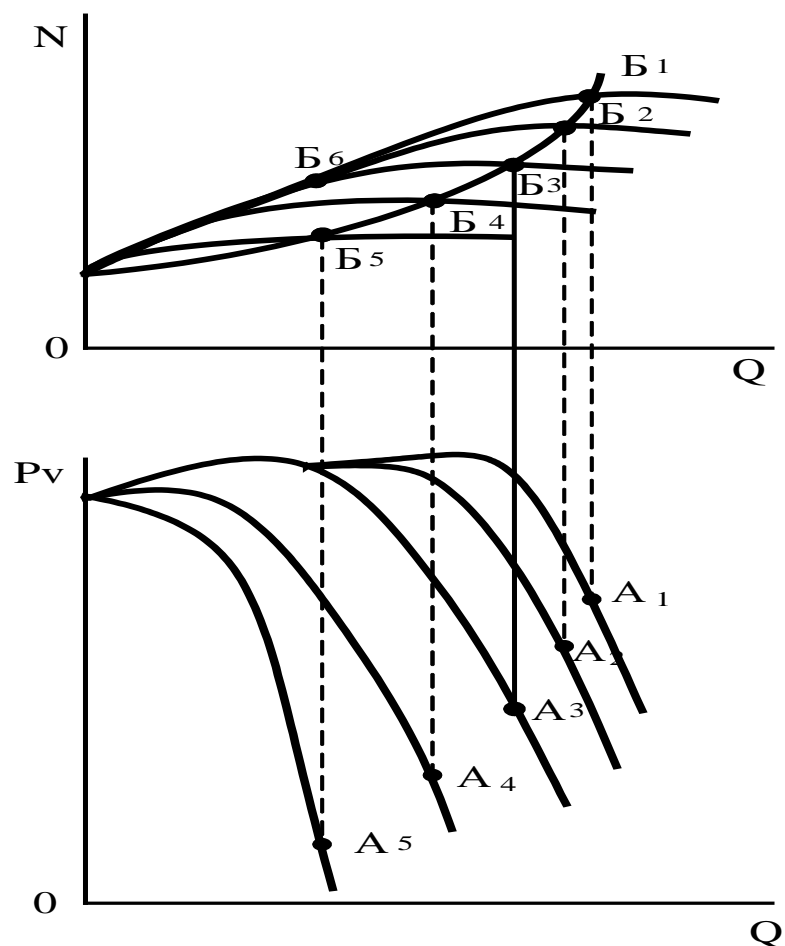


Диаграмма нагрузки дутьевого вентилятора за сутки



Регулирование вентилятора дросселированием

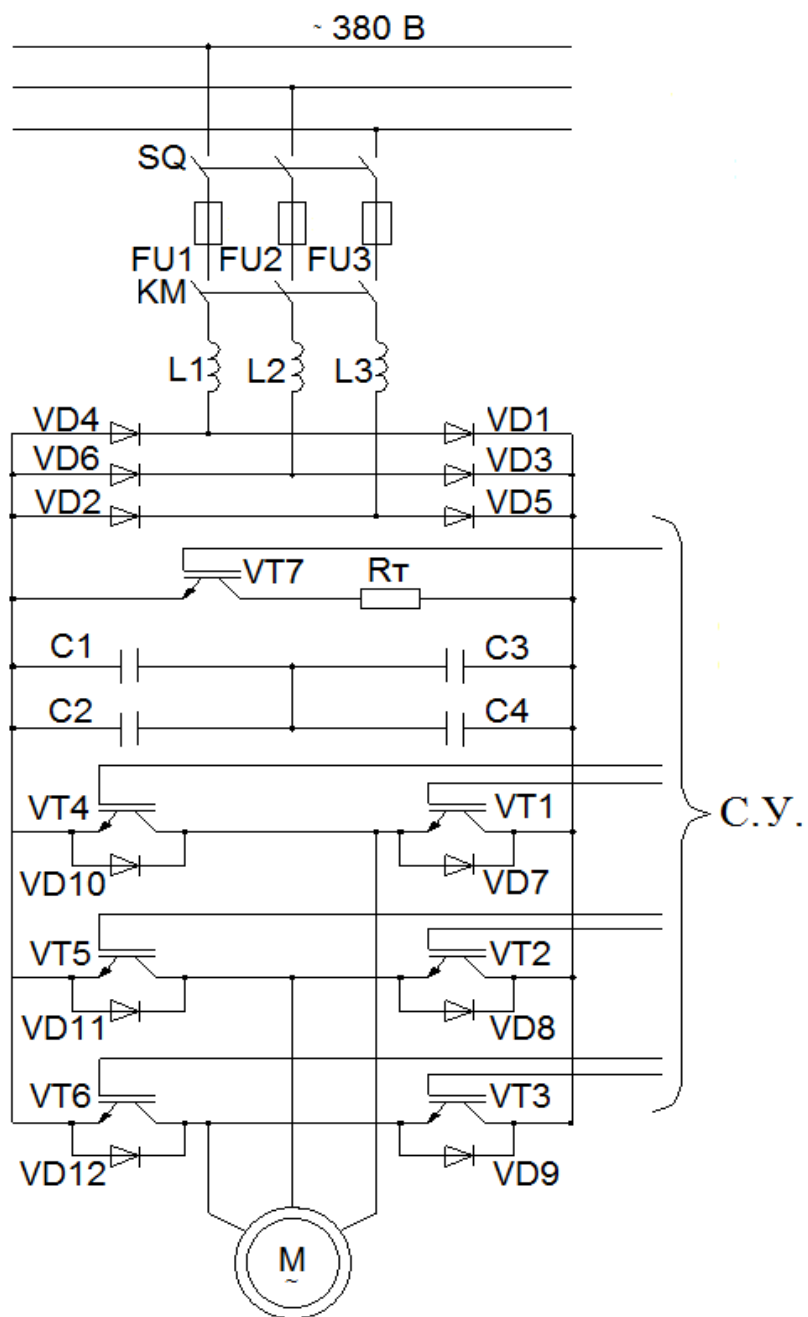


Уменьшение потребляемой мощности при регулировании дроссельной заслонки и САУ

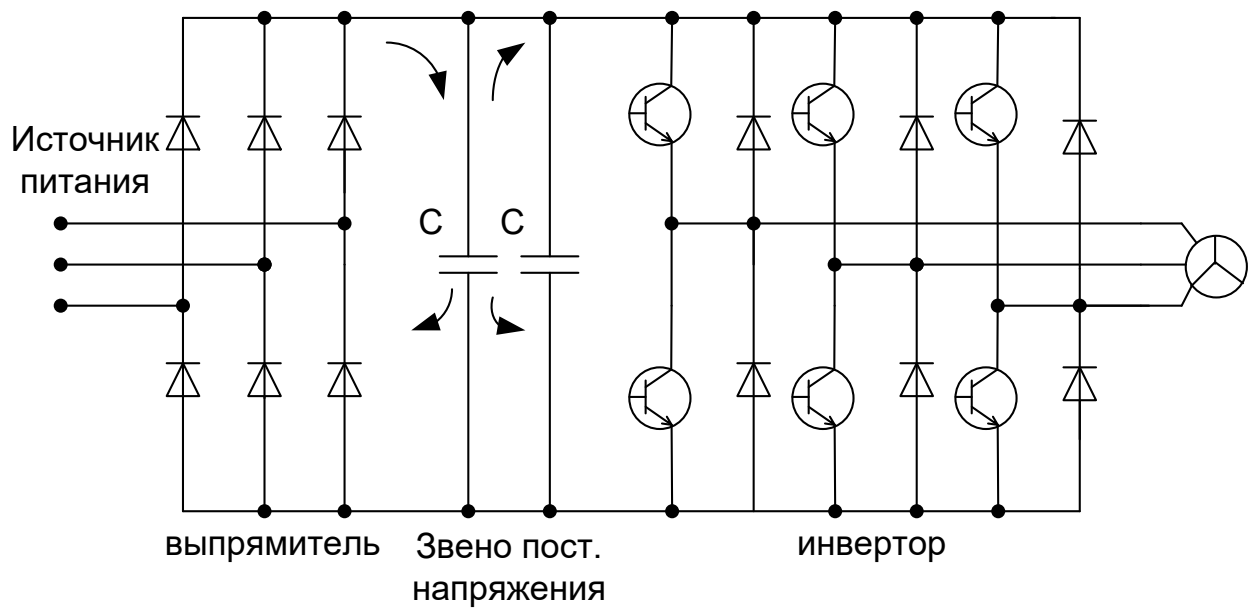


Изменение мощности потребляемой вентилятором

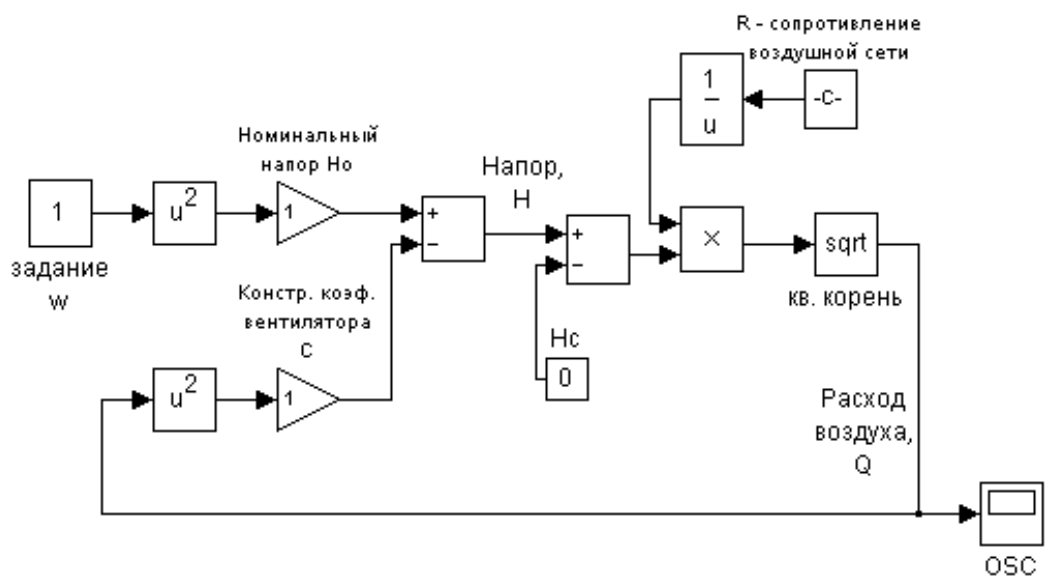




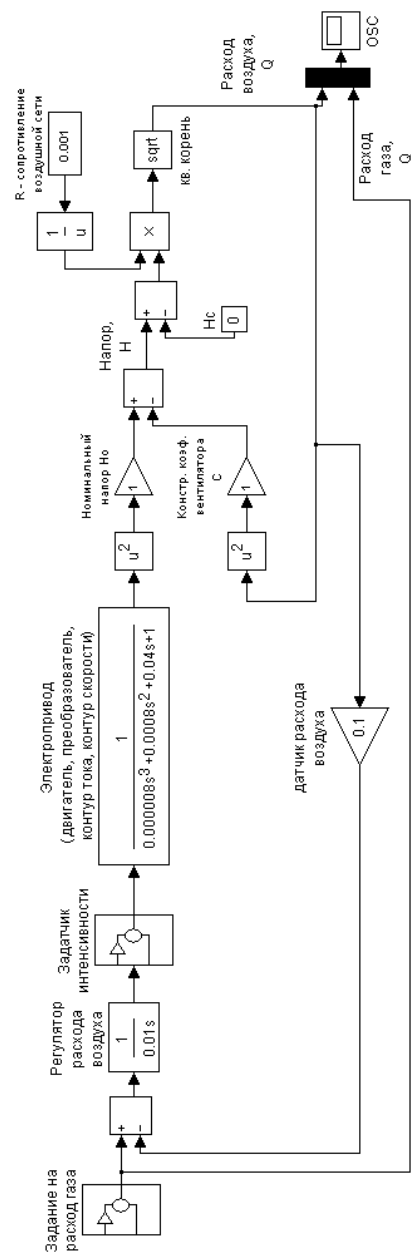
Электрическая схема силовой части преобразователя



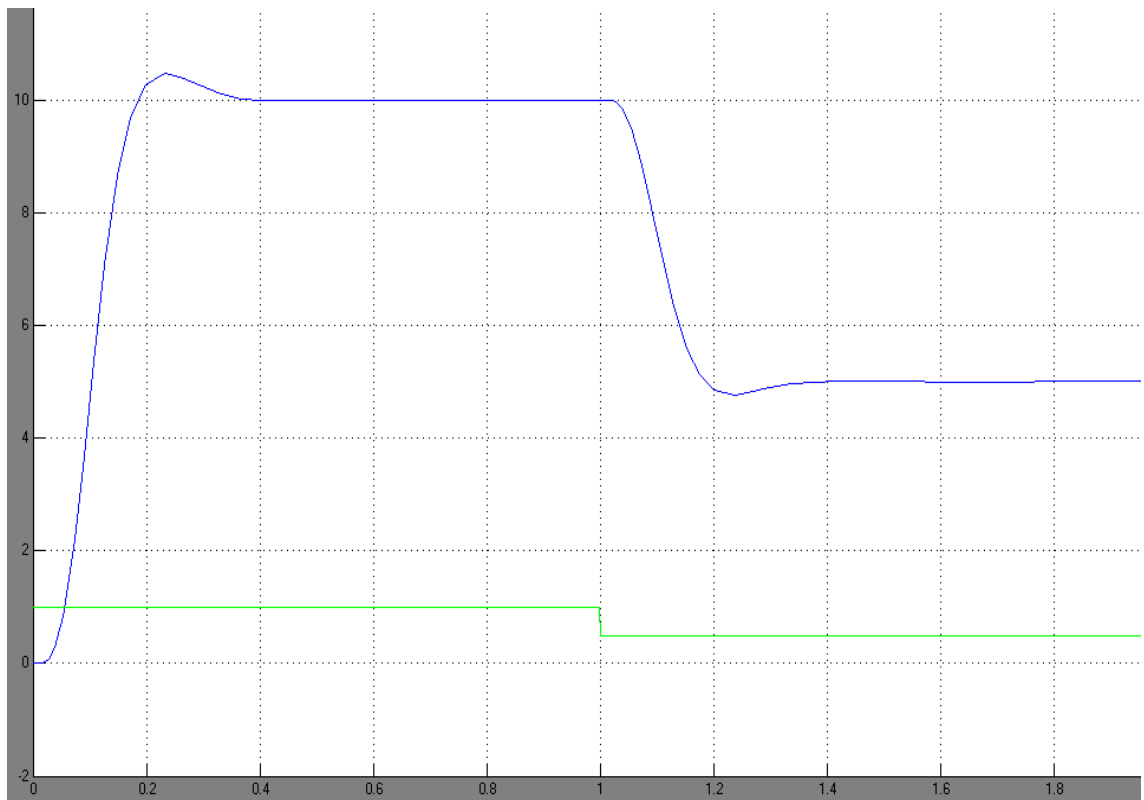
Блок-схема преобразователя частоты



Модель системы вентилятор – магистраль



Математическая модель электропривода САУ дутьевого вентилятора



Осциллограмма работы воздушного потока САУ