

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Общая теория электромеханического преобразования энергии  
(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Импортозамещение и модернизация электропривода Siemens для  
изготовления гофрокартона»

Студент

А.В. Демьяненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Ю.П. Петунин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы к.т.н., профессор В.В. Ермаков  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Тольятти 2018

## Аннотация

Сегодня в России наметились признаки роста промышленного производства. Самарская область является признанным лидером в автомобилестроении, авиастроении, нефтехимии.

Но экономике региона требуется развитие и других производств. Для развития промышленности в области была создана Особая Экономическая Зона (ОЭЗ), расположенная в г. Тольятти.

Тольяттинская бумажная фабрика оснащена бумагоделательным оборудованием импортного производства, сделанным в Европе.

Для обеспечения таким ресурсом как сжатый воздух вполне возможно самостоятельно на основании характеристик машины, без участия подрядной организации самостоятельно разработать схему снабжения основного и вспомогательного оборудования предприятия.

Поэтому для запуска производства бумаги была поставлена задача обеспечения ООО “ТБФ” необходимым количеством сжатого воздуха для качественного функционирования всех технологических процессов в бумагоделательной машине.

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Методы и способы подготовки сжатого воздуха на производстве.....	15
1.1 Способы подготовки сжатого воздуха на производстве .....	15
1.2 Классификация и анализ существующего компрессорного оборудования.....	17
1.3 Методы оптимизации работы компрессорных установок.....	30
1.4 Особенности эксплуатации компрессорной установки бумагоделательного производства.....	31
Глава 2 Разработка системы подачи сжатого воздуха для бумагоделательного производства.....	32
2.1 Разработка пневматической схемы подачи сжатого воздуха.....	32
2.2 Анализ структуры управления.....	36
2.2.1 Анализ работы электродвигателей компрессорной установки.....	36
2.2.2 Контроль работы установки и аварийная сигнализация.....	37
2.3 Разработка электрической схемы управления компрессорной установкой .....	38
Глава 3. Разработка системы управления компрессорной установкой.....	43
3.1 Обзор существующих систем управления компрессорами.....	43
3.2 Выбор аппаратного обеспечения.....	47
3.3 Используемое программное обеспечение.....	52
3.4 Автоматизация алгоритма управления установкой.....	55
3.5 Разработка алгоритма реакции на аварийные ситуации.....	57
3.6 Наладка и испытания компрессорной установки.....	61
Заключение о внедрении компрессорной установки.....	63
Заключение.....	64
Список используемых источников.....	65

## Введение

Сегодня в России наметились признаки роста промышленного производства. Самарская область является признанным лидером в автомобилестроении, авиастроении, нефтехимии. От стабильности работы этих отраслей напрямую зависит состояние экономики как отдельных моногородов, расположенных на территории области, региона, на территории которых базируются такие производства, так и всей страны в целом [1].

Но экономике региона требуется развитие и других производств. Для развития промышленности в области была создана Особая Экономическая Зона (ОЭЗ), расположенная в г. Тольятти.

На территории ОЭЗ была создана вся инфраструктура для развития высокотехнологичных производств, которые могут диверсифицировать экономику области. Одним из таких предприятий, созданных на территории ОЭЗ г. Тольятти является Тольяттинская бумажная фабрика. Фабрика стала восьмым запущенным заводом в ОЭЗ «Тольятти» и третьим работающим предприятием на площадке из неавтомобильной отрасли, при этом надо отметить, что таких предприятий на территории области до этого не было.

Это первое предприятие в области, ориентированное на переработку макулатуры и последующий выпуск бумаги и картона для гофроупаковки. В перспективе компания «ТБФ» планирует занять до 3% российского рынка изготовления бумаги из макулатуры, что позволит сохранять ежегодно порядка 400 тысяч деревьев.

Ежегодно на территории ТБФ будет перерабатываться до 45 тысяч тонн макулатуры, из которой будет производиться до 42 тысяч тонн бумаги для гофрирования и картона. При этом сырье для работы будет закупаться в первую очередь у местных предприятий, включая резидентов ОЭЗ г. Тольятти. При этом на территории фабрики будет создан не только автономный производственный комплекс, с собственными складскими, логистическими и ремонтными службами. При этом за счет запуска ООО «ТБФ» на территории области станет возможно не только создание новых

рабочих мест и повышение экономики города, но и даст возможность улучшить экологическое положение и решить вопросы, которые возникли в последнее время, как на территории края, так и на территории города Тольятти и Ставропольского района. Внешний вид ООО “ТБФ”, находящейся на территории ОЭЗ представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Территория ООО “ТБФ”

Основой любого бумажного производства являются отделение массоподготовки и бумагоделательная машина [2]. Массоподготовительные производства на таких предприятиях оснащаются большими и вместительными хранилищами для хранения подготовленной массы, а современные бумагоделательные машины представляют из себя большие и длинные линии с полностью автоматизированной системой управления.

Бумажное производство полного цикла является очень энерго и ресурсоемким производством что накладывает ограничения по территории их размещения. Массоподготовительное отделение и бумагоделательная

машина это агрегаты, состоящее из достаточно большого числа различных технологических секций и устройств.

Полученная из массоподготовительного отделения бумажная суспензия, размешанная с водой, направляется на бумагоделательную машину, где ее превращают в бумагу или картон.

В массоподготовительном отделении происходит размол макулатуры. Это процесс механической обработки в присутствии воды, он выполняется в специальных размалывающих машинах – мельницах и гидроразбивателях [3]. Внешний вид части массоподготовительного отделения представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид верхней части массоподготовительного отделения

Размол волокнистых полуфабрикатов является очень важным процессом бумажного производства. Он позволяет достаточно сильно менять многие свойства бумаги. Размол волокон производится в машинах непрерывного действия (конические, цилиндрические и дисковые мельницы). Эти размалывающие аппараты объединяет принцип работы, который основан на методе трущихся поверхностей и скрещающихся ножей.

На размалывающем этапе, волокна проходят между ножами машины и таким образом подвергаются воздействию механических и гидродинамических сил. Такой способ производства ведет к протеканию сложных физико-химических и коллоидных процессов в структуре волокнистой массы. Если разделить данный этап производства на составляющие, то процесс производства выглядит следующим образом:

1. рубка волокон;
2. поверхностное расщепление;
3. расчесывание в продольном направлении фибриллярной структуры клеточной стенки на фибриллы (поверхностное фибриллирование);
4. набухание;
5. гидратация волокон.

В итоге, все волокна бумажной массы становятся более мягкими и объемными.

Для размолва полуфабрикатов бумажного волокна на предприятиях, которые вырабатывают массовые виды бумаги и имеют достаточно большую производительность, основным видом оборудования являются дисковые мельницы [4].

Дисковые мельницы в общем случае состоят из статора и ротора, которые выполнены конусовидной формы. В зазоре между статором и ротором находятся ножевые рубашки. Производительность таких мельниц обычно от 2 тонн в сутки, а частота вращения ротора составляет 1000 мин<sup>-1</sup>.

Волокна после обработки имеют повышенную эластичность и повышенную пластичность. После такой обработки увеличивается удельная площадь поверхности волокон. Что в свою очередь приводит к высвобождению гидроксильных групп и увеличивает способность бумажной массы удерживать влагу. В зависимости от режимов обработки в итоге получается бумажная масса различного качества и величины фракций, начиная от низкой степени, называемой садкая масса, и до высокой степени, т.е. жирная масса. Характер помола выбирают в зависимости от вида сырья и

в зависимости от качества выходного продукта. Далее подготовленная масса подается на бумагоделательную машину.

Бумагоделательные машины представляют из себя длинные и большие технологические линии, чаще всего расположенные на двух уровнях: верхний и нижний [5].

Существует два основных типа бумагоделательных машин:

- 1) Плоскосеточные или столовые
- 2) Круглосеточные или цилиндрические.

Первые применяют для производства основных типов бумаги, а на вторых изготавливают картон и специализированный ассортимент бумажной продукции. Технологический процесс изготовления в таких машинах в принципе одинаков, различие заключается в устройстве сеток и принципе отлива бумажного полотна на машину. Внешний вид бумагоделательной машины, смонтированной на ООО «ТБФ» представлен на рисунке 3.

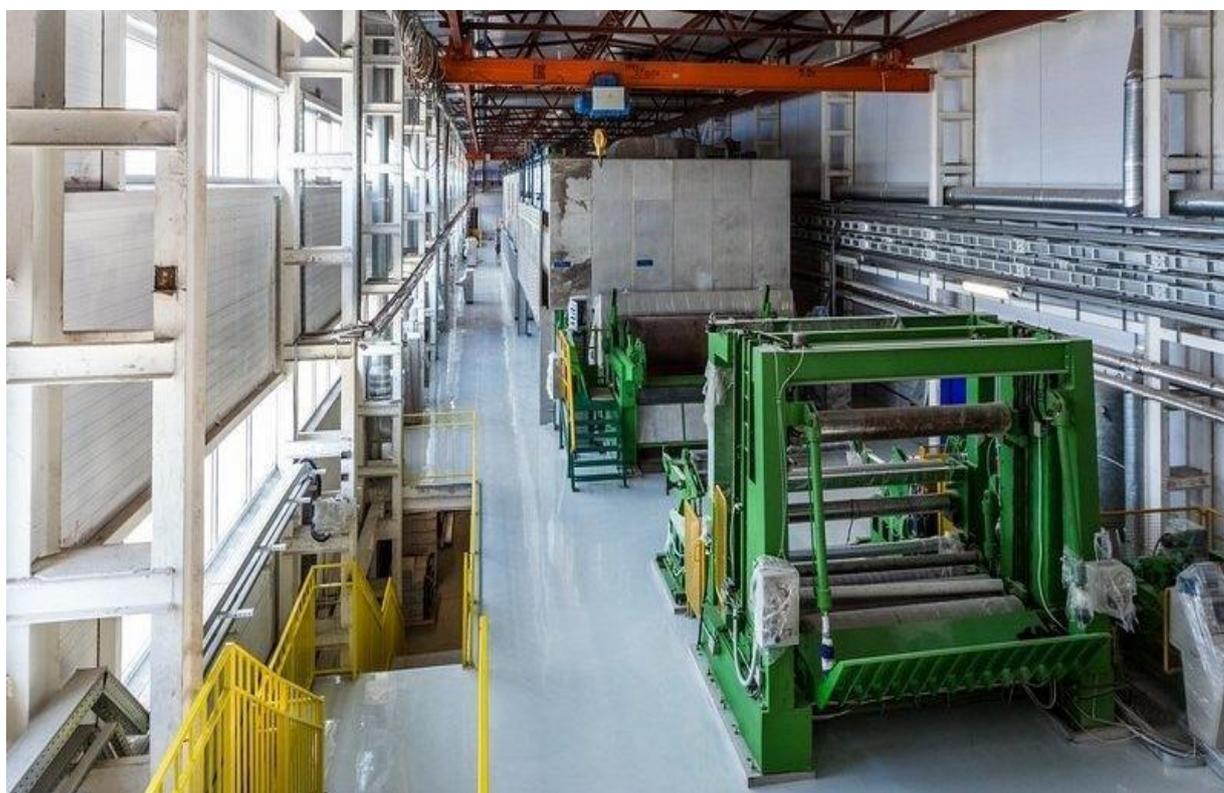


Рисунок 3 – Бумагоделательная машина.

Подготовленная бумажная масса с концентрацией 3-5%, при помощи вакуумных насосов, подается на машину из цеха массоподготовки, где она хранится в больших специальных бассейнах и танках [6].

В этих танках масса постоянно перемешивается до однородной густоты и концентрации и постоянно разбавляется водой, которая циркулирует по всей системе. Потом при обезвоживании бумажной массы, эта вода извлекается и вновь поступает в бассейн, для дальнейшего использования ее в технологическом процессе, что позволяет экономно расходовать этот ресурс.

Далее разбавленная до концентрации 0,1 – 1%, бумажная масса пропускается через очистители (центриклинеры, узлоловители и т.п.), где из массы убирают посторонние материалы и различные грубые фрагменты минеральных волокон.

Затем очищенная бумажная масса поступает в специальный, так называемый “мокрый” ящик, из которого она начинает течь на сетку со строго определенной скоростью и определенной толщиной струи, от которых напрямую зависит качество конечного продукта [7].

Растекание очищенной и подготовленной массы происходит по ширине всей сетки. На сетке происходит формирование бумажного полотна из пришедшей на сетку разбавленной суспензии. При этом выделяется избыточная вода, поступающая обратно в бассейн, расположенный в секции массоподготовки.

Полученная таким образом мокрое бумажное полотно поступает далее в прессовую часть машины. В этой части машины она еще раз обезвоживается и приобретает заданную плотность. Далее бумажное полотно попадает в сушильную часть. В сушильную часть бумагоделательной машины полуфабрикат полотна поступает с содержанием влаги около 45% [8]. Эта секция бумагоделательной машины представляет собой вращающиеся цилиндры, расположенные в шахматном порядке. Каждый цилиндр обогревается паром. Полуфабрикат бумажного полотна с помощью

сукон придавливаются к разогретым цилиндрам, что позволяет избежать его сморщивания и коробления.

Полотно движется с нижнего цилиндра на верхний, а затем «змейкой» на нижний, и т. д. В сушильной части полуфабрикат высушивается до влажности 6–8%.

Далее полуфабрикаты листов бумаги переходят на последний этап, который называется отделочным. Отделочная секция представляет собой от 5 до 10 валов, которые расположены друг над другом.

Бумага увлажняется холодной водой и движется между валами сверху вниз. После этого этапа бумажные листы становятся ровными и одинаковой толщины, а также приобретают гладкую поверхность. В конце данной операции полотно наматывается в рулоны, таким образом можно избежать таких дефектов как смятие и коробление[9]. Если к бумаге предъявляются требования повышенной гладкости, то перед данным этапом требуется дополнительное увлажнение.

По завершении всех этапов подготовки, готовая бумага поступает на продольно-разрезное оборудование и разрезаются на части. На этом этапе формируются необходимые геометрические параметры готового продукта. После, бумага скатывается в рулоны на специальном станке, проверяется лабораторией на соответствие заданным механическим и физическим свойствам. На завершающем этапе бумага упаковывается и отправляется заказчику, в крупные торговые сети и т.д.

Тольяттинская бумажная фабрика оснащена бумагоделательным оборудованием импортного производства, сделанным в Европе.

В Советском Союзе и в России также производили бумагоделательные машины на мощностях ОАО «Буммаш» в г. Ижевске и ЗАО «Петрозаводскмаш» в г. Петрозаводске [10], [11]. В свою очередь ОАО «Буммаш» было создано на базе производственных мощностей завода «Ижтяжбуммаш». Завод «Ижтяжбуммаш» был основан в 60х годах 20 века как одно крупнейших предприятий по производству оборудования для

целлюлозно-бумажной промышленности и бумагоделательных машин. Ижевский и Петрозаводский заводы были призваны преодолеть отставание СССР в обеспечении целлюлозно-бумажной промышленности высокопроизводительным оборудованием. Также к производителям, работающим с времен СССР относят ОАО «Гатчинский опытный завод бумагоделательного оборудования», которое было основано еще в конце 19 века.

Среди известных иностранных производителей [12] стоит выделить такие как: Mitsubishi Heavy Industries Printing & Packaging Machinery, Voith Paper, Valmet, который после второй мировой войны перепрофилировал свои предприятия Valtion tykkitehdas и Tampella AB под производство оборудования целлюлозно-бумажной промышленности, Körber AG (Германия), EMA Elektronik Maschinen Apparatebau GmbH (Германия), RS Papiertechnik GmbH, GAW technologies GmbH (Австрия), Druck & Technik, (Германия), Рама Papirmashinen GmbH(Германия), Lamort (Финляндия). В последнее время в качестве производителей такого оборудования стали заявлять о себя промышленники из Китая такие как [Anyang Machinery Co., Ltd](#)

Бумагоделательная машина, смонтированная на ООО «ТБФ», оснащена большим количеством автоматических приборов, что обеспечивает ее непрерывную и безаварийную работу. Следя за показаниями датчиков и посылая сигналы управления на различные исполнительные устройства, система управления точно регулирует технологические параметры. Для изготовления различных видов бумажного полотна необходимо поддерживать свои технически обоснованные параметры, а именно рабочую скорость, концентрацию, влажность удельное давление, концентрация, продолжительность процесса и температура массы и т.д. [13]. Все эти параметры регулируются с помощью исполнительных устройств и органов, для функционирования которых требуются различные ресурсы и виды энергии.

Основными видами ресурсов, потребляемыми в технологическом процессе бумажного производства, являются:

1. вода;
2. электроэнергия;
3. перегретый пар;
4. сжатый воздух.

Территории ОЭЗ обеспечена практически всеми ресурсами необходимыми для функционирования бумагоделательной фабрики. ОЭЗ централизованно обеспечивает электроэнергией и технологической водой все предприятия, находящиеся на ее площадке.

Но всеми остальными энергоресурсами, предприятия вынуждены обеспечивать себя самостоятельно, а к таким ресурсам, необходимым для технологического процесса производства бумаги относятся сжатый воздух и перегретый пар.

Для обеспечения таким ресурсом как сжатый воздух вполне возможно самостоятельно на основании характеристик машины, без участия подрядной организации самостоятельно разработать схему снабжения основного и вспомогательного оборудования предприятия.

Поэтому для запуска производства бумаги была поставлена задача обеспечения ООО “ТБФ” необходимым количеством сжатого воздуха для качественного функционирования всех технологических процессов в бумагоделательной машине.

Актуальность работы заключается в автоматизации системы подачи и контроля расхода сжатого воздуха для собственных нужд бумагоделательной машины и массоподготовительного отделения.

Целью работы является разработка и внедрение автоматизированной системы управления компрессорной подстанции для нужд действующего бумагоделательного производства.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) Обосновать выбор компрессорного оборудования для обеспечения нужд бумагоделательной машины и массоподготовительного производства и разработать пневмосхему компрессорной системы
- 2) Разработать электрическую схему компрессорной станции
- 3) Создать автоматизированную систему управления компрессорной подстанцией на базе серийно выпускаемых микроконтроллерных устройств.
- 4) Провести практические испытания станции
- 5) Внедрить алгоритм обнаружения аварийных ситуаций в условиях производственного процесса.

Практическая новизна работы заключается в разработке системы разгрузки контуров компрессора и разработке системы управления компрессорной установкой с поочередной и ротационной работой агрегатов.

Практическая значимость работы заключается в разработке и автоматизация компрессорной станции для собственных нужд действующего производства

Основные положения, выносимые на защиту.

Схема компрессорной подстанции, электросхема компрессорной станции, с управлением от специализированного контроллера и схемой поочередной и ротационной работы

Апробация работы

По теме диссертации опубликованы 2 научные статьи [].

1. Петунин Ю.П., Демьяненко А.В., Энергоэффективность электроприводов компрессорных установок Сборник статей Международной научно – практической конференции “Современные проблемы и тенденции развития экономики и управления”: Казань, 15 января 2018 г. - Уфа: Аэтерна, 2018. – 262 с.
2. Ромасюков В.В., Демьяненко А.В., Стенд диагностики электротехнического оборудования для промышленного предприятия. Сборник статей Международной научно –

практической конференции “Современные условия взаимодействия науки и техники”: Челябинск, 29 марта 2018 г: - Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2018. - 227с.

Выпускная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем работы 82 страницы машинописного текста, рисунков, графиков и таблиц.

## Глава 1 Методы и способы подготовки сжатого воздуха на производстве

### 1.1 Способы подготовки сжатого воздуха на производстве

Современные производства постоянно усложняются, что приводит к увеличению их темпов роста и постоянному совершенствованию технологического оборудования.

Многие важные узлы и агрегаты в технологическом процессе производства бумаги имеют пневматический привод, за работу которого отвечает компрессорное оборудование [14].

На сегодняшний день существует большое множество моделей компрессоров, вариантов их исполнения и применения. Компрессоры различаются по давлению, по количеству ступеней сжатия, по производительности, по рабочей среде (сжимаемому веществу) в том числе и по условиям окружающей среды, по способу крепления компрессоров и их ресиверов. Каждый компрессор имеет свои конструктивные особенности, технические и рабочие характеристики [15].

Например, небольшие компрессорные станции для домашних нужд принято делать мобильными, как на рисунке 1.1. Большие компрессорные станции обычно устанавливаются стационарно. Примеры таких компрессорных систем представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.1 – Мобильные компрессорные установки.

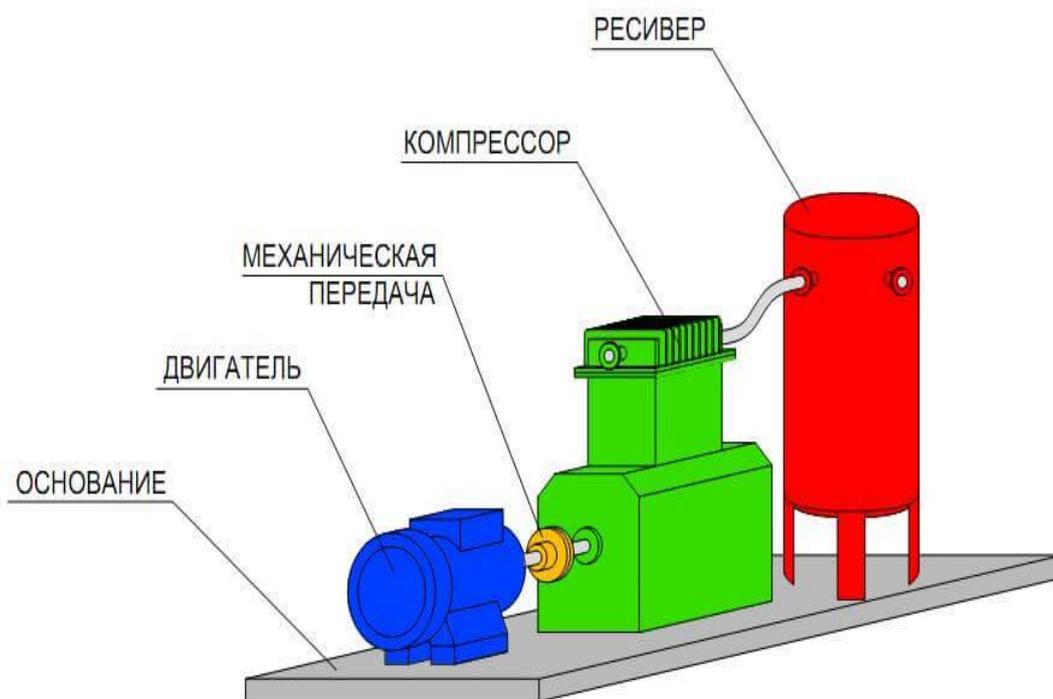


Рисунок 1.2 – Стационарные установки.

Компрессор – это промышленный агрегат, который используют для сжатия и подачи различных газов и воздуха под давлением. Они широко используются в различных технологических процессах практически во всех отраслях производства [16]. Сфера применений – это машиностроение, автомобилестроение, различные добывающие отрасли, химическая, газовая, металлургическая, нефтехимическая и др.

Простейший принцип нагнетания воздуха начал использоваться человеком еще много веков назад, например, в кузнечных мехах [17]. Несмотря на то, что к настоящему времени существует большое количество типов компрессоров, сам принцип сжатия воздуха в них не изменился. Разнообразие компрессорного оборудования достигается за счет различного конструктивного исполнения. Развитие техники и появление новых технологий стало требовать вначале специальных условий сжатия воздуха и определенных его характеристик на выходе, а затем возникла необходимость и работы с другими газами, в том числе взрывоопасными и токсичными.

## 1.2 Классификация и анализ существующего компрессорного оборудования

Компрессоры и компрессорные установки можно классифицировать [18] по следующим признакам:

1. принципу действия;
2. области применения;
3. давлению на выходе;
4. типу приводного механизма;
5. типу охлаждения;
6. производительности.

Наиболее общая классификация компрессоров проводится по используемому в них принципу нагнетания газа, в связи с чем, выделяют два следующих типа: объемные компрессоры и динамические компрессоры.

Объемные компрессоры работают за счет последовательного наполнения рабочей камеры газом и дальнейшего его сжатия за счет принудительного уменьшения доступного объема рабочей камеры. Для предотвращения обратного хода газа используется система клапанов, поочередно открывающихся и закрывающихся в фазах заполнения и опорожнения камеры [19].

В свою очередь динамические компрессоры увеличивают давление газа путем передачи ему кинетической энергии, которая затем частично переходит в потенциальную энергию давления. Реализация одного и того же принципа сжатия в компрессорах может быть осуществлена различными способами, отличающимися друг от друга характеристиками получаемого сжатого газа, условиями сжатия и т.д. Это позволяет максимально адаптировать устройство под конкретную задачу.

Объемные же компрессоры в свою очередь подразделяют на следующие основные группы [20]:

1. поршневые;
2. винтовые;
3. шестеренчатые;

4. роторно-пластинчатые;
5. мембранные;
6. жидкостно-кольцевые.

Поршневые компрессоры появились одними из первых и как нельзя лучше отражают принцип действия всех объемных компрессоров. Кривошипно-шатунный механизм, приводимый в движение валом, обеспечивает возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре. Тем самым рабочая камера, ограниченная поршнем и цилиндром, последовательно изменяет свой объем в зависимости от положения поршня [21]. Система односторонних клапанов предотвращает протечку газа в обратном направлении [22].

Конструктивные особенности так же позволяют разделить эти устройства на множество других подгрупп. По конструкции рабочей камеры компрессоры могут быть одинарного и двойного действия. Во втором случае поршень имеет меньшую толщину и делит рабочую камеру на две части. При его движении в одной части камеры происходит сжатие газа и его подача в выходной патрубок, а вторая часть при этом заполняется газом из входного патрубка. Тем самым за один оборот вала происходит два цикла сжатия. По количеству цилиндров поршневой компрессор может быть одноцилиндровым, двухцилиндровым и т.д. [23].

Если газ последовательно претерпевает сжатие в нескольких цилиндрах компрессора, то такой компрессор называют многоступенчатым, а количество ступеней определяет количество пройденных цилиндров. В зависимости от положения цилиндров поршневые компрессоры делят на устройства: с горизонтальным расположением, вертикальным, угловым, V-образным и оппозитные.

Кроме того поршневые компрессоры классифицируют по назначению на 4 группы:

1. Компрессоры бытового назначения
2. Полупрофессиональные

### 3. Промышленные

#### 4. Компрессоры без смазки цилиндров.

Компрессоры бытового назначения отличаются малыми габаритами, возможностью передвижения, потребностью в небольшом количестве сжимаемого вещества, непродолжительным использованием, невысоким уровнем шума и практически отсутствием необходимости в техническом обслуживании [24]. Бытовые компрессоры обычно создают давление до 8 бар. Продолжительный и интенсивный режим работы такого класса компрессоров может привести к значительной поломке, затраты на ремонт которой будут соизмеримой с покупкой нового агрегата. Данный класс компрессоров обычно используют в ремонтных мастерских, на станциях технического обслуживания автомобильного транспорта, в строительстве.

Следующий тип компрессоров – это полупрофессиональные компрессоры, они создают давление до 16 бар и могут перекачивать до 2 куб. м/мин. К недостаткам можно отнести шумную работу, требуют периодического ремонта. У данного типа компрессора масло в сжатом воздухе содержится много, поэтому они не отличаются экономичностью. Потребители таких компрессоров это в основном частные лица и представители малого бизнеса [25].

Промышленные компрессоры, как следует из их названия, нашли свое применение на разных участках технологического цикла в технических отраслях. Предприятия легкой и тяжелой промышленности, автомастерские, крупных производители. Медицинские компрессоры, оснащаются осушителем адсорбционного типа, шумозащитным корпусом. Ресивер с обработкой против коррозии. Компрессоры высокого давления. Максимальное рабочее давление на выходе до 60 бар обеспечивается при помощи мощного электродвигателя.

Компрессоры без смазки цилиндров сжимают разные газы и необходимы в производстве [26], их используют там, где на выход должна идти чистая сжимаемая среда, не содержащая масло. В качестве уплотнения

используют поршневые уплотнительные кольца из композиционного материала. При этом компрессоры без смазки цилиндров работают без ремонта достаточно продолжительное время [27]. Принцип действия поршневых компрессорных установок представлен на рисунке 1.3.

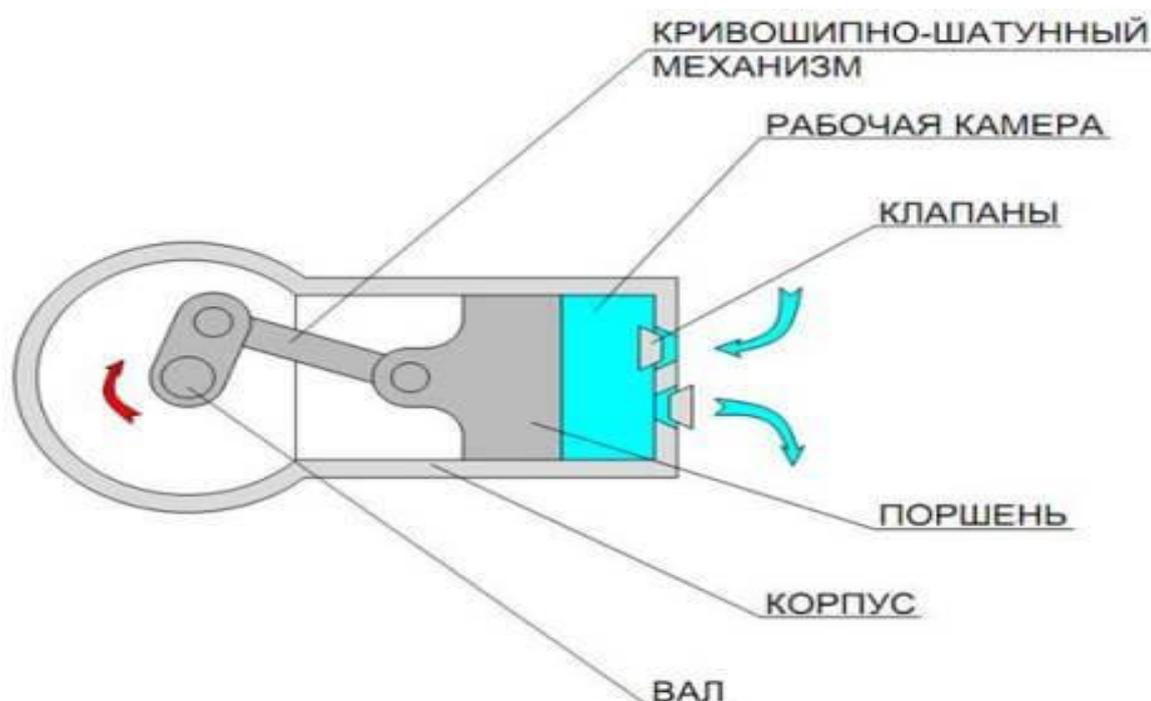


Рисунок 1.3 – Чертеж поршневого компрессора.

Винтовые компрессоры представляют собой заключенные в корпус один, два или более винта, находящиеся в зацеплении. То есть винтовые компрессоры могут быть: одновинтовыми, двухвинтовыми и т.д. При движении винтов образуются подвижные рабочие объемы пространства, ограниченные непосредственно винтами и стенками корпуса [28]. Такие компрессоры менее габаритны, чем поршневые и значительно более устойчивы, а также способны обеспечить большую производительность. При работе между винтами могут возникать значительные силы трения, поэтому для снижения износа деталей применяют смазывающие вещества, обычно это смазочное масло. Однако подбор антифрикционных материалов позволяет обойтись и без дополнительной смазки, в связи с чем выделяют масляные и безмасляные винтовые компрессоры. Вторые применяются в тех случаях,

когда контакт сжимаемого газа и смазочного вещества недопустим. Принцип действия винтовых компрессоров представлен на рисунке 1.4.

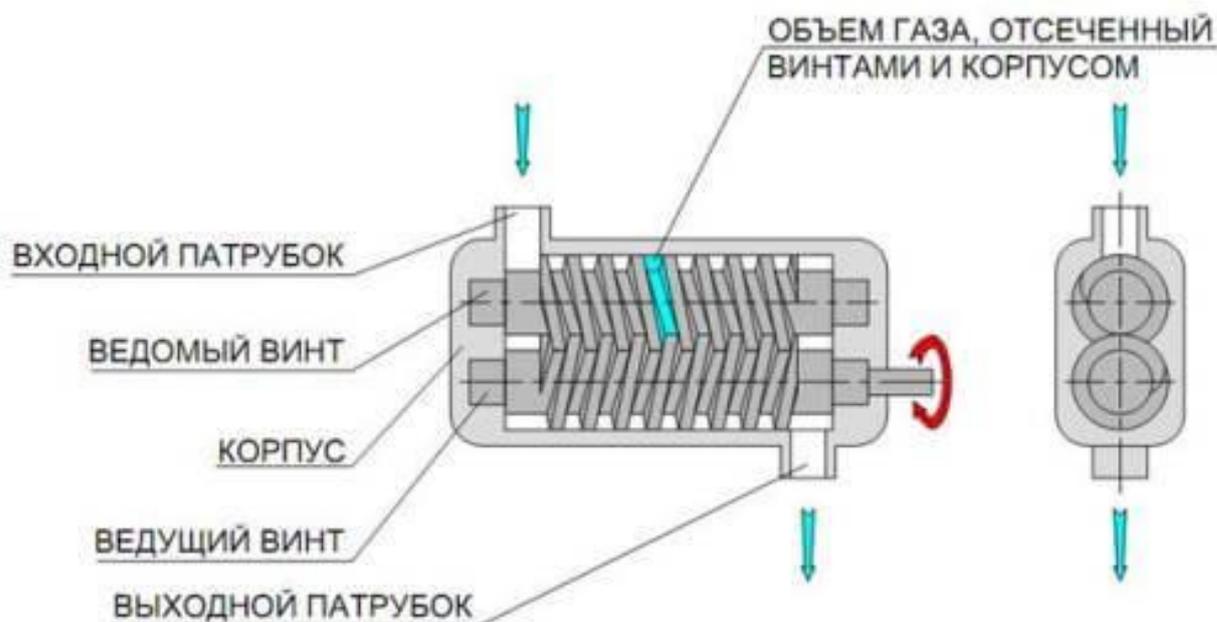


Рисунок 1.4 – Чертеж винтового компрессора.

Шестеренчатые компрессоры в качестве рабочего органа используют пару находящихся в зацеплении шестерней, вращающихся в противоположные стороны. Шестерни могут значительно отличаться от модели к модели, в том числе представлять собой зубчатые колеса. Рабочая камера в таких компрессорах образуется путем отсекаания пространства зубьями шестерни и корпусом устройства [29]. Когда зубья разных шестерней входят в зацепление, объем рабочей камеры уменьшается, и газ под давлением вытесняется в выходной патрубок. Такие компрессоры с успехом применяют в тех случаях, когда требуется подача газа под небольшим давлением. Принцип действия и названия составных частей такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.5.

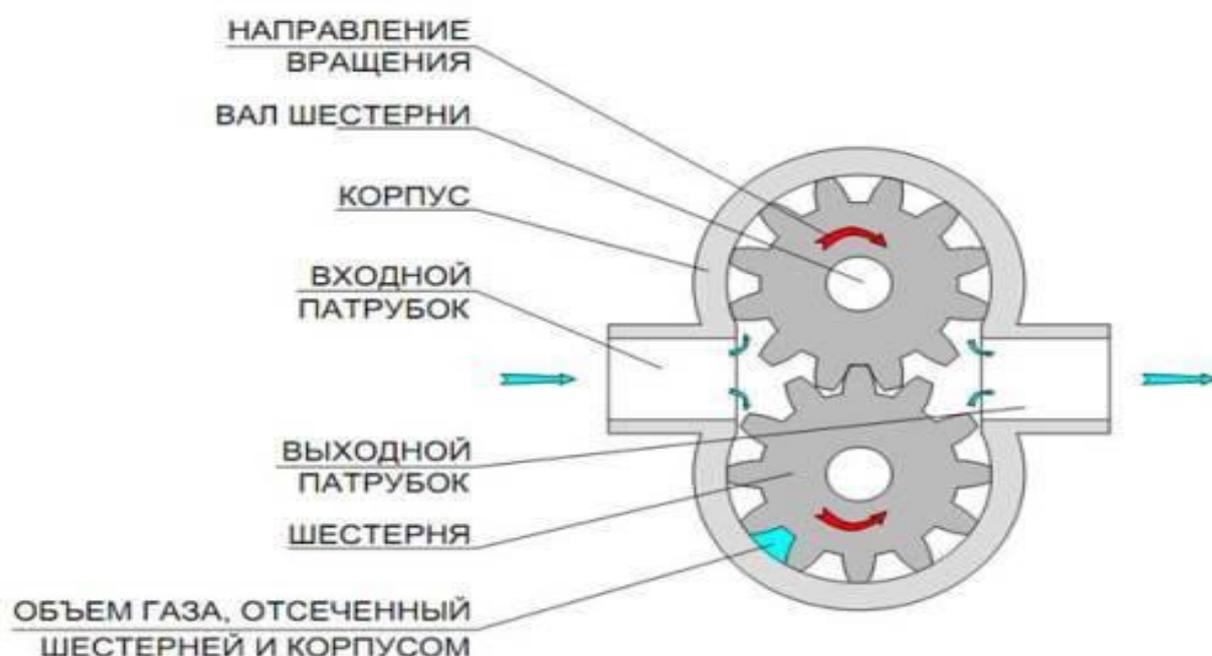


Рисунок 1.5 – Чертеж шестеренчатого компрессора.

Роторно-пластинчатые компрессоры имеют отличительную особенность в виде, как следует из названия, ротора со специальными пазами, в которые вставлены подвижные пластины. Ротор устанавливается в цилиндрическом корпусе (статоре), причем ось ротора не совпадает с осью корпуса. При вращении ротора центробежная сила отбрасывает пластины от центра ротора и прижимает их к корпусу, тем самым в компрессоре образуются подвижные рабочие камеры, ограниченные соседними пластинами, корпусом и ротором [30]. Изменение объема рабочих камер обусловлено смещением осей. Для дополнительного усилия прижатия пластин к корпусу в пазах ротора могут быть установлены прижимные пружины. Как и поршневые компрессоры, роторно-пластинчатые способны развивать значительное давление газа на выходе, однако их выгодно отличают компактные размеры и меньшая шумность. Принцип действия и компоновка такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.6.

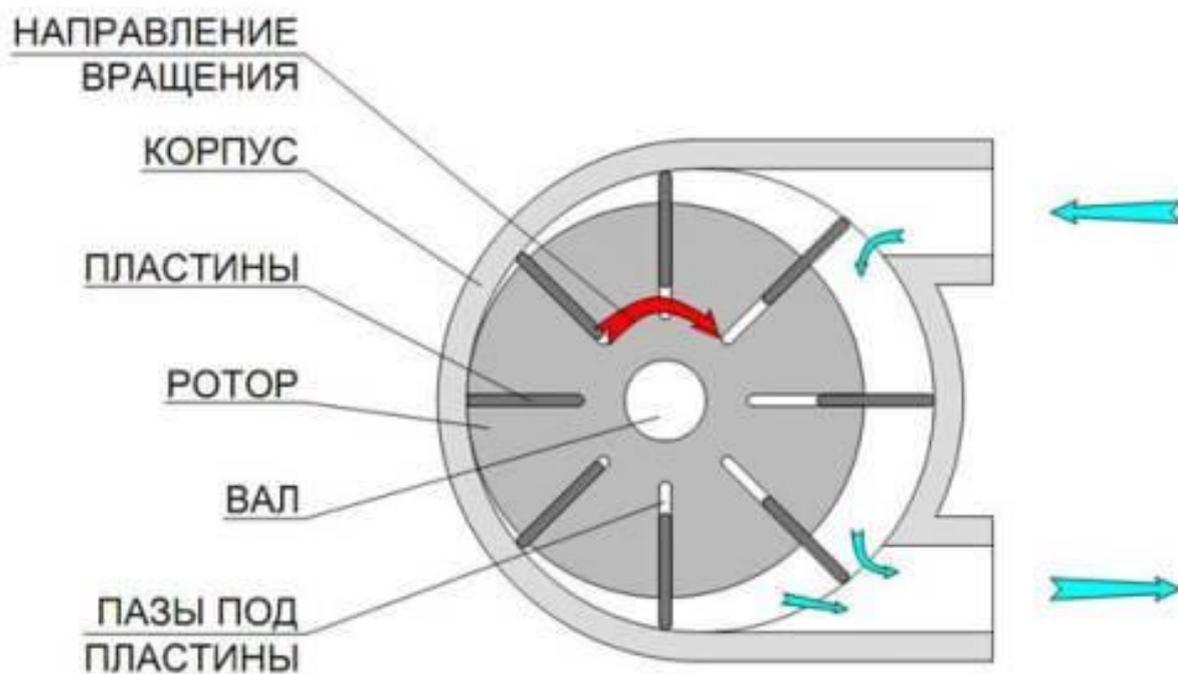


Рисунок 1.6 – Чертеж роторно-пластинчатого компрессора.

Мембранные компрессоры отличаются от всех вышеперечисленных типов тем, что содержат в своей конструкции эластичную полимерную мембрану. Принципиально такие компрессоры схожи с поршневыми, но только роль поршня в них выполняет мембрана. Выпячиваясь в разные стороны, мембрана меняет объем рабочей камеры, а систем клапанов тем же образом. Привод самой мембраны может быть механическим, пневматическим, электрическим или мембранно-поршневым. Все эти типы приводов объединяет тот факт, что перекачиваемый газ не контактирует в процессе работы устройства ни с чем, кроме мембраны и корпуса рабочей камеры. Это делает мембранные компрессоры востребованными в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую степень чистоты нагнетаемого газа [31]. Устройство и принцип действия такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.7.

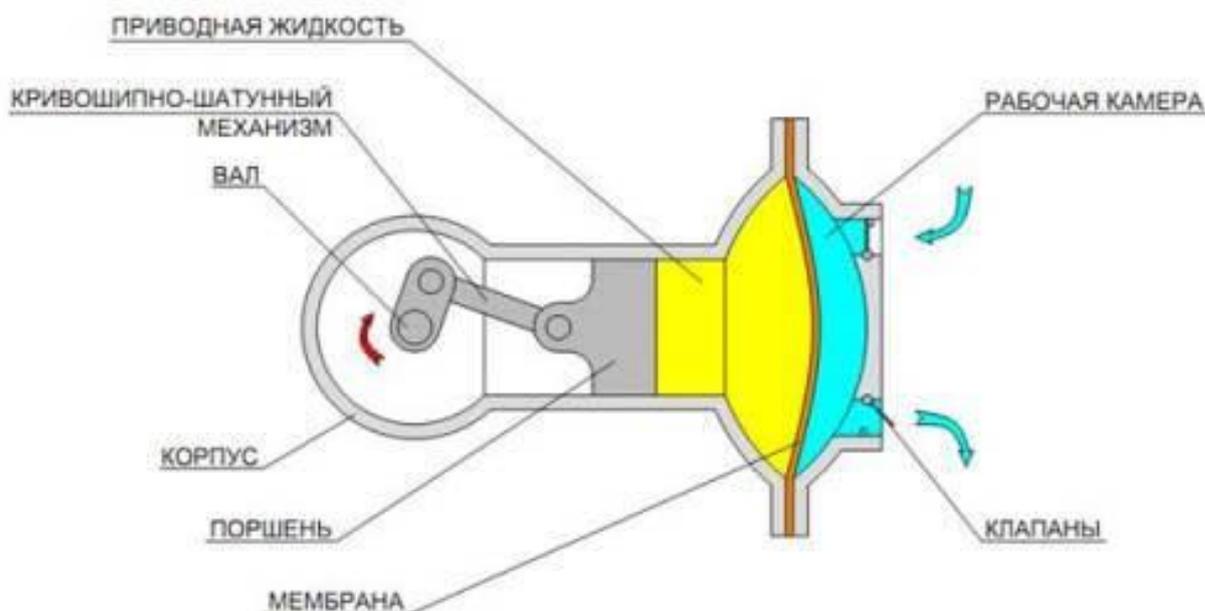


Рисунок 1.7 – Чертеж мембранного компрессора.

Жидкостно-кольцевые компрессоры используют для своей работы вспомогательную жидкость. В цилиндрическом корпусе (статоре) закрепляется ротор с установленными на нем пластинами, причем ось ротора смещена относительно оси статора. Внутри компрессора заливается жидкость, которая при вращении ротора отбрасывается к стенкам корпуса, принимая форму кольца. Рабочее пространство при этом становится ограниченным пластинами ротора, корпусом и поверхностью жидкости. Как и в случае роторно-пластинчатого компрессора, смещение осей ротора и статора обеспечивает изменение объема рабочих камер. Перекачиваемый газ в таких компрессорах неизбежно контактирует с жидкостью, которая частично уносится с потоком газа, поэтому предусматривается узел сепарации отходящего потока, а также система подпитки компрессора рабочей жидкостью [32]. Такие устройства особенно хорошо подходят в тех случаях, когда перекачиваемый газ уже содержит в своем составе капли рабочей жидкости. Принцип действия и названия составных частей такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.8.

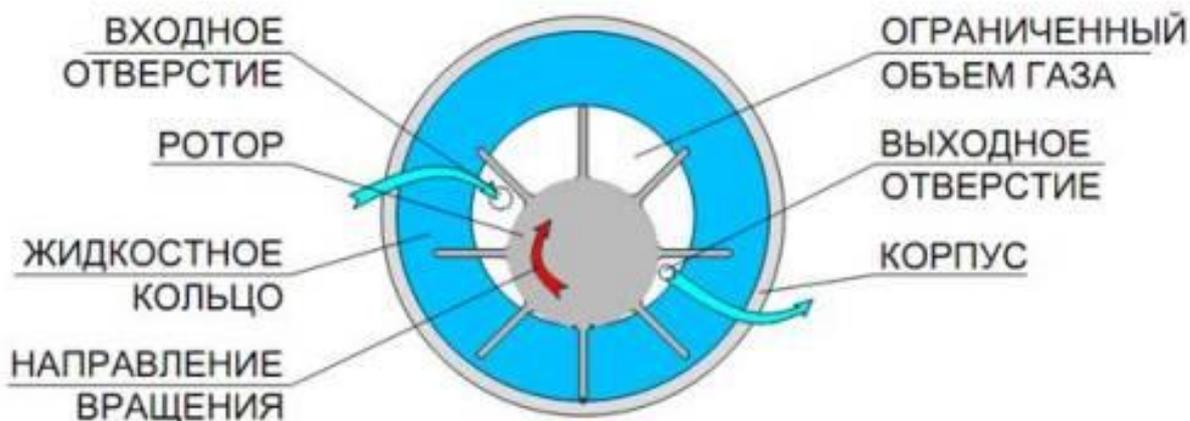


Рисунок 1.8 – Чертеж жидкостно-кольцевого компрессора.

Динамические компрессоры подразделяют на следующие основные группы:

- 1) радиальные (центробежные);
- 2) осевые;
- 3) струйные.

Радиальные компрессоры получили свое название по направлению движения газа в устройстве. Простейший компрессор такого типа состоит из корпуса и размещенного в нем рабочего колеса, установленного на валу. Лопатки рабочего колеса при вращении перемещают газ от оси в радиальных направлениях, тем самым передавая ему кинетическую энергию, которая затем частично преобразуется в потенциальную энергию давления. Газ поступает на колесо через осевой вход, затем попадает на лопатки, отбрасывается в радиальных направлениях и поступает в спиральный газосборник, а затем выводится через выходной диффузор. Рабочие колеса таких компрессоров могут отличаться как по форме лопаток, так и по общей конструкции, к примеру, быть закрытыми или открытыми. Также центробежные компрессоры могут выполняться многоступенчатыми, располагая несколько колес на одном валу и обеспечивая последовательный проход газа через них [33]. Устройства такого типа компактны, обладают малой шумностью и не подвержены сильной вибрации при работе, а также хорошо подходят для случаев, когда требуется обеспечить подачу

незагрязненного газа в больших объемах. Принцип действия и названия составных частей такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.9.

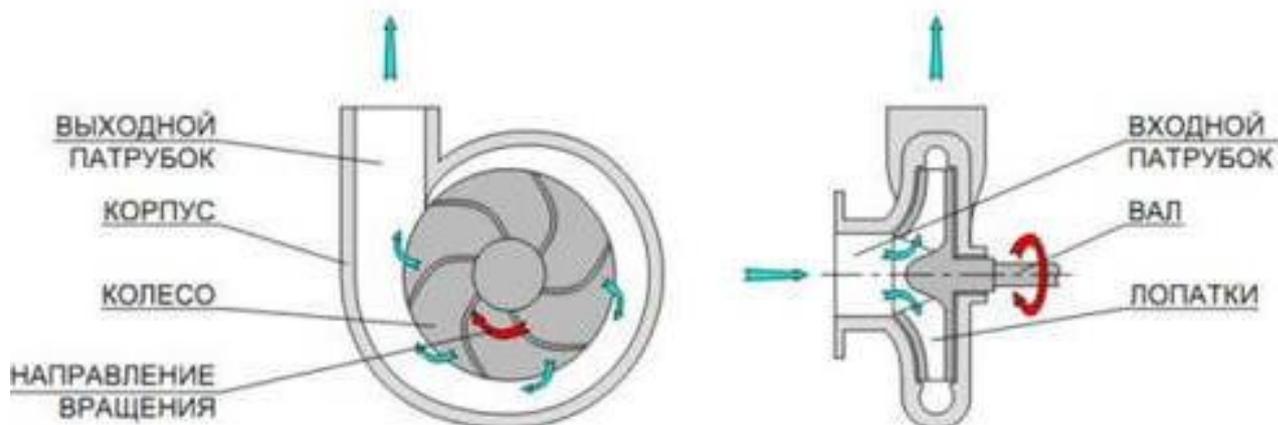


Рисунок 1.9 – Чертеж радиального компрессора.

Осевые компрессоры отличаются тем, что газ в них движется в осевом направлении. К основным конструктивным элементам таких устройств относят ротор, установленный на валу, и статор (корпус). На роторе располагаются ряды лопаток, проходя которые газовый поток получает дополнительную кинетическую энергию и претерпевает закручивание. Для выравнивания направления его движения между рядами лопаток ротора располагают ряды направляющих лопаток статора. Область, где изменяются характеристики потока газа, ограничена входным направляющим и выходным выпрямляющим аппаратами. Такие устройства значительно более сложны в изготовлении и эксплуатации по сравнению с более простыми радиальными компрессорами, однако обладают большим КПД при схожем показателе напора. Названия компонентов такого типа компрессоров и принцип его работы изображен на рисунке 1.10.

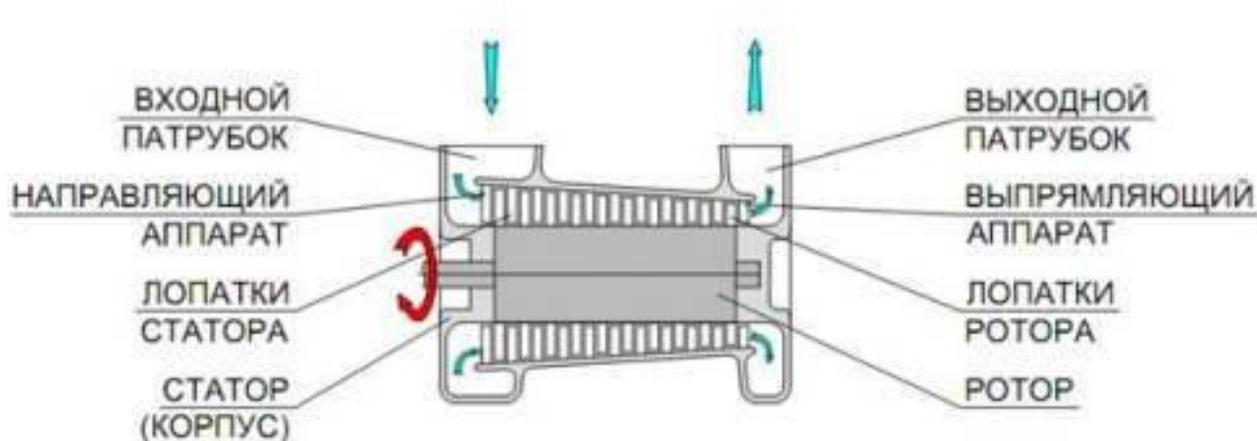


Рисунок 1.10 – Чертеж осевого компрессора.

Струйные компрессорные системы представляют собой эжекторы, в которых используется энергия одного (активного) газа или пара для увеличения давления другого (пассивного) газа или пара. То есть в такое устройство поступают два газовых потока с высоким и низким давлением, а на выходе получается один поток с давлением, большим, чем у потока пассивного газа, но меньшим, чем у активного. Струйные компрессоры отличаются крайней простотой конструкции и, как следствие, высокой надежностью. Они предпочтительны в тех случаях, когда в наличие имеется газ с высоким давлением, энергию которого надо использовать. К примеру, такие устройства применяют в газодобыче, когда на месторождении есть скважины, как с разным давлением и использование струйного компрессора позволяет получить единый поток с приемлемыми характеристиками. Принцип действия и названия составных частей такого типа компрессоров изображен на рисунке 1.11.

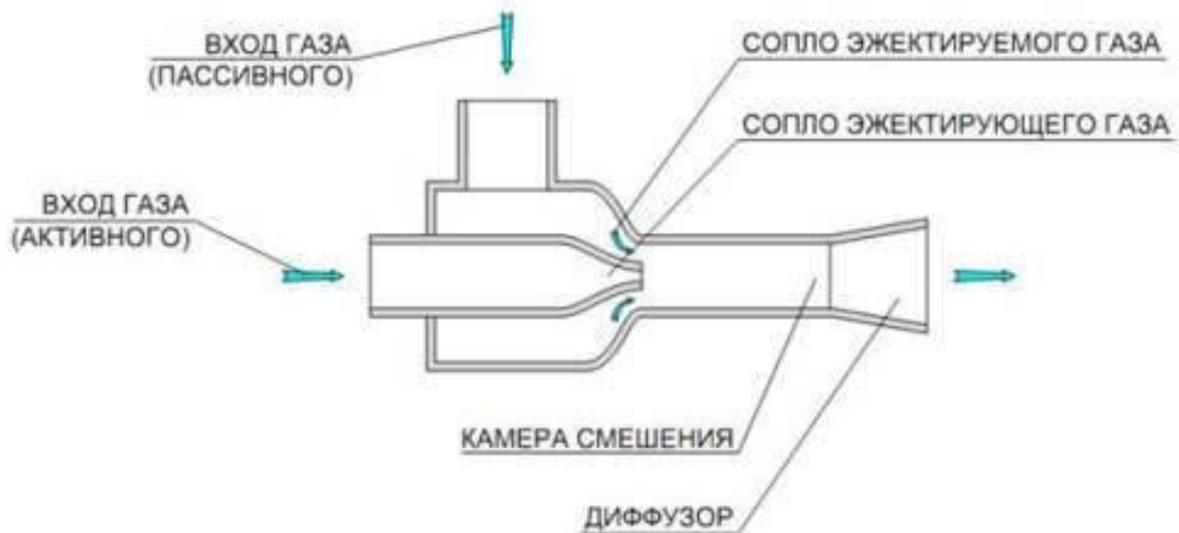


Рисунок 1.11 – Чертеж струйного компрессора.

По области применения компрессоры в зависимости от назначения и отрасли производства можно подразделить на установки общего назначения, энергетические, химические, нефтехимические и т.д. [34].

По давлению на выходе компрессоры подразделяются на следующие типы:

- 1) вакуумные;
- 2) низкого давления (0,15 – 1,2 МПа), основное применение бытовые случаи сжатия воздуха;
- 3) среднего давления (1,2 – 10МПа), в нефтеперерабатывающей, химической, газовой промышленности когда требуется создать условия транспортировки, сжижения и т.д.;
- 4) высокого давления (10 – 100МПа);
- 5) сверхвысокого давления (более 100МПа) применяются в узкоспециализированных отраслях, как например, для установок синтеза газа.

По типу приводного механизма компрессоры могут быть оборудованы электродвигателем, двигателем внутреннего сгорания, это может быть турбина (газ/пар).

По типу охлаждения компрессорные системы делят на устройства с водяным или воздушным охлаждением.

Производительность компрессора как для входа так и выхода принято указывать в единицах объёма сжимаемой среды в единицах времени. Производительность зависит от диаметра цилиндра, длины хода поршня и скорости вращения вала. Компрессоры подразделяют на три категории:

1. малая (до 10 м<sup>3</sup>/мин);
2. средняя (10—100 м<sup>3</sup>/мин);
3. большая (более 100 м<sup>3</sup>/мин).

Тольяттинская бумажная фабрика для своей работы должна потреблять в качестве энергоносителя сжатый воздух, суточный объем потребления данного энергоносителя составляет 480 м<sup>3</sup>, давление на выходе 0,6 МПа, степень очистки на входном фильтре должна позволять получать воздух очищенный от внешних примесей размеров 40 мкм.

После анализа всех описанных выше типов компрессорных установок было принято решение использовать для нужд фабрики поршневой тип компрессоров. Для обеспечения непрерывной подачи сжатого воздуха были выбраны промышленные компрессоры иностранного производителя ф. “Mahle”. Пневматические компоненты системы подачи и регулировки сжатого газа должны обеспечивать высокую надежность подачи и регулировки энергоносителя к исполнительным механизмам. Поэтому в качестве запорной и регулирующей арматуры был выбраны компоненты мирового лидера в этой отрасли ф. “Festo” и ф. “SquareDe”.

Компрессорная система должна быть смонтирована в отдельном помещении и будет стационарной. А каждый компрессор будет установлен на металлическом основании из сварных конструкций, которые в свою очередь будут залиты железобетоном.

### 1.3 Методы оптимизации работы компрессорных установок

Сокращение непроизводительных энергетических затрат играет существенную роль на большинстве промышленных предприятий. А в условиях текущего экономического состояния и повышения тарифов на электроэнергию это направление как никогда актуально.

Величина энергопотребления компрессорных и нагнетательных станций в балансе предприятия составляет 25–30%, а снижение КПД эксплуатируемых центробежных машин за счет физического износа увеличивает себестоимость сжатого воздуха, снижение затрат при его подготовке дает ощутимый экономический эффект [35].

Снизить затраты за счет электроэнергии на компрессорной или нагнетательной станции возможно используя следующие методы:

- 1) устройства плавного пуска вместо прямого включения в сеть для асинхронных электродвигателей;
- 2) увеличение рабочей зоны компрессора путем снятия ограничения хода дросселя в рабочем режиме;
- 3) метод глубокого дросселирования для уменьшения нагрузки на компрессор в режиме холостого хода;
- 4) увеличение суммарного КПД станции по методу модернизации группового регулирования и оптимизации производительности;
- 5) другие неявные составляющие: снижение потребления охлаждающих реагентов, выявление скрытых резервов за счет анализа конкретного процесса на конкретном производстве;
- 6) уменьшение простоев оборудования за счет новых средств диагностики и т.д.

## 1.4 Особенности эксплуатации компрессорной установки бумагоделательного производства

Важно понимать, что в производственном процессе на бумажной фабрике необходимо добиваться высокой степени очистки воздуха, в том числе стерильность кислорода, который нагнетается компрессорами. Проектируя компрессорную станцию, необходимо учитывать факторы, которые исключают загрязнение рабочей среды компрессорным маслом. Дабы полностью исключить риск загрязнения, на целлюлозно-бумажных фабриках в подавляющем большинстве используют либо безмасляные винтовые, либо поршневые компрессоры. Чистота подготовленного воздуха по механическим фракциям при этом достигает 99,5% [36]. Рассматривая компрессорную станцию в данном ракурсе, можно сказать, что она является сердцем производства, т.к. без качественной подготовки воздуха создать бумагу, которая бы удовлетворяла всем современным стандартам, невозможно.

## Глава 2 Разработка системы подачи сжатого воздуха для бумагоделательного производства

### 2.1 Разработка пневматической схемы подачи сжатого воздуха

Компрессорная система состоит из четырех однотипных двухконтурных поршневых компрессоров КП1-КП4 (см. пневматическую схему), подающих сжатый воздух в общую пневматическую магистраль. На выходе каждого компрессора установлен влагоотделитель, обратный клапан и затвор.

К общей магистрали также подсоединяется через затворы четыре одинаковых комплектных аккумулятора давления, установленные в компрессорной.

Забор воздуха компрессором производится через воздушный фильтр, производится сжатие в первом контуре. После первого контура воздух проходит через воздушный охладитель и поступает на вход второго контура сжатия, после чего также охлаждается и поступает на выход.

В общей магистрали через затвор установлен датчик давления воздуха М1 и производится подключение пневматического шланга, подающего сжатый воздух в систему разгрузки первого контура.

На выходе каждого компрессора установлен клапан сброса давления для разгрузки второго контура.

Для пуска компрессора в режиме холостого хода без нагрузки с последующим набросом нагрузки при разгоне применяется система пневматической разгрузки отдельно первого и второго контура [37], таким образом, снижаются пусковые токи асинхронного электродвигателя и исключается остановка компрессора при пуске.

Разгрузка первого контура производится путем подачи сжатого воздуха через соответствующий пневматический распределитель в пневмоцилиндр сверху корпуса первого контура, который перекрывает канал забора воздуха в первом контуре. При разгоне асинхронного электродвигателя (производится перекоммутация контакторами обмоток электродвигателя со

схемы «звезда» на схему «треугольник») производится отключение катушек распределителей и производится плавный сброс давления и наброс нагрузки в первом контуре. Регулировка давления (2-4 атм), подаваемого в систему разгрузки, производится редуктором давления.

Разгрузка второго контура осуществляется путем предварительного сброса давления на выходе компрессора при отключенном компрессоре [38]. Если при пуске компрессора будет присутствовать давление, компрессор может остановиться в «мертвой точке», что может привести к выходу из строя двигателя. На выходе компрессора установлен нормально-открытый клапан, который при включении электродвигателя включается и перекрывает сброс давления воздуха. При остановке электродвигателя клапан открывается и производится сброс давления воздуха на участке от выхода компрессора до обратного клапана.

Система управления разгрузкой работает независимо от системы автоматического регулирования давления.

Внешний вид элементов компрессорной системы: смонтированных на основании компрессоров и установленных для этих компрессоров ресиверов для нужд обеспечения технологического оборудования бумажной фабрики представлена на рисунке 1.12 и рисунке 1.13.

В соответствии со всем вышесказанным также разработана пневматическая схема, представленная на рисунке 1.14.



Рисунок 1.12 – Внешний вид элементов компрессоров.



Рисунок 1.13 – Внешний вид ресиверов.

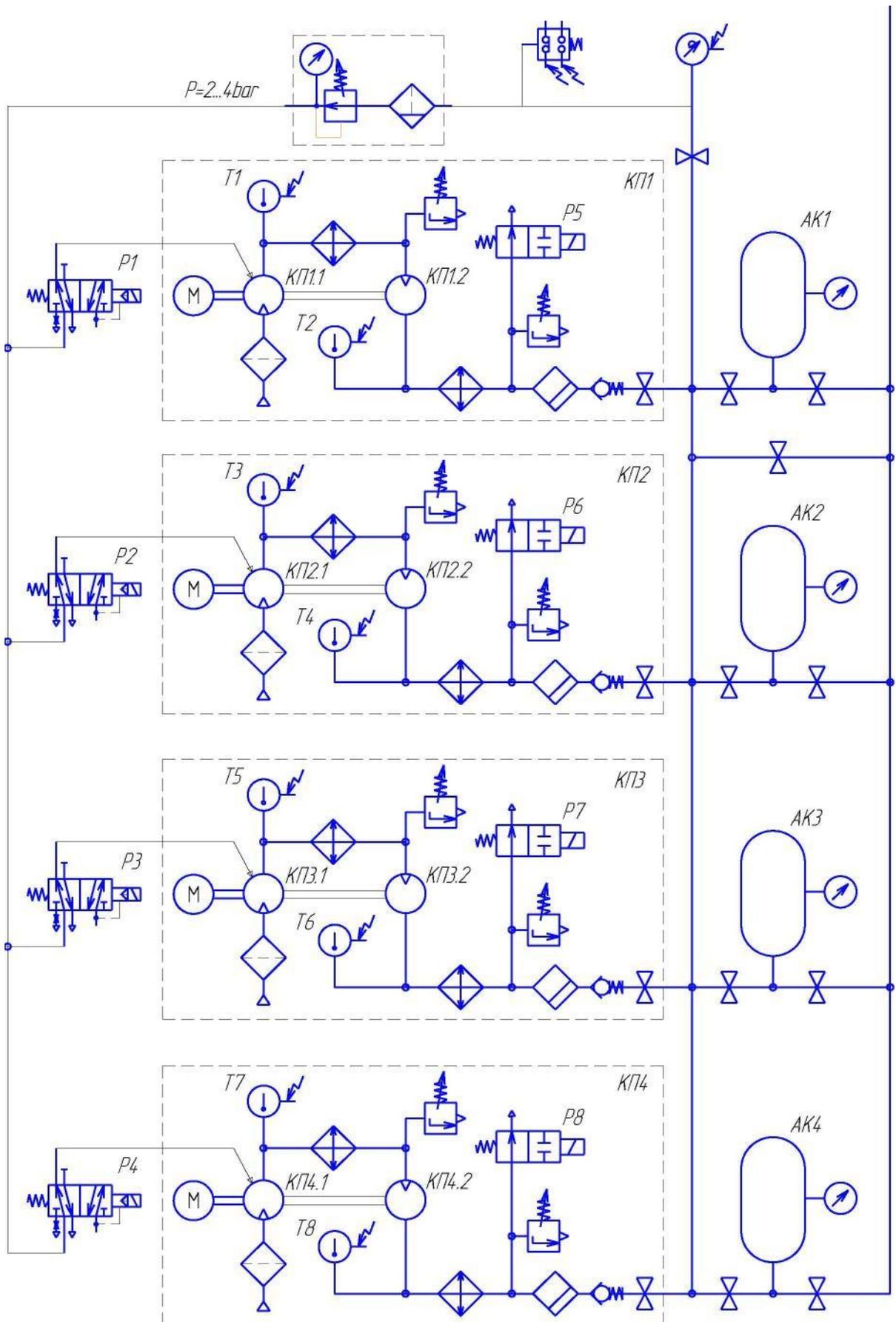


Рисунок 1.14 – Пневматическая схема компрессорной установки.

## 2.2 Анализ структуры управления

### 2.2.1 Анализ работы электродвигателей компрессорной установки

Достоинства асинхронных двигателей могут быть полностью реализованы лишь в случае правильного расчета и варианта его конечного применения. От правильного выбора электродвигателя зависят множество факторов:

1. надёжность его работы
2. отказоустойчивость в составе электромеханической системы
3. показатели потребления энергии в процессе работы.

При использовании в составе ЭМС электродвигателя с излишней мощностью неоправданно возрастают габариты компрессорной установки, её масса, стоимость монтажа и ремонта, ухудшаются экономичность.

Установке электродвигателя с заведомо увеличенной производительностью влечет за собой потерю времени выхода на рабочий режим. Следовательно, мощность электродвигателя выбирается строго в зависимости от режима работы и величины нагрузки.

Однако при расчёте электродвигателя полученная мощность не всегда точно соответствует мощностному ряду выпускаемых электродвигателей [39]. И только в этом случае подбирается электродвигатель ближайшего большего номинала по мощности.

Резюмируя все вышесказанное, целью выбора электродвигателя является:

1. определение технической возможности применения двигателя
2. нахождение наилучшего варианта из технически возможных по каталогам, при этом учитывая:
  - a. род тока;
  - b. напряжение;
  - c. конструктивное исполнение;
  - d. уровень шума и вибрации;
  - e. режим работы.

### 2.2.2 Контроль работы установки и аварийная сигнализация

Для защиты от превышения давления воздуха в контурах компрессора, что может произойти, если на выходе компрессора перекрыт затвор, в каждом контуре установлен предохранительный клапан, настроенный на давление 10-11 атм.

Для контроля температуры воздуха на выходе каждого цилиндра установлен температурный датчик. При превышении температуры воздуха выше установленного предела, что может являться следствием механической неисправности компрессора, производится отключение автоматического режима работы и сигнализация аварии.

Для работы в качестве будут использованы электродвигатели с термодатчиками для защиты от перегрева. Датчики устанавливаются в лобовых частях обмотки и их контакты выводятся в клемную коробку двигателя. В случае превышения температуры выше  $85^{\circ}\text{C}$ , будет происходить отключение контактов датчика, что будет приводить к отключению автоматического режима работы конкретного компрессора и будет срабатывать соответствующая аварийная сигнализация.

К пневматической магистрали контура разгрузки подключено реле давления, уставка которого настроена немного выше номинального давления. При срабатывании реле давления производится отключение цепей управления и невозможность запуска компрессоров.

## 2.3 Разработка электрической схемы управления компрессорной установкой

Работа компрессоров возможна в двух режимах: «РУЧНОЙ» и «АВТОМАТИЧЕСКИЙ». Переключение режимов производится с помощью селектора, установленного на двери шкафа управления электродвигателями. При нажатии кнопки-грибка «ОБЩИЙ СТОП» производится полное отключение питания.

При ручном режиме включение и отключение каждого компрессора производится с помощью кнопок «ПУСК» и «СТОП» независимо для каждого давления. При срабатывании реле давления SP1 все компрессоры отключаются.

Подключение двигателей компрессоров осуществляется по схеме переключения режимов звезда/треугольник, с защитой автоматическим выключателем. Для пуска и переключения схемы звезда/треугольник двигателя используются трехфазные контакторы [39]. Схема подключения одного из четырех двигателей приведена на рисунке 2.1.

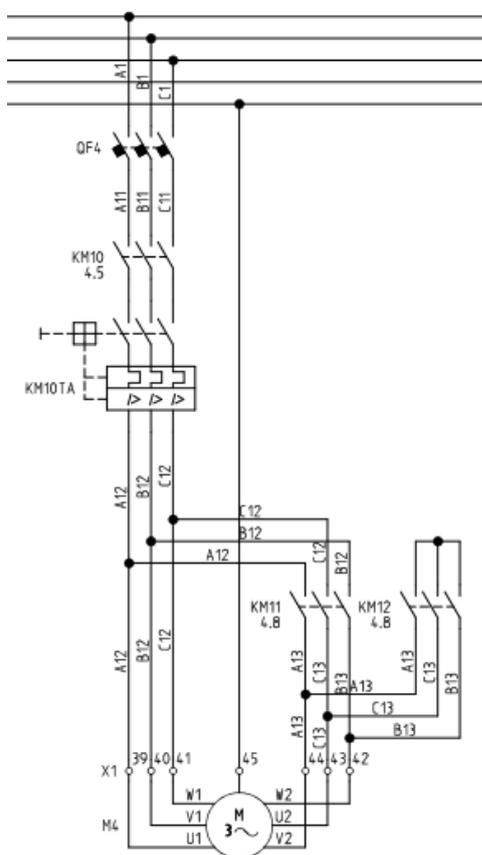


Рисунок 2.1 – Схема включения электродвигателя.

При автоматическом режиме работы подается напряжение управления в шкаф автоматизации. Управление производится контроллером с контролем давления воздуха в общей магистрали датчиком давления (выходной сигнал 4-20мА). Контроллер производит включение компрессоров в соответствии с запрограммированным алгоритмом работы, путем включения промежуточных реле К1-К4 и К8-К11, схема включения которых представлена на рисунке 2.2.

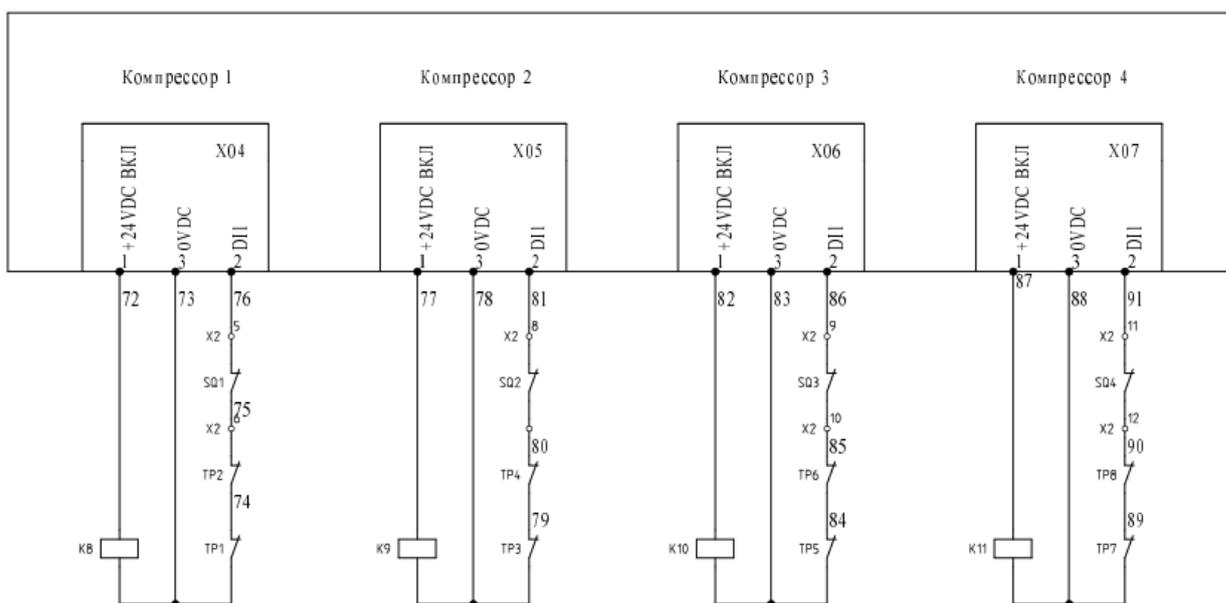


Рисунок 2.2 – Промежуточные реле.

Запуск и останов автоматического режима работы производится нажатием кнопок «ПУСК» и «СТОП» на двери шкафа управления, вследствие чего активируется (реле К7) настраиваемый цифровой вход контроллера.

Реле К5 и К6 подключены к цифровых выходам 1 и 2 соответственно с возможность настройки функции выходного сигнала с помощью параметров (например: «Авария», «Работа» и т.д. (см. руководство по эксплуатации контроллера).

Схема подключения контроллера представлена на рисунке 2.3.

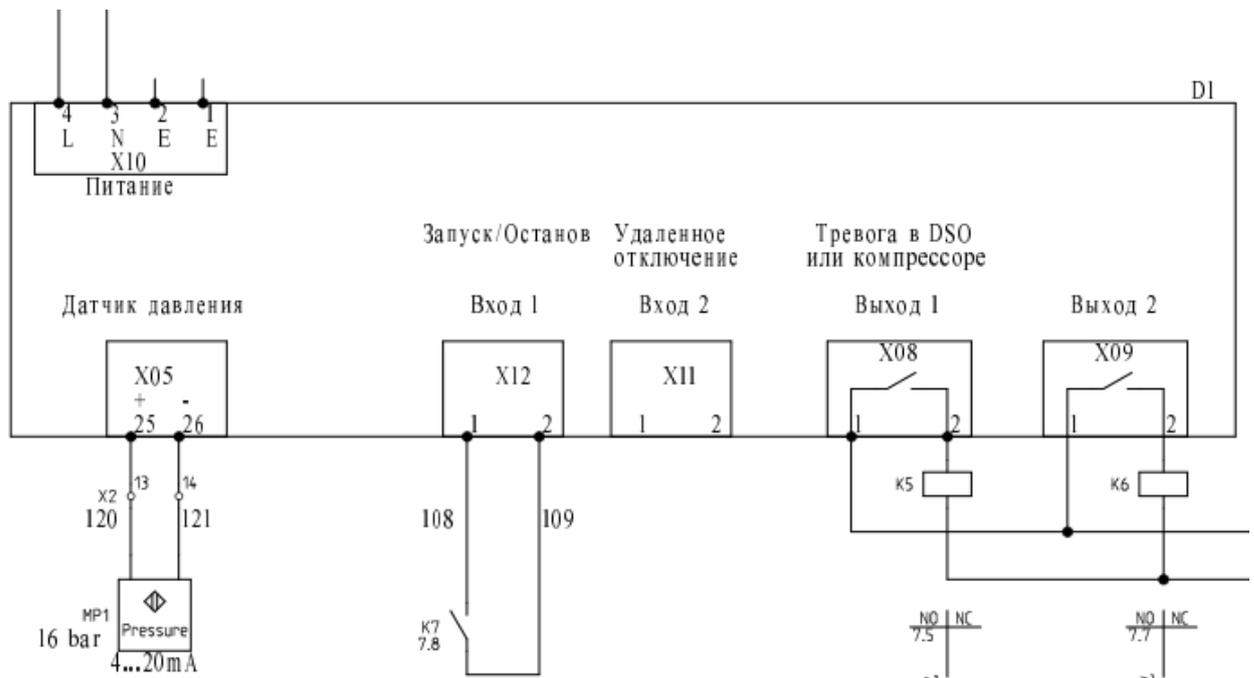


Рисунок 2.3 – Схема включения контроллера.

В шкафу автоматизации установлены термореле TP1-TP8, к которым подключены соответствующие термодатчики. На рисунке 2.4 представлена схема включения термореле TP1-TP4.

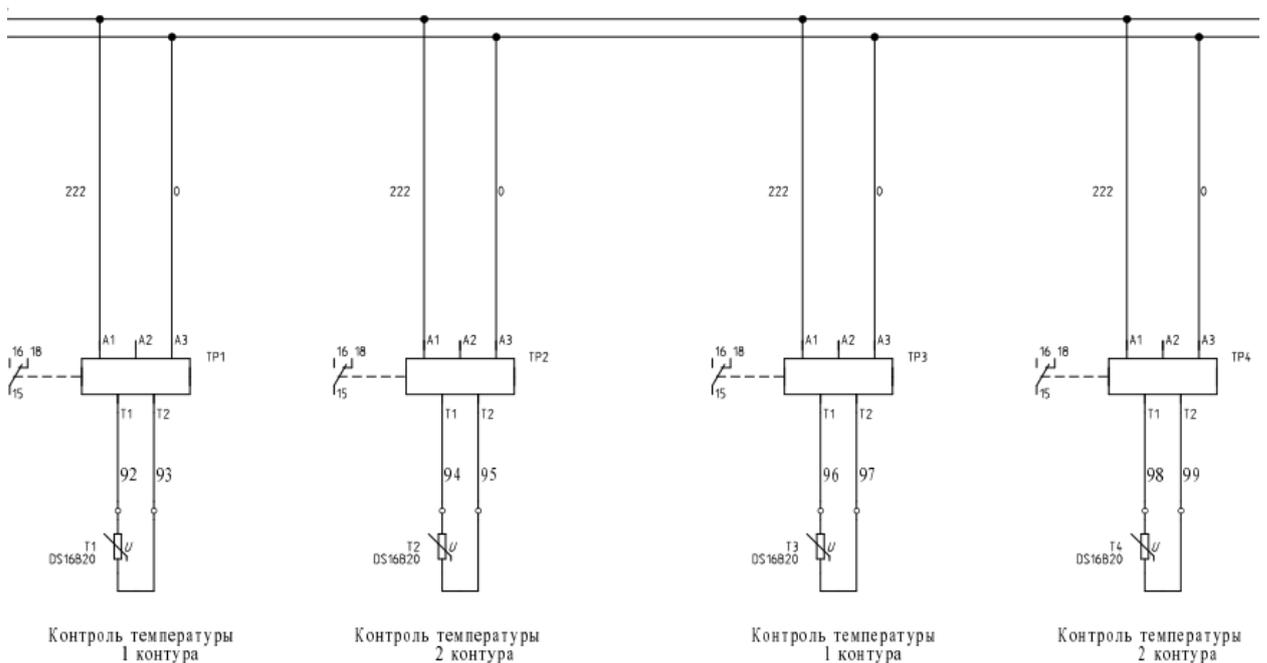


Рисунок 2.4 – Схема включения термореле.

На термореле индицируется измеренная температура. При температуре выше заданной уставки, происходит срабатывание термореле и размыкается

цепь цифрового входа DI канала управления компрессора, что приводит к отключению канала управления с индикацией аварийного сообщения. Компоненты схемы собраны внутри электрического шкафа, внешний вид которого представлен на рисунке 2.5, а функциональная схема электрических компонентов внутри – на рисунке 2.6.

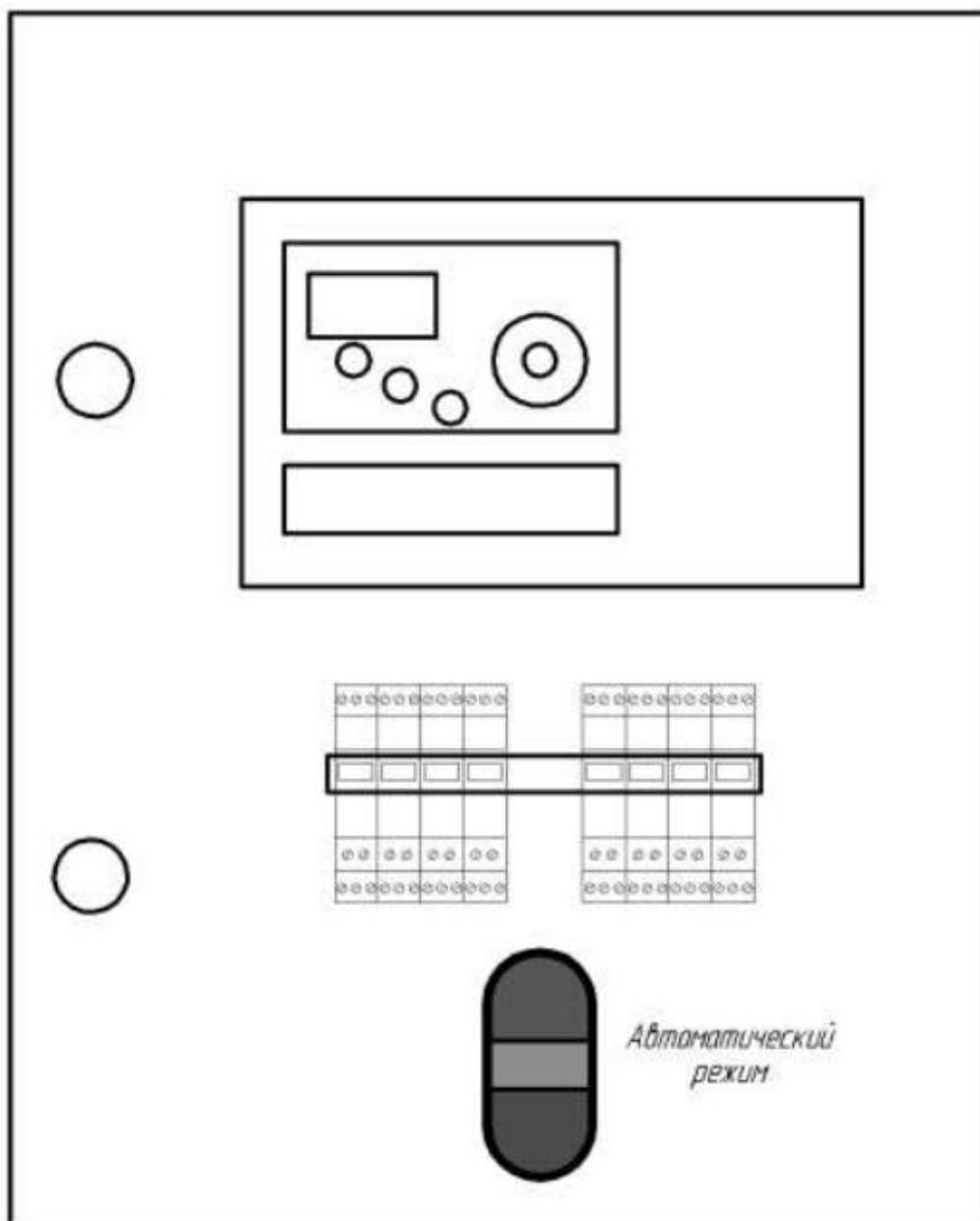


Рисунок 2.5 – Монтажная схема лицевой части шкафа автоматического управления.

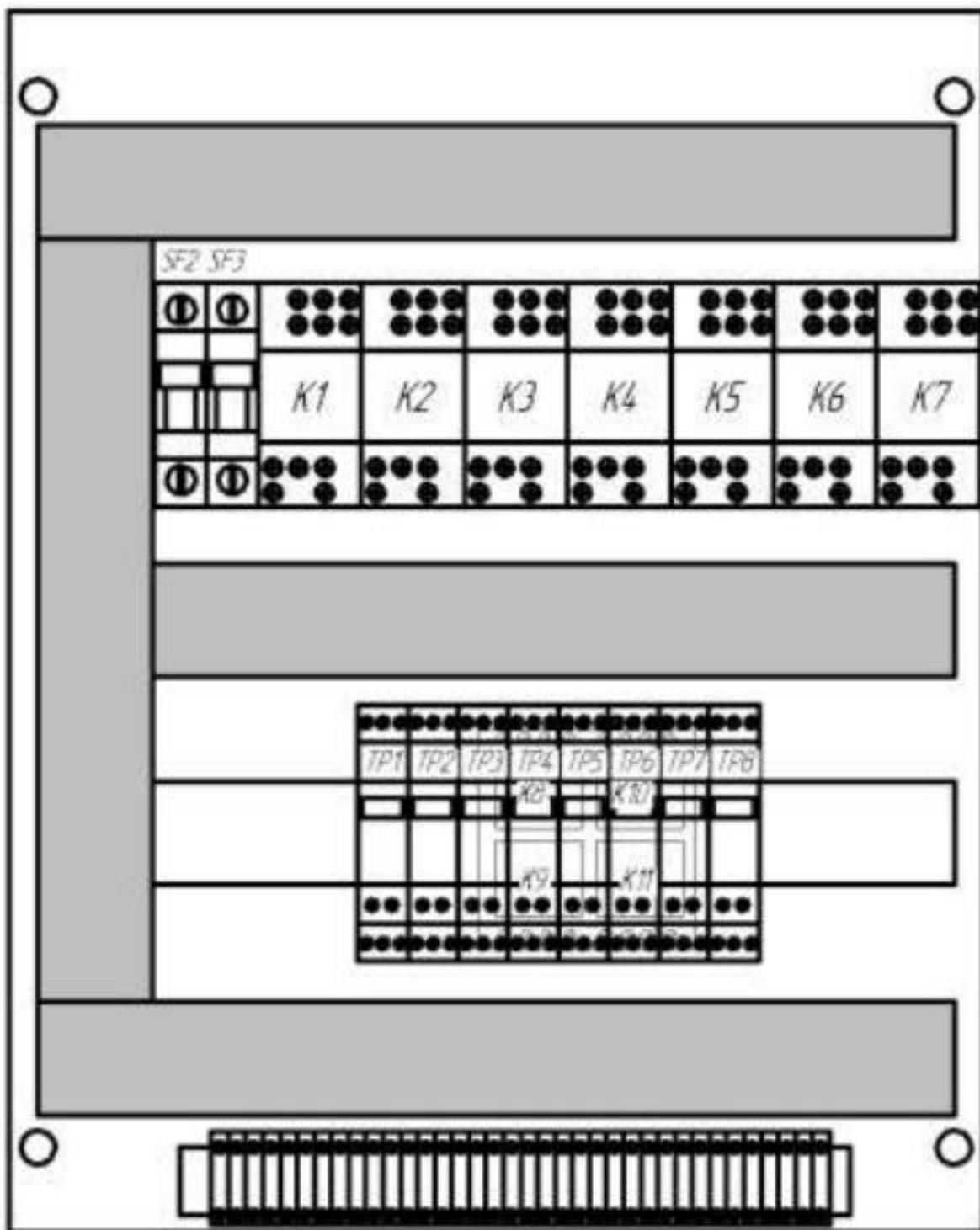


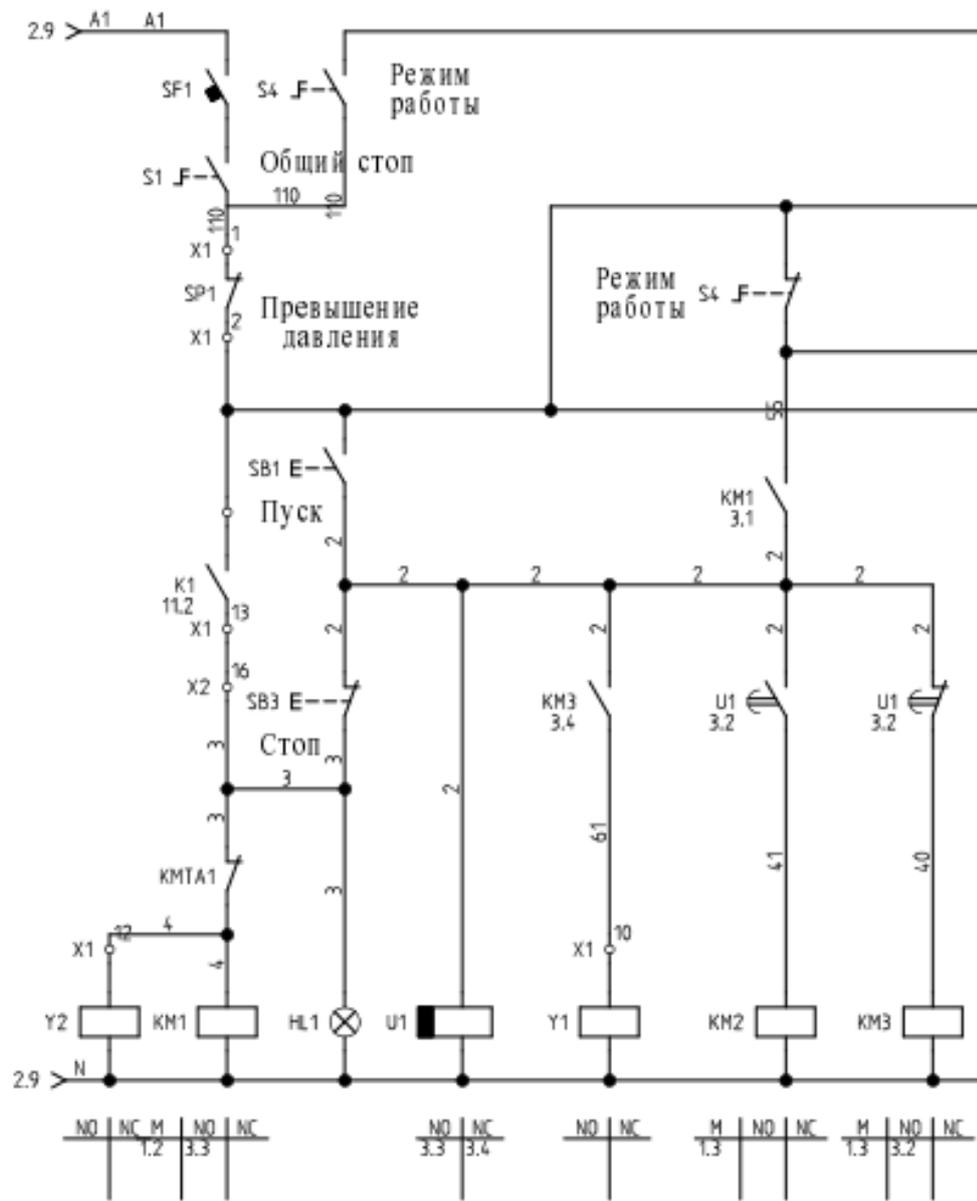
Рисунок 2.6 – Монтажная схема внутренней части шкафа автоматического управления.

Каждый элемент схемы тщательно подбирался с учетом оптимального соотношения стоимость/надежность. В спецификации, представленной в таблице 2.1, представлены все компоненты, используемые в системе управления.

Таблица 2.1 – Электрические компоненты схемы управления.

Обозначение	Наименование	Тип	Производитель
D1	Блок управления компрессорами DCO4	Y08CM95.00	Metacentre DCO
MP1	Датчик давления	ДДМ-03Т-1600ДИ	Промав
T1-T8	Термодатчик цифровой	DS18B20	
TP1-TP8	Реле температуры	TP-77M	Реле и автоматика
K1-K4	Реле промежуточное 24В	SRU-24VDC	Songle
K5-K11	Реле промежуточное 220В	РЭК 78/3 230В	IEK
S2,S3,L1	Кнопка Пуск Стоп	APBB-22N	IEK
SF2	Автоматический выключатель 4А	BA47-29 4А	IEK
SF3	Автоматический выключатель 1А	BA47-29 1А	IEK

Схема разгрузки первого и второго контура каждого из компрессоров представляет собой полностью управляемую электроникой схемную реализацию. Такой вариант отвечает всем современным нормам безопасности и позволяет оперативно реагировать на изменения давления в системе, а также на нештатные ситуации. Для наглядного понимания логики работы схемы разгрузки, на рисунке 2.7 представлена схема для первого компрессора, для остальных компрессоров схема выполнена аналогично.



Разгрузка второго контура I компрессора

Разгрузка первого контура I компрессора

Рисунок 2.7 – Схема разгрузки первого компрессора.

## Глава 3. Разработка системы управления компрессорной установкой

### 3.1 Обзор существующих систем управления компрессорами

Metacentre DCO (Передача нагрузки) представляет собой специализированное устройство управления системой воздушных компрессоров, осуществляющее последовательную автоматическую ротацию нагрузки и оптимизированный контроль единого диапазона давления нескольких воздушных компрессоров, работающих на общей воздушной системе, общая схема представлена на рисунке 3.1.

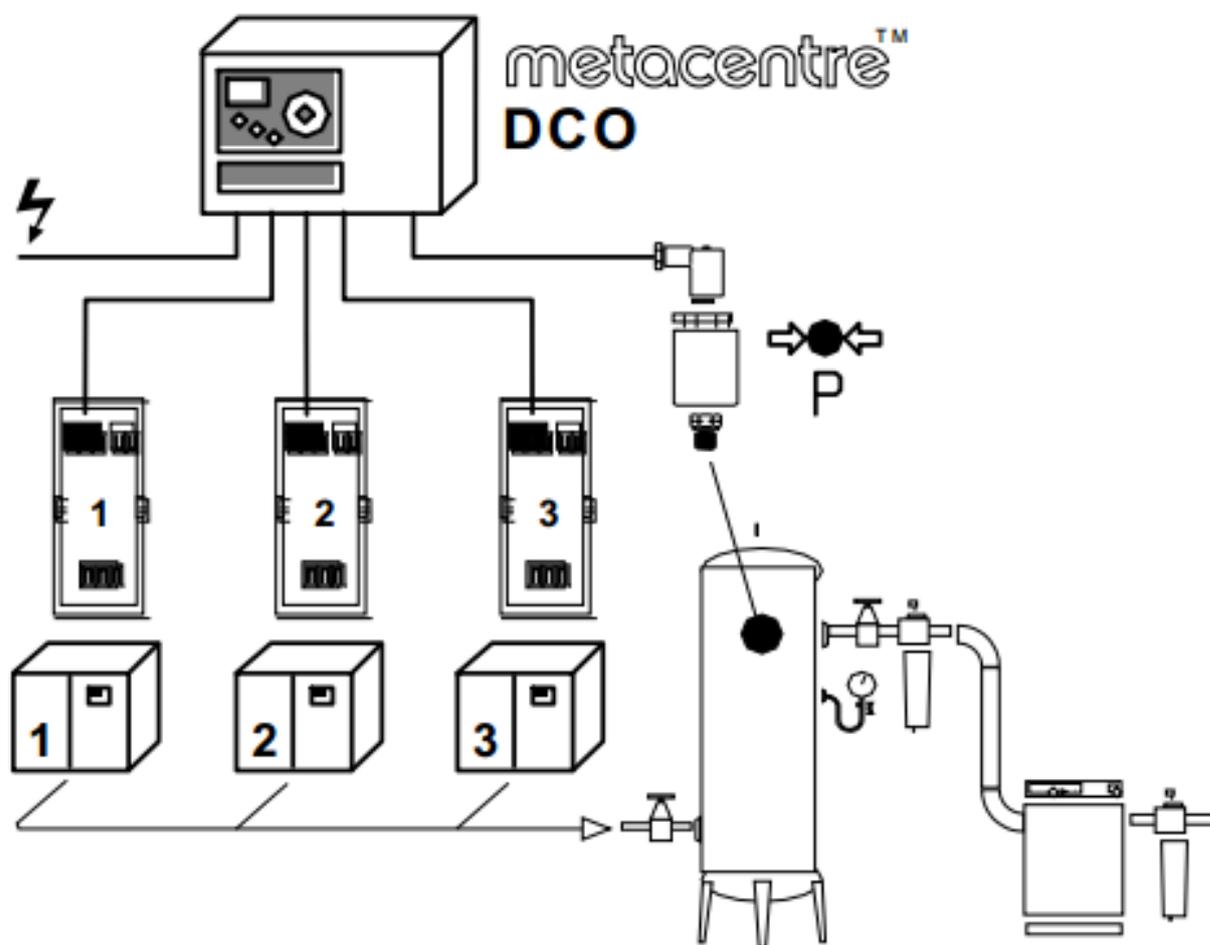


Рисунок 3.1 – Блочная схема системы управления.

В устройстве Metacentre DCO, структурная схема представлена на рисунке 3.2, применяется технология контроля единого диапазона давления с помощью общего высокоточного электронного датчика давления.

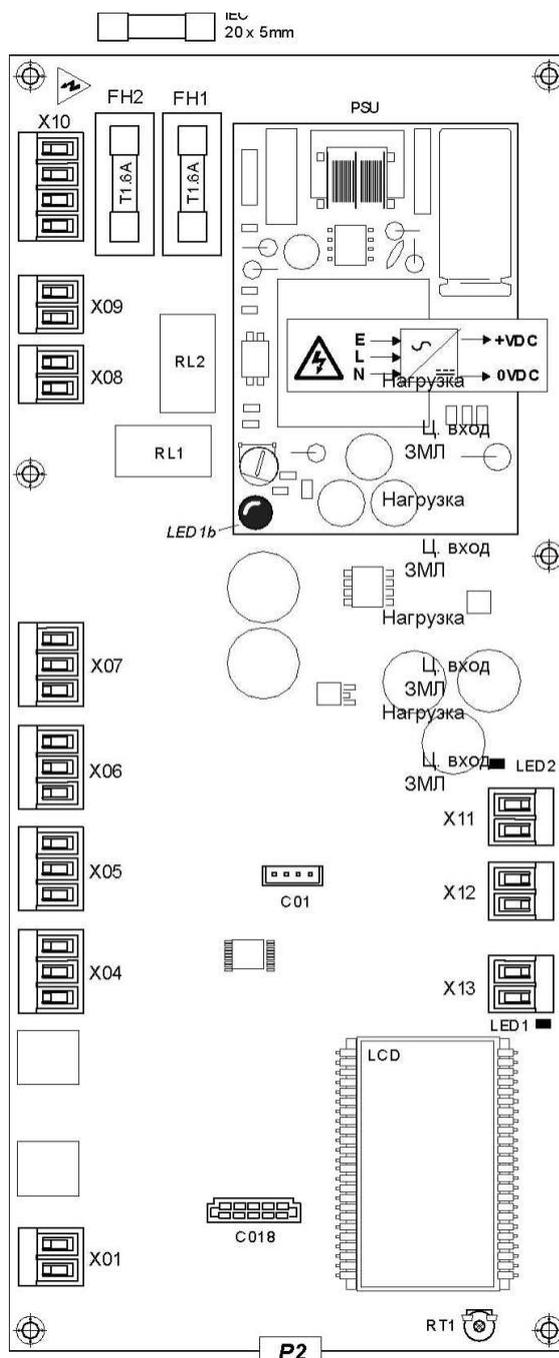


Рисунок 3.2 – Структурная схема системы управления.

По умолчанию Metacentre настроен на работу с датчиком давления 16.0 бар (232 фунтов/кв. дюйм) (поставляемым в комплекте с DCO), но может принимать данные от датчика давления на 4-20 мА с диапазоном работы от 1,0 бар (14,5 фунтов на дюйм) до 60,0 бар (870 фунтов на дюйм).

Ротация нагрузки воздушных компрессоров является автоматизированной на основе непрерывного цикла с использованием внутреннего, регулируемого оператором, таймера рабочего времени.

Каждый воздушный компрессор в системе может быть интегрирован с Metacentre DCO с помощью интерфейсного модуля (поставляемого в комплекте с DCO), который предназначен для обеспечения соединения почти с любым объёмным воздушным компрессором, независимо от модели и производителя.

Интерфейсный модуль (miPCB), представленный на рисунке 3.3, устанавливается внутри зоны управления компрессора и соединяется с Metacentre DCO с помощью трёхпроводного кабеля.

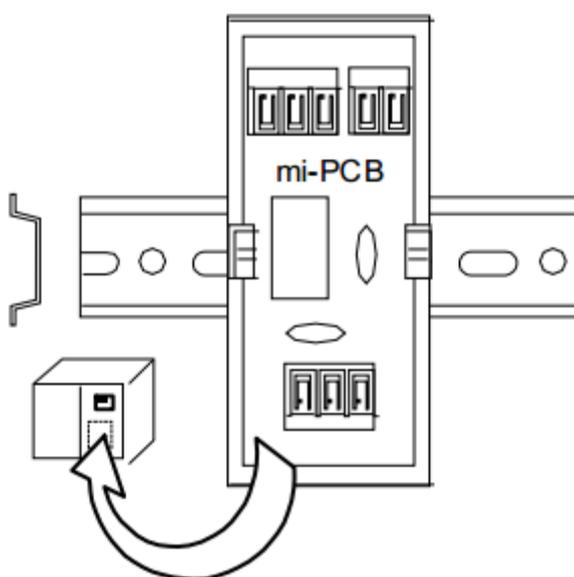


Рисунок 3.3 – Интерфейсный модуль.

Каждый воздушный компрессор должен быть оснащен системой регулировки загрузки и разгрузки [40], а в случае отсутствия регулировки единым электромеханическим переключателем давления, иметь устройство для дистанционного контроля загрузки и разгрузки с возможностью приема входного переключающего контакта без напряжения для дистанционной загрузки/разгрузки.

Основная функция стратегии управления давлением DCO - это поддержание давления в системе между контрольной точкой 'Высокое давление' (PH - регулируемое) и точкой 'Низкое давление' (PL - регулируемое) для достижения системой оптимального режима

энергосбережения. DCO рассчитывает ‘требуемый’ уровень давления (PT) - средний показатель между двумя установленными точками, который используется в качестве номинального указателя ‘требуемого’ уровня давления системы, рисунок 3.4.

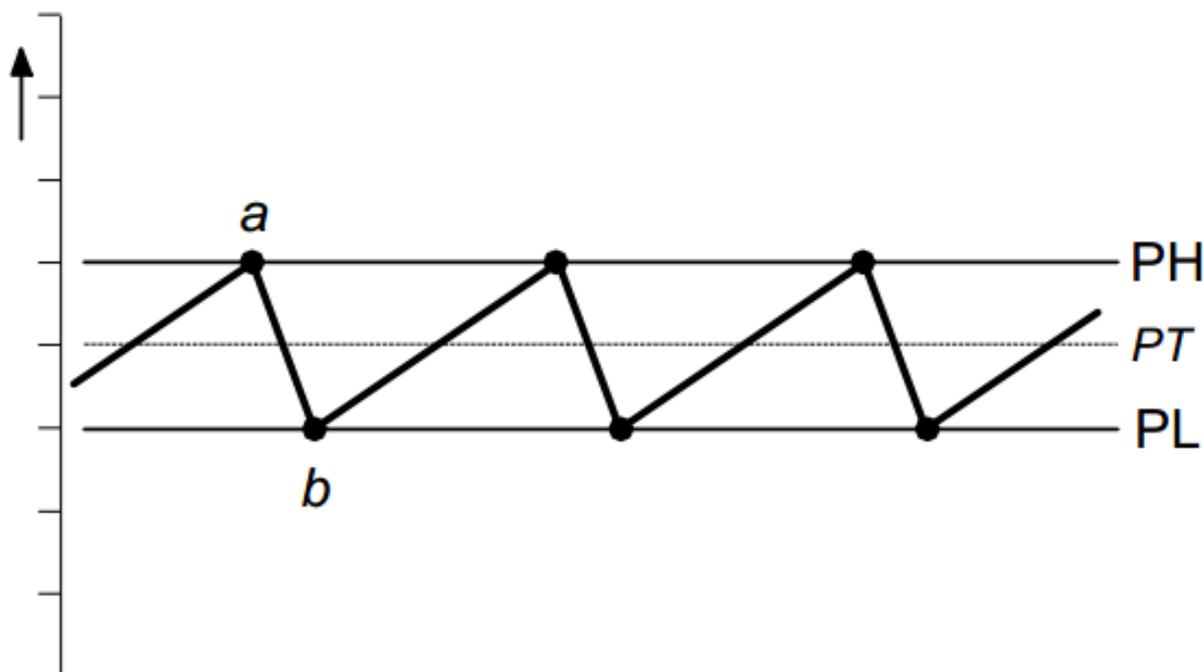


Рисунок 3.4 – Процесс идеального регулирования.

При достижении давления в системе контрольной точки “Высокое давление” (a) компрессор переходит в режим разгрузки. Давление должно понизиться до уровня “Низкое давление” (b) перед тем, как компрессор будет вновь включен для добавления выходной мощности и повышения давления. Данный процесс будет продолжаться при постоянном расходе воздуха в непрерывном устойчивом цикле. Если потребность в воздухе значительно увеличивается, а выходная мощность компрессора при загрузке находится на отметке «Низкое давление» (b) и является недостаточной, то давление будет далее понижаться, пока не достигнет нижнего уровня. DCO в этом случае загрузит дополнительный компрессор. Момент, в который загружается дополнительный компрессор (c), динамично рассчитывается и определяется в зависимости от скорости понижения давления (срочно или за определённое

время) и приемлемого отклонения давления в системе (‘Допустимого отклонения’) от нормальных контрольных пределов, рисунок 3.5.

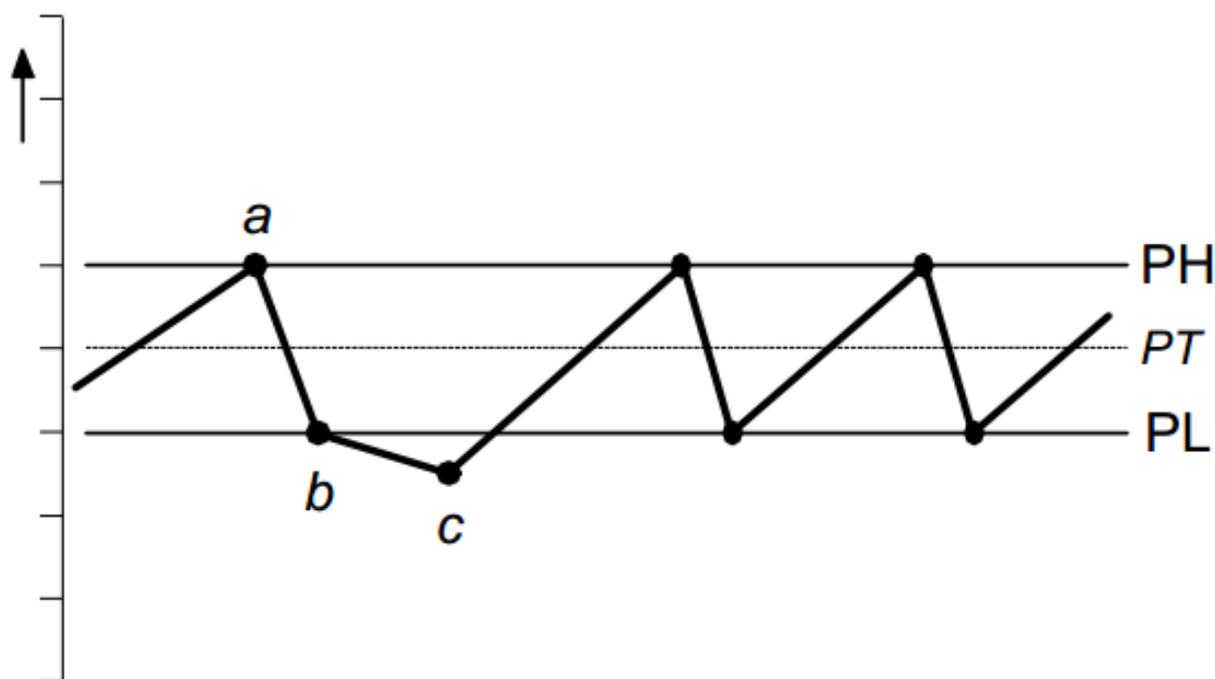


Рисунок 3.5 – Отклонение требуемого давления от границ.

Тот же метод применяется и в обратном случае (выше контрольной отметки «Высокое давление»), когда потребность в воздухе значительно или резко уменьшается. Скорость изменения давления и устойчивость контроля давления в значительной степени определяются системным объемом и шкалой и/или резкостью колебаний расхода воздуха; данные характеристики будут отличаться от установки к установке.

Для оптимизации изменений, в характеристиках установки регулируется ‘Допустимое отклонение’ уровня давления (ТО) и время динамической реакции (или ‘глушение’) DCO(DA). Система контроля давления - контур обратной связи, который работает на основе увеличения или понижения выходной мощности. Если выходная мощность больше, чем потребность в воздухе, то давление в системе будет повышаться. Если потребность больше, чем выходная мощность, то давление в системе будет понижаться. Скорость изменения давления в ситуациях изменяющегося

производства и мощности потребления в значительной степени зависит от объема системы. Если объем системы небольшой, по сравнению с рекомендуемым размером, то скорость изменения давления будет высокая, эффективность контроля резких изменений - низкая и, соответственно, в данном случае будет низкой эффективностью. Если объем системы большой, то скорость изменения давления будет низкой и постепенной. В данном случае возможен увеличенный контроль давления, время реакции системы может снизиться, и в результате будет достигнута оптимальная эффективность системы.

### 3.2 Выбор аппаратного обеспечения

DCO монтируется на стену с помощью двух обычных винтовых креплений. DCO может располагаться на расстоянии от компрессоров, но в пределах 30 м (100 футов) длины провода от каждого компрессора и 100 м (330 футов) длины провода от датчика давления в системе. Для использования в условиях загрязнения окружающей среды 2 степени.

Для того чтобы соответствовать устройству, принадлежащему к Типу 12, кабельный сальник, изоляционная трубка и другая арматура должны принадлежать к Типу 12, 12 К или 13

Система датчика давления (P) должна постоянно испытывать давление, общее для всех компрессоров, и располагаться в соответствующем месте, как например на рисунке 3.6.

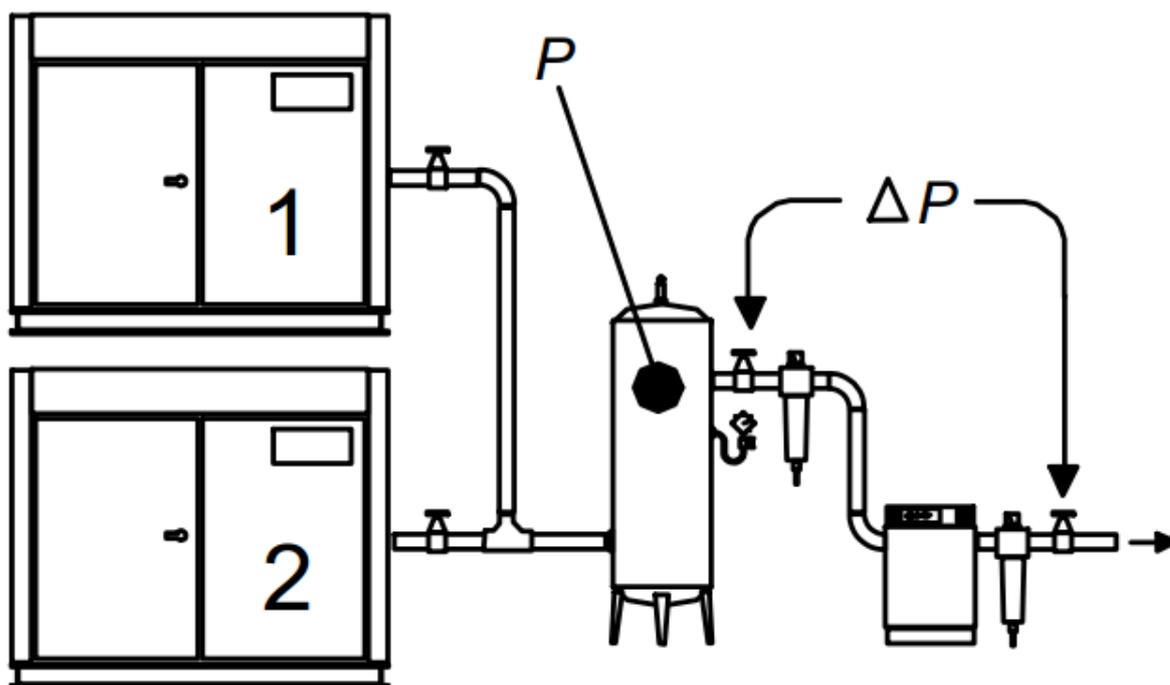


Рисунок 3.6 – Контроль давления со стороны генерации.

Системное давление будет ниже, чем установленное давление ‘генерации’ из-за дифференциальных потерь, при прохождении через воздухообрабатывающее оборудование, для этого необходимо контролировать давление на стороне потребления, как на рисунке 3.7.

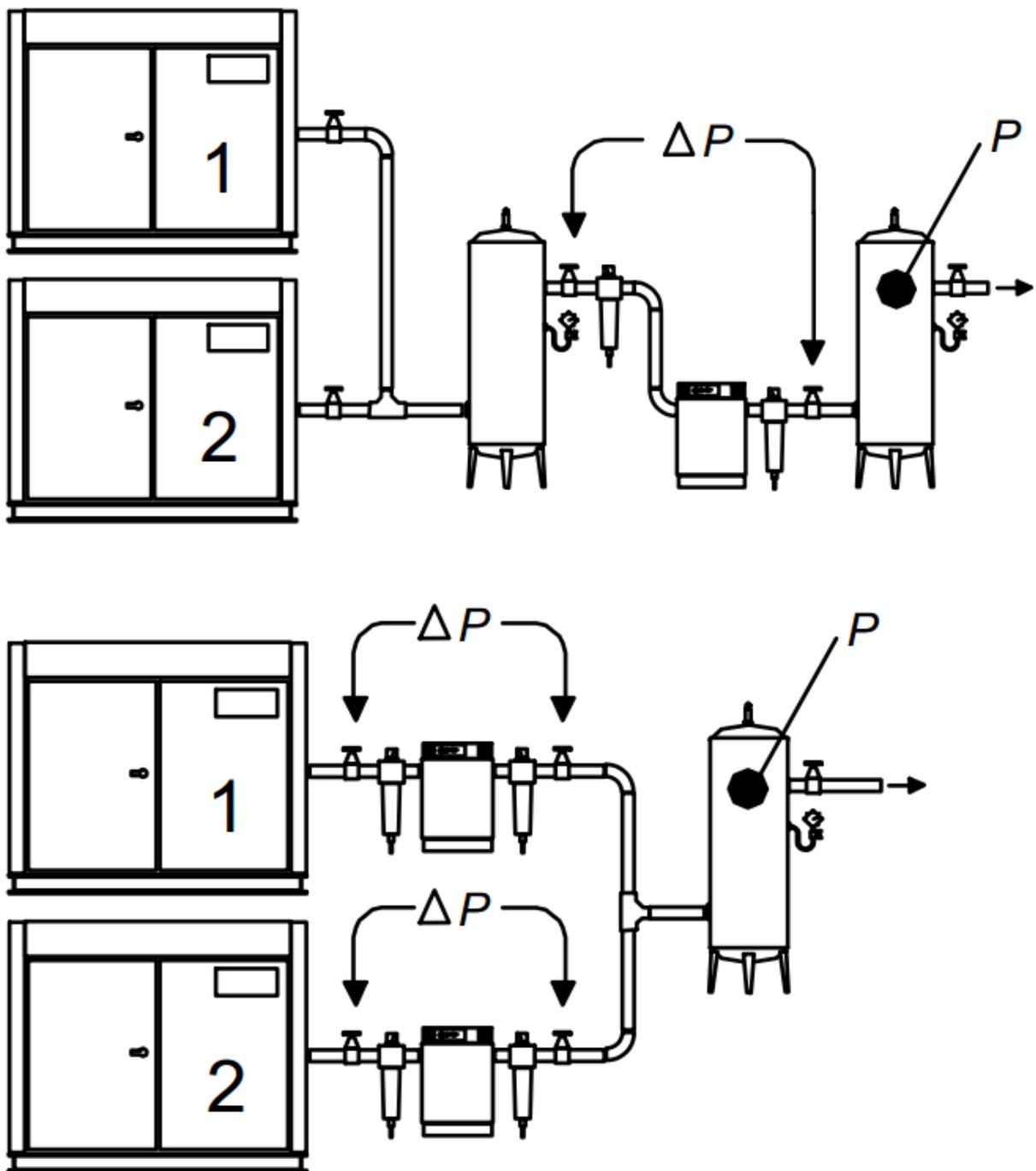


Рисунок 3.7 – Контроль давления в системе (со стороны потребления).

Номинальное давление в системе будет уменьшаться, так как увеличится дифференциал давления обработки воздуха. Убедитесь, что каждый компрессор оборудован независимым устройством аварийного контроля чрезмерного давления; увеличение дифференциалов давления в

воздухообрабатывающем оборудовании может привести к увеличению компрессорного давления нагнетания.

Рекомендуется регулярно производить мониторинг дифференциалов давления в устройстве обработки воздуха [41].

Датчик давления должен соединяться с клеммой X01 DCO с помощью заземленного экранированного двухпроводного (с минимальным сечением 0.25мм) кабеля, длиной не более 100 м (330 футов), рекомендуемая схема подключения показана на рисунке 3.8.

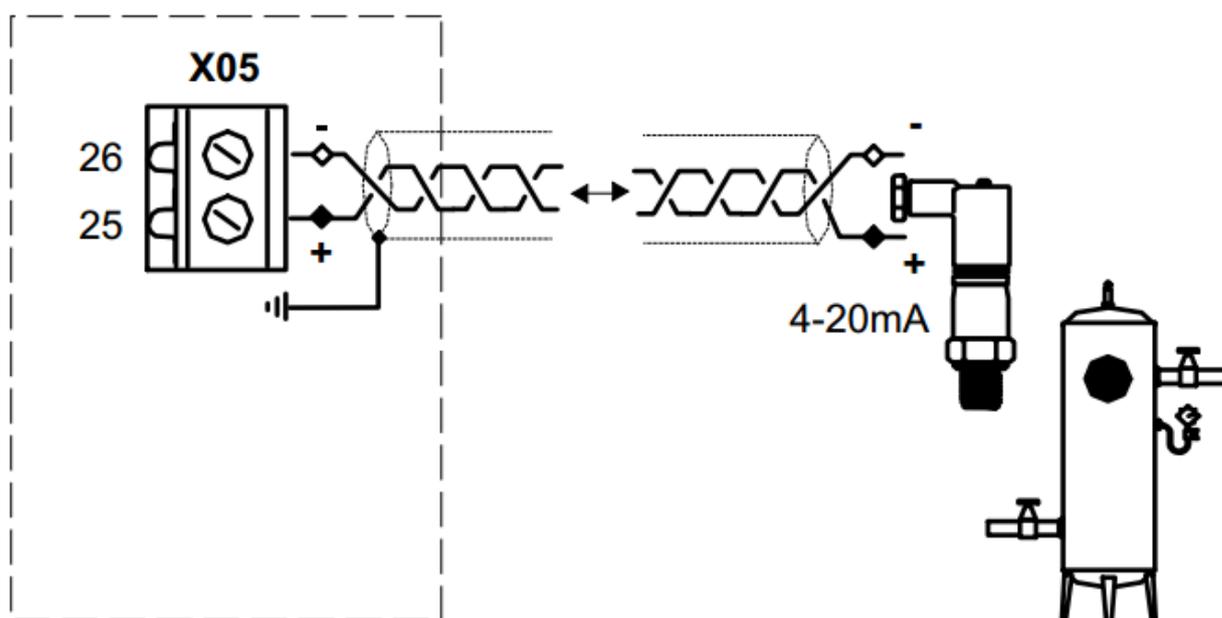


Рисунок 3.8 – Подсоединение датчика давления.

Интерфейс компрессора «mi-PCB» предназначен для соединения компрессора с DCO с помощью трёхпроводного кабеля (с минимальным сечением 0.5) кабеля, длиной не более 30 м (100 футов) Рекомендуемая схема и требования по подключению указаны на рисунке 3.9.

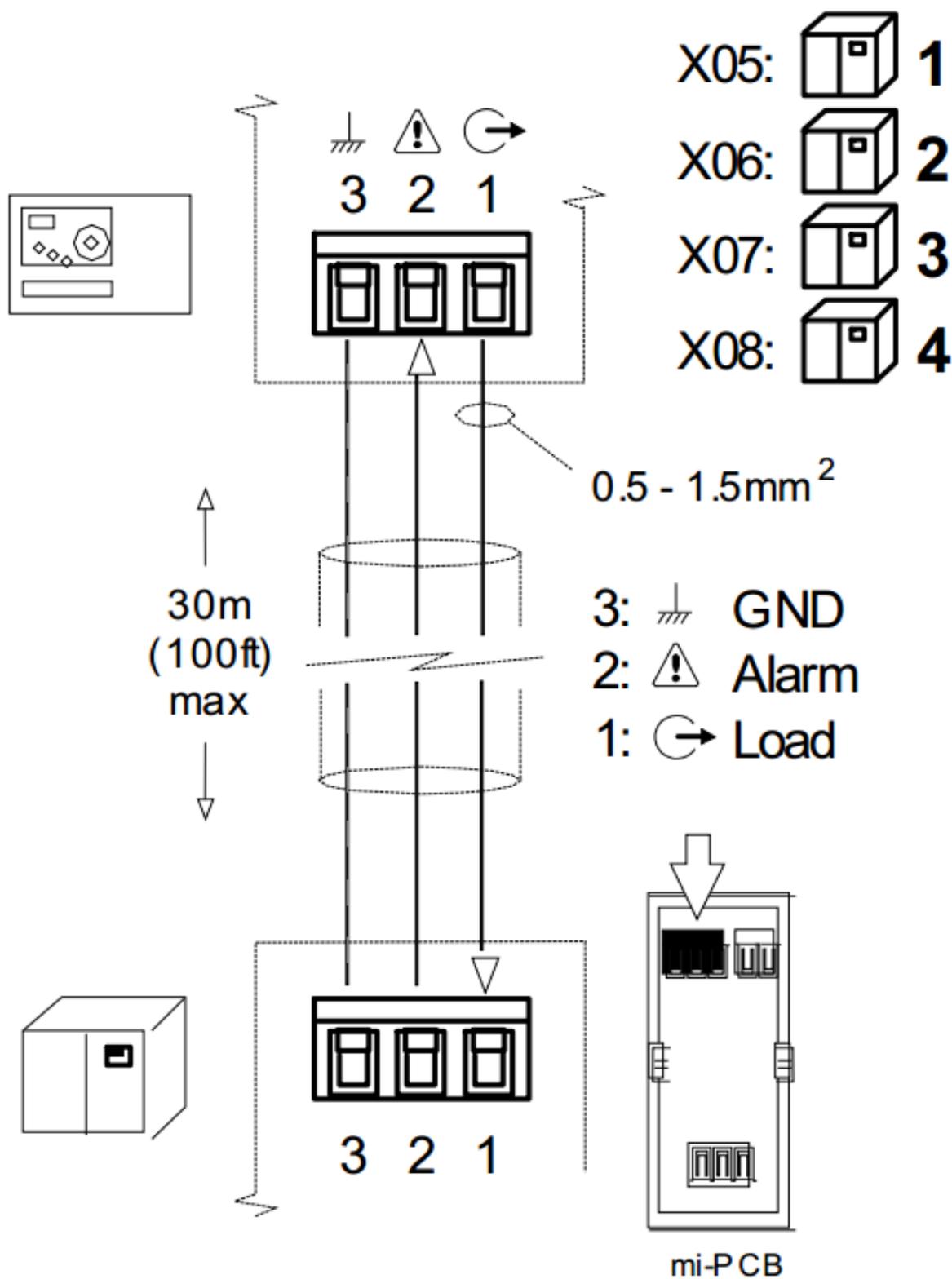


Рисунок 3.9 – Подсоединение интерфейсного модуля.

Каждому компрессору в системе должен быть присвоен идентификационный номер от 1 до количества компрессоров в системе. Для

работы идентификационный номер должен быть четко обозначен на каждом компрессоре.

Для каждого компрессора, соединенного с DCO с использованием «mi-PCB», сигнальные провода должны быть соединены с клеммами DCO, предназначенными для установленного идентификационного номера компрессора, в соответствии с рисунком 3.10.

Компрессор	1	2	3	4
<b>DCO 2:</b>	X05	X06	-	-
<b>DCO 3:</b>	X05	X06	X07	-
<b>DCO 4:</b>	X05	X06	X07	X08

Рисунок 3.10 – Логика обозначения компрессоров.

Для связи с сетью предприятия на управляющем модуле контроллера DCO предусмотрен интерфейс связи RS485. Схема подключения шины связи представлена на рисунке 3.11.

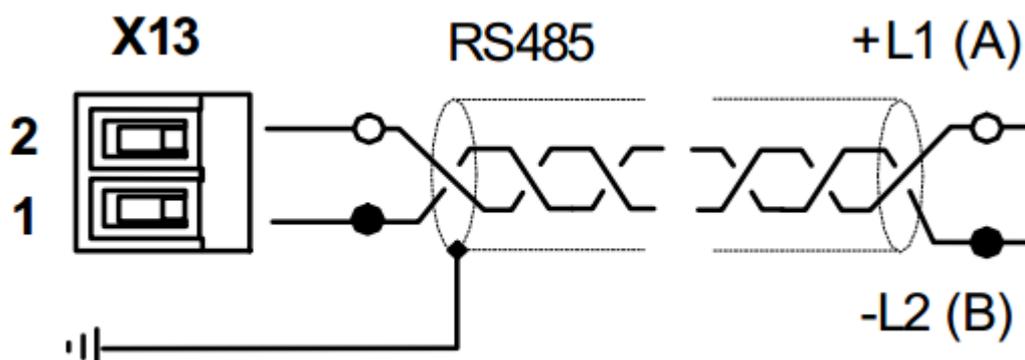


Рисунок 3.11 – Схема подключения.

Проводка RS485 легко может быть подвергнута электрическим помехам. Данный электрический потенциал может стать причиной скачковых сбоев или аномалии, которую трудно диагностировать. Чтобы

этого избежать, для кабеля интерфейса связи используется заземленный экранированный кабель, с безопасным замыканием на землю с одного конца.

Проводка проложена вдоль кабелей электропитания. Данная проводка должна занимать короткий отрезок, (например: от компрессора DCO до стены вдоль подвешенной кабельной коробки) присоедините RS485 или сигнальный кабель на внешней стороне заземленной кабельной коробки так, чтобы кабельная коробка образовывала заземленный щит от электрических помех. Оптимальные варианты прокладки кабеля связи представлены на рисунке 3.12.

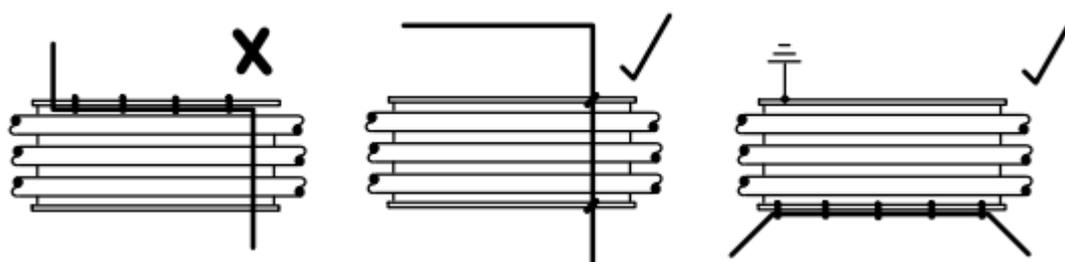


Рисунок 3.12 – Варианты прокладки кабеля.

Кабель RS485 нельзя прокладывать рядом с оборудованием или устройствами, которые могут быть источником электрических помех (например: трехфазовый трансформатор энергоснабжения, высоковольтное устройство переключения, инвертор спектра приводного модуля, антенна радиосвязи).

### 3.3 Используемое программное обеспечение

Компрессорная станция является весьма сложной технологической установкой. Поэтому необходимо ответственно подойти к выбору программного обеспечения для проектирования.

Среди множества вариантов программного обеспечения для проектирования подобных технологических установок, выбор был сделан в пользу системы сквозного проектирования EPLAN.

EPLAN – это программное обеспечение для ведения сквозного проектирования, которое охватывает следующие отрасли:

1. электротехника;
2. контрольно-измерительные приборы и автоматика;
3. гидравлика;
4. пневматика;
5. механика (проектирование шкафов и жгутов), пример на рисунке 3.13.

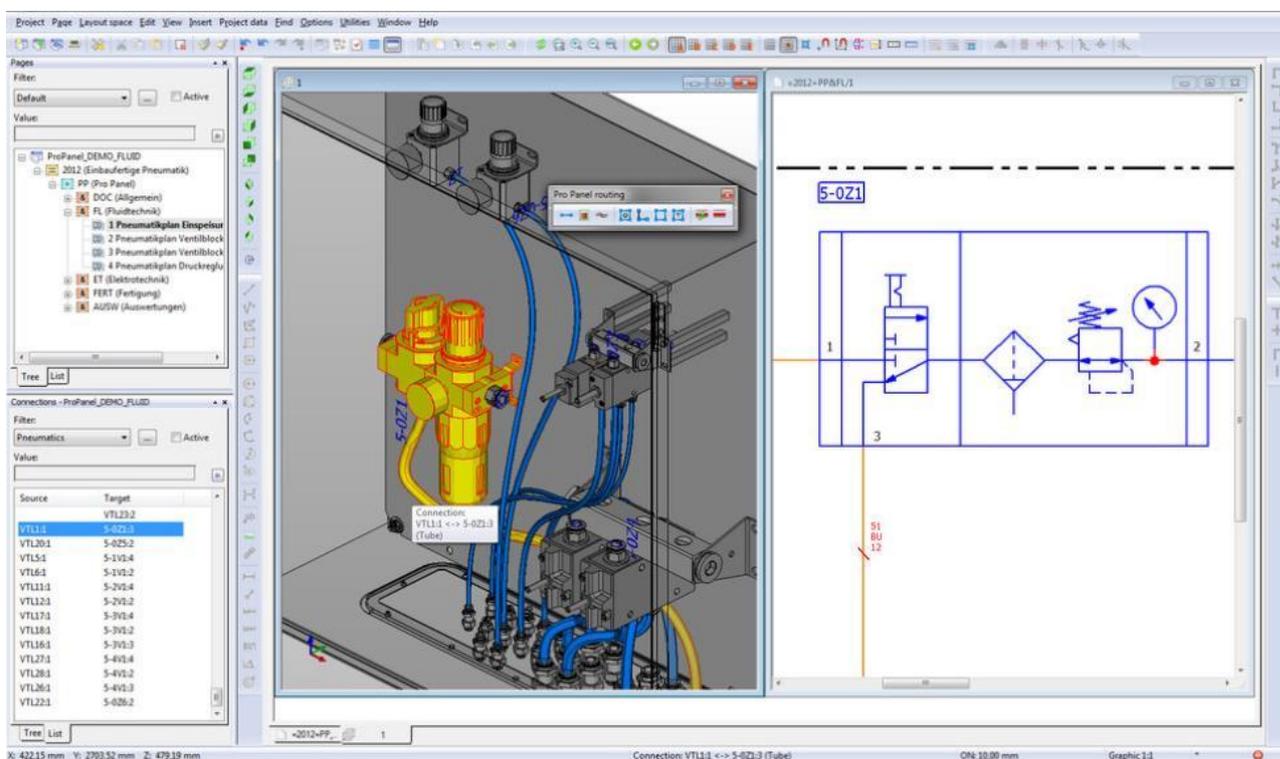


Рисунок 3.13 – Проектирование пневмосхемы в EPLAN.

EPLAN основан на открытой архитектуре и имеет в своем составе стандартные интеграционные модули. Благодаря этому, программное обеспечение может быть экономически эффективно интегрировано с большим рядом сторонних решений:

1. системами механического проектирования;
2. ERP системами;
3. PDM системами;
4. ПО для проектирования зданий;
5. ПО для промышленных производств и даже кораблей.

В рамках проектирования компрессорной установки используются следующие модули EPLAN:

1. EPLAN Electric P8 – модульное и масштабируемое программное обеспечение для проектирования электрических схем и решений, автоматического создания проектной и рабочей документации, рисунок 3.14.

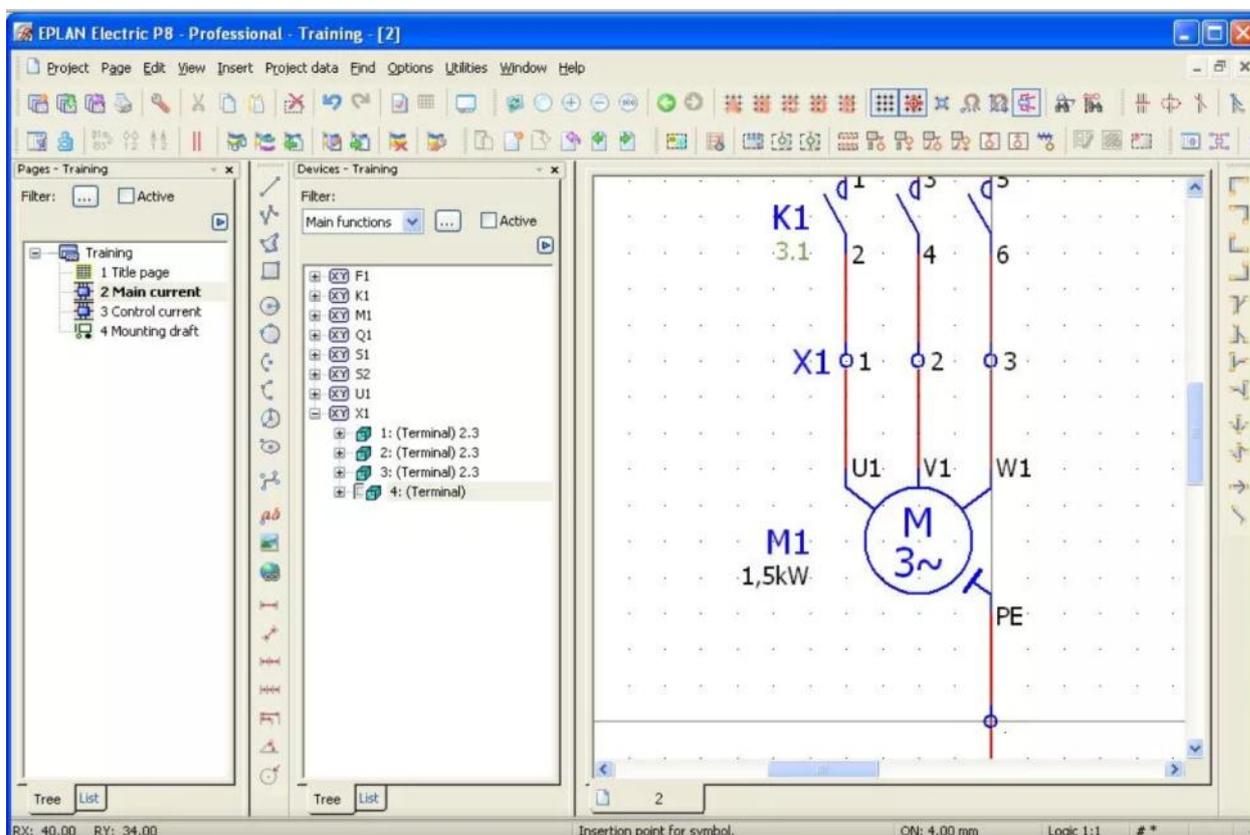


Рисунок 3.14 – Пример работы в EPLAN Electric.

2. EPLAN Fluid – программное обеспечение для проектирования схем пневмо/гидроавтоматики, систем централизованной и распределенной смазки, охлаждения (рисунок 3.15) и автоматического создания соответствующей проектной и рабочей документации.

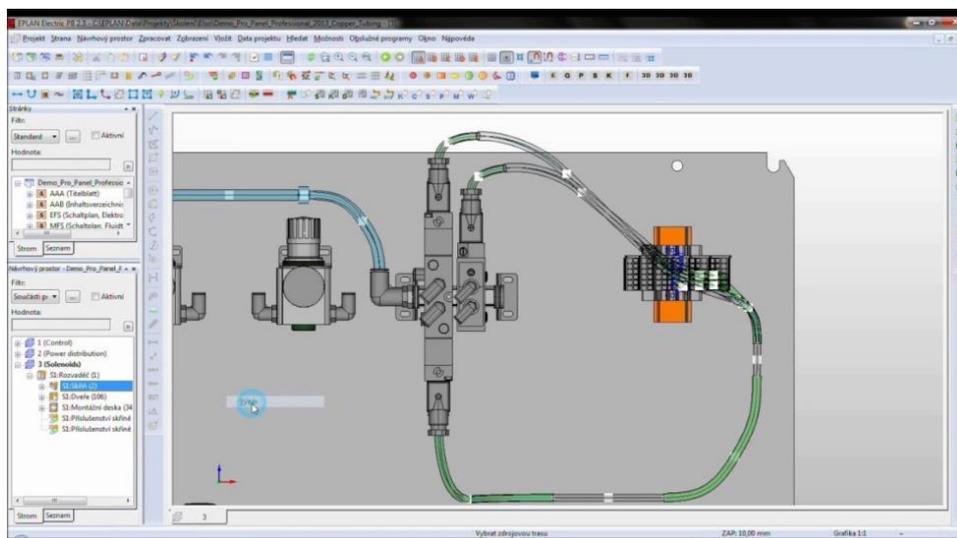


Рисунок 3.15 – Пример работы в EPLAN Fluid.

3. EPLAN ProPanel — 3D проектирование шкафов электроавтоматики, пример на рисунке 3.16, с возможностью передачи данных модели в производство.

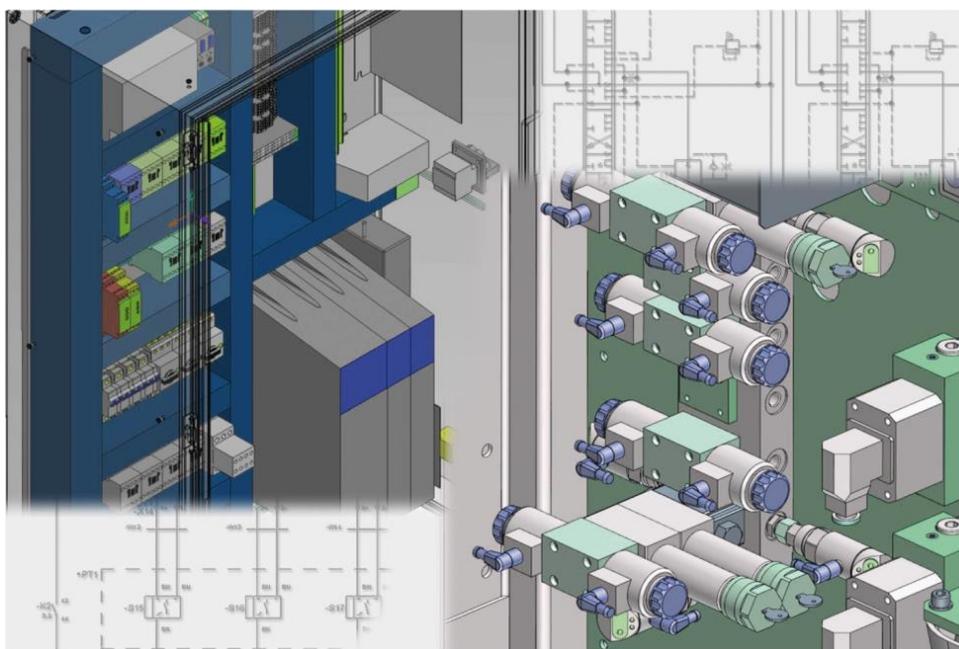


Рисунок 3.16 – Пример работы в EPLAN ProPanel.

### 3.4 Автоматизация алгоритма управления установкой

Стратегия контроля DCO состоит из двух субстратегий:

1. Стратегия «Ротации» компрессора.
2. Стратегия «Контроля» загрузки компрессора.

Стратегия ротации определяет, в каком порядке или в какой последовательности должна происходить каждая многократно повторяющаяся ротация компрессора. Ротацию приводит в действие таймер циклического интервала. Стратегия «Контроля» загрузки компрессора определяет, как компрессоры должны использоваться в ответ на изменения в системном давлении.

Каждому компрессору в системе, присоединенному к DCO, присваивается неизменный номер от 1 до 4 (в зависимости от модели DCO). Функцию, которую выполняет компрессор при любой установленной последовательности «Ротации», условно обозначают буквой от A до D, как на рисунке 3.17.

A = компрессор, который будет запущен первым.

B = резервный компрессор, который будет использован во вторую очередь.

C = второй резервный компрессор, который будет использован третьим.

D = третий резервный компрессор, который будет использован четвертым по порядку.

				
#1	A	B	C	D
#2	D	A	B	C
#3	C	D	A	B
#4	B	C	D	A

Рисунок 3.17 – Схема ротации компрессоров.

Главная функция ротации передачи нагрузки состоит в том, чтобы эффективно управлять системой сжатия воздуха, состоящей из компрессоров с фиксированной выходной мощностью. Текущие установки по ротации могут быть заменены на «Приоритетные» настройки для приспособления к компрессорам различного размера с различными выходными мощностями.

При изменяющихся требованиях в работе компрессоров используется стратегия 'FILO' (первым вошел, последним вышел).

Функциональный компрессор (А) используется первым, затем в работу вступает компрессор (В), если нагрузка превышает выходную мощность компрессора (А). По мере увеличения нагрузки включается компрессор (С), и, если нагрузка продолжает расти дальше, то начинает работать (D). По мере уменьшения нагрузки первым выключается компрессор (D), затем (С) и, если нагрузка продолжает снижаться, то выключается компрессор (В). Последним разгружается компрессор (А), если нагрузка значительно снижается. Таким образом, компрессор, обозначенный (А), первым нагружается и последним разгружается.

### 3.5 Разработка алгоритма реакции на аварийные ситуации

Внутри воздушного компрессора может быть смертельное напряжение. Изолируйте источник питания воздушного компрессора перед началом работы. В «mi-PCB» имеется двухконтактный вывод, представлен на рисунке 3.18, (контакты 7 и 8) для отслеживания состояния компрессора.

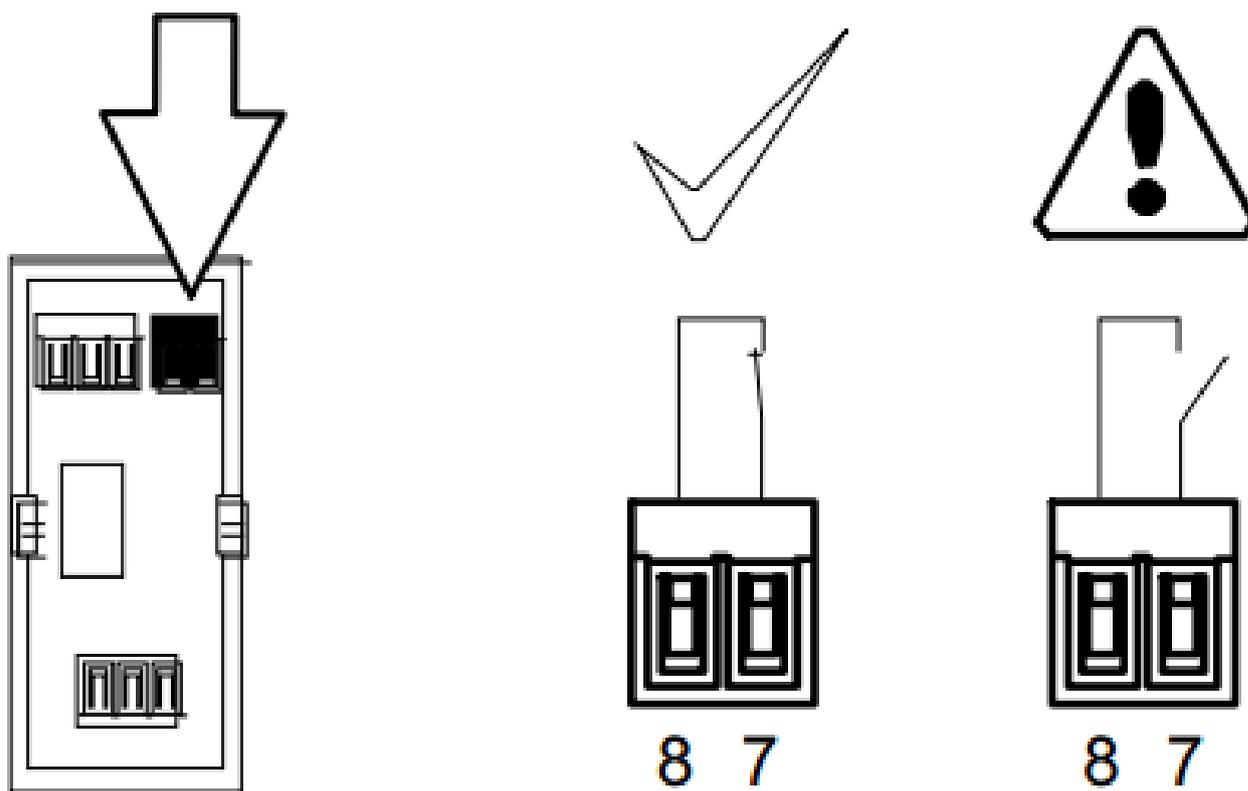


Рисунок 3.18 – Логика переключающего контакта.

Когда контакты 7 и 8 соединены (замкнутая цепь), Metacentre DCO выдаст сигнал о том, что со связанным с ним компрессором всё в порядке (ОК). Когда соединение разомкнуто (разомкнутая цепь), Metacentre DCO выдаст сигнал Тревога (Alarm), (эта функция зависит от избранной опции ввода) и отключит компрессор.

Для каждого компрессора устройство Metacentre DCO может обеспечить один из трёх вариантов мониторинга:

1. Нет мониторинга
2. Тревога

### 3. Тревога и Рабочее состояние

#### 4. 4.6.1 Вариант 'А' – Нет мониторинга

Metacentre DCO постоянно следит за входом «Тревога», рисунок 3.19, и обнаружит тревожное состояние вне зависимости от наличия команды «Загрузка» ('Load'). Контакты Тревога компрессора должны оставаться замкнутыми во всё то время, когда компрессор готов к работе и/или работает.

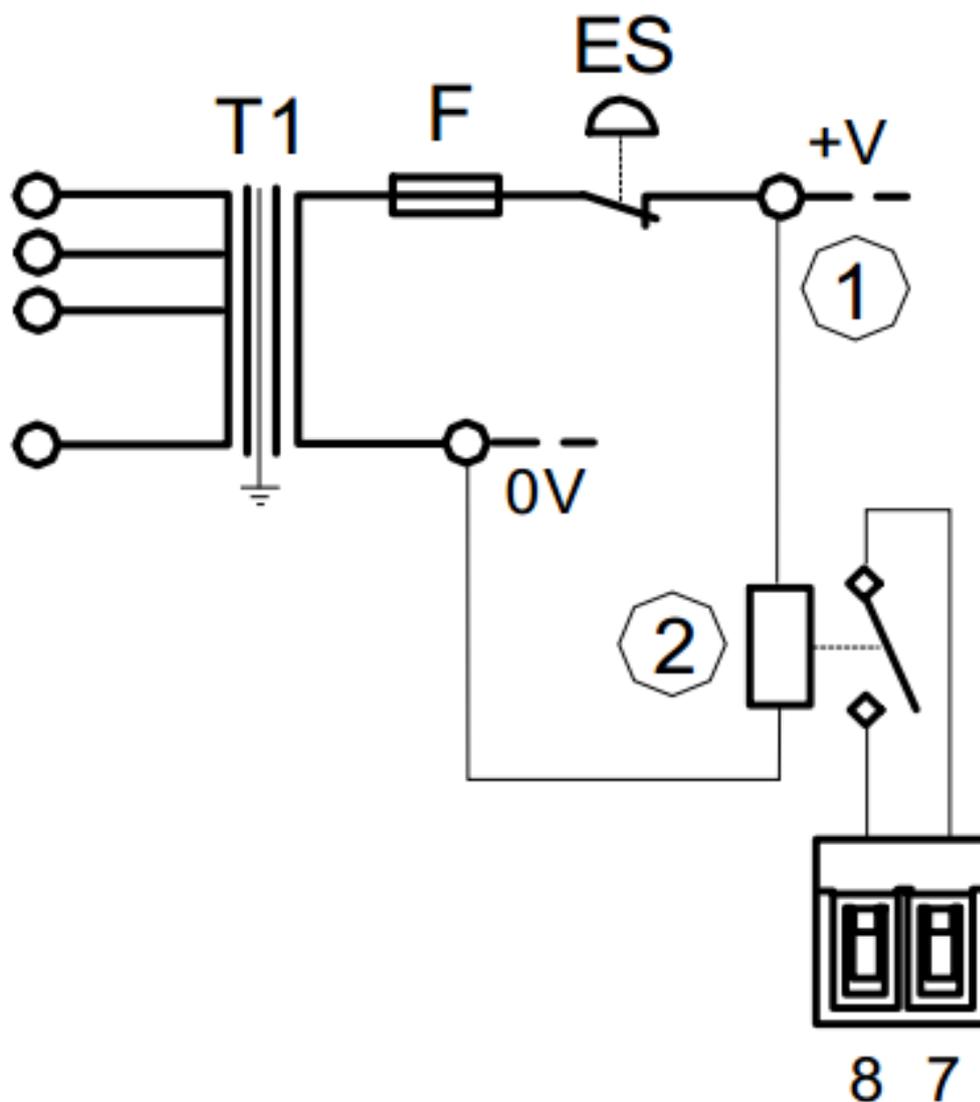


Рисунок 3.19 – Схема контроля состояния «Тревога».

Состояние Тревоги компрессора не будет обнаружено и обозначено, когда Metacentre DCO не подаёт на компрессор сигнал «Загрузка». Когда Metacentre DCO активирует сигнал «Загрузка» 'mi-PCB', у ввода сигнала

Тревоги имеется 30 секунд для замыкания цепи. Если ввод сигнала Тревоги не замыкает цепь в течение 30 секунд или размыкает цепь в любое время во время требования «Загрузки» после истечения 30 секунд, то Metacentre DCO обнаружит состояние Тревоги. Это состояние должно быть вручную сброшено на панели DCO. Эта функция соединяет способность обнаружить работающий компрессор с отслеживанием состояния Тревоги. Обычно нет необходимости выявлять переключающий контакт Тревоги вместе с переключающим контактом работы двигателя, так как компрессор не начнёт последовательность включения двигателя и не заработает, если существует состояние отключения по Тревоге.

Отказ компрессора от старта и работы в течение 30 секунд после команды «Загрузка» достаточен для предположения о том, что компрессор не доступен из-за ручной остановки или находится в состоянии отключения по Тревоге. В зависимости от компрессорной цепи и наличия переключающих контактов «без напряжения», в контрольной цепи могут быть установлены дополнительные реле (в комплекте отсутствуют, поставляются отдельно). Контакт реле «Рабочее состояние» должен оставаться замкнутым во всё то время, когда работает главный двигатель компрессора; Контакт Тревога компрессора должен оставаться замкнутым во всё то время, когда компрессор готов к работе и/или уже работает.

В случае какого-либо сбоя в работе, DCO выведет на экран уникальный код сбоя, список которых представлен на рисунке 3.20. Если произошло более одного сбоя, то будет выведен лишь самый последний из них.

- ES01**  Сбой датчика давления
- ES05**  Дополнительный вход 1 -  
Отключение
- ES06**  Дополнительный вход 1 –  
Отложенное отключение
- ES07**  Дополнительный вход 2 -  
Отключение
- ES08**  Дополнительный вход 2 –  
Отложенное отключение
- E0866**  Внутренний сбой подачи  
постоянного тока
- E0821**  Внешнее короткое замыкание:  
Аналоговый или цифровой вход
- ES02**  Произошёл перебой в питании
- ES03**  Тревожный сигнал высокого  
давления
- ES04**  Тревожный сигнал низкого  
давления
- ES09**  Дополнительный вход 1 -  
Тревога
- ES10**  Дополнительный вход 1 –  
Отложенная тревога
- ES11**  Дополнительный вход 2 – Тревога
- ES12**  Дополнительный вход 2 –  
Отложенная тревога
- C0# 01**  Тревожный сигнал о необходимости  
ремонта (только RS485)

Рисунок 3.20 – Тревожные сигналы.

### 3.6 Наладка и испытания компрессорной установки

Работоспособное состояние компрессора обеспечивается, прежде всего, его правильной наладкой и запуском в эксплуатацию. Наладка осуществляется не только на этапе производства компрессора, но и на этапе пробного запуска, во время обкатки и периодически проводя подналадку в течение всего срока службы компрессора. При наладке устраняют чрезмерный нагрев трущихся деталей и узлов, стуки и некоторые другие дефекты. На последнем этапе наладки происходит регулировка, для получения необходимой производительности. Если в системе происходит хотя бы одна из нижеперечисленных неисправностей, то необходимо незамедлительно остановить работу компрессора:

- 1) в системе смазки давление менее 1,2 кгс/см<sup>2</sup>;
- 2) неисправна или отключается система охлаждения;
- 3) смазка не поступает к любой из точек подшипника скольжения;
- 4) если в любой из ступеней сжатия чрезмерно повышается температура;
- 5) подшипники и другие трущиеся детали испытывают критический перегрев даже в случае увеличения давления в системе смазки;
- 6) в трубопроводах появляются посторонние звуки как следствие негерметичности соединений;
- 7) появляются сильные стуки и удары в механизме движения, появляется повышенная вибрация;
- 8) обмотки электродвигателя испытывают перегрев или неисправен вентилятор обдува в тыльной части двигателя;
- 9) неисправны датчики или чувствуется посторонний запах;

В случае возникновения аварийной ситуации необходимо быть готовым остановить любой из компрессоров ручными средствами, так как в период наладки некоторые элементы автоматической защиты могут не сработать или быть загроблены.

Для оперативного контроля за состоянием работы компрессора все сигнальные элементы выведены на пульт управления. Контроллер Metacentre

DCO, который осуществляет контроль за термодатчиками, также встроен в переднюю панель панели приборов.

Внешний вид панели управления оператора и панели Metacentre DCO представлены на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 – Панель управления компрессорной станцией.

До подачи питания на DCO необходимо убедиться, что соединения питания правильны и безопасны и что селектор рабочего напряжения правильно установлен для прилагаемого электрического напряжения; 115V переменного тока или 230V переменного тока (+-10%), 50/60 герц, 60 VA.

Необходимо включить питание на DCO. Идентификация контрольной программы будет некоторое время отображаться на дисплее пользователя, после чего сменится обычной операционной картиной.

Необходимо проверить отображаемое системное давление. Если давление неправильное или неточное, необходимо проверить тип и диапазон

датчика, уточнить параметры датчика в контроллере или ввести в эксплуатацию датчик давления и осуществить его калибровку.

До успешной установки базовых операций необходимо установить следующие пункты (в указанном порядке) для соответствия требованиям установки.

4.nC Количество компрессоров

4.PU Дисплей давления

3.C1/4 Тип ввода сигнала тревоги компрессоров

2.C1/4 Приоритет компрессоров #1-4

1.HA Тревожный сигнал о высоком давлении

1.PH Контрольная точка высокого давления

1. PL Контрольная точка низкого давления

1.LA Тревожный сигнал о низком давлении

1.SC Интервал ротации

1.PF Разрешение автоматического повторного запуска.

## Заключение о внедрении компрессорной установки

В качестве площадки для проведения испытаний была выбрана ООО "Тольяттинская бумажная фабрика". Технологическое оборудование фабрики наилучшим образом подходит для испытаний, т.к. весьма требовательно к подготовке воздуха.

Задачей испытания компрессорной установки является ее проверка на соответствие заданным параметрам, инспекция технического состояния, а также определение дальнейших путей повышения подачи, экономичности и безопасности работы, как компрессора, так и всего вспомогательного оборудования.

Пусковые испытания были разделены на два этапа. На первом этапе проводился пробный пуск. При этом проверялась работоспособность каждого узла в отдельности, а также взаимодействие всех узлов и систем компрессорной станции в режиме холостого хода, регулировались узлы подготовки, охлаждения, смазки. При таком режиме обеспечивается равномерная приработка трущихся частей и их нормальный нагрев. После нескольких пробных пусков установки различной длительности, компрессор выключается для контроля возможных неисправностей, течей, негерметичности и т.д.

Второй этап пусковых испытаний — сдаточные испытания.

По результатам испытаний в течение полугода, обслуживающим персоналом был составлен перечень замечаний по работе компрессорной установки. По всем выявленным замечаниям была проведена работа по устранению и улучшению эксплуатационных характеристик, что в конечном счете дополнительно повлияло на будущую долговечность и надежность работы компрессорной установки.

## Заключение

В ходе данной магистерской диссертационной работы были решены следующие задачи:

- 1) обоснован выбор компрессорного оборудования для обеспечения нужд бумагоделательной машины и массоподготовительного производства
- 2) разработана пневмосхема компрессорной системы
- 3) разработана электрическая схема компрессорной станции
- 4) создана автоматизированная система управления компрессорной подстанцией на базе серийно выпускаемых микроконтроллерных устройств.
- 5) проведены практические испытания станции
- 6) внедрен алгоритм обнаружения аварийных ситуаций в условиях производственного процесса на предприятии легкой промышленности ООО "Тольяттинская бумажная фабрика".

Спроектированное компрессорная станция успешно внедрена на территории ООО "Тольяттинская бумажная фабрика" для собственных нужд бумагоделательного производства. Она так же может быть широко применена в различных отраслях промышленности при необходимости в воздухе высокого давления.

### Список используемых источников

1. Анализ и синтез процессов в электромагнитных устройствах и электромеханических преобразователях энергии [Электронный ресурс]: практикум / ТГУ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника"; [сост. Н. А. Калинина, А. А. Северин]. - Тольятти: ТГУ, 2015. - 78 с.
2. Гольдберг, О.Д. Инженерное проектирование электрических машин. Учебник для вузов (для бакалавров и магистров) / О.Д. Гольдберг, Л. Н. Макаров, С. П. Хелемская. – М.: ООО ИД БАСТЕТ, 2016. – 528 с.
3. Электрические машины [Электронный ресурс] : Асинхронные и синхронные машины : практикум по дисциплинам "Электр. машины" и "Электромеханика" / Ю. П. Петунин [и др.] ; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Электроснабжение и электротехника". - Тольятти : ТГУ, 2015. - 100 с.
4. Общая электротехника : учеб. пособие при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.04 "Автоматизация технол. процессов и пр-в", 15.03.05 "Конструкторско-технол. обеспечение машиностр. пр-в", 15.03.06 "Механика и робототехника", 27.03.04 "Упр. в техн. системах" / Н. А. Кривоногов [и др.] ; под ред. Л. А. Потапова. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2016.
5. Ванурин, В.Н. Электрические машины : учеб. для бакалавров по направлению подготовки "Агроинженерия" / В. Н. Ванурин. - Гриф УМО. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. - 303 с.
6. Епифанов, А.П. Электрические машины : учеб. для студентов вузов, обуч. по специальности 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хоз-ва" / А. П. Епифанов. - Гриф УМО. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. - 261 с.
7. Белов, Н.В. Электротехника и основы электроники : учеб. пособие / Н. В. Белов, Ю. С. Волков. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. - 430 с.

8. Austin Hughes. Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications. Third edition / Austin Hughes Senior Fellow // School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds Copyright , 2006, 2010, 2014 Published by Elsevier Ltd. All rights reserved ISBN-13: 978-0-7506-4718-2
9. Правила устройства электроустановок. – М.: Деан, 2016. – 704с.
10. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок: Приказ Минтруда России от 24.07.2013 N 328н (ред. от 19.02.2016) (Зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2013 N 30593).
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: Приказ Министерства энергетики РФ от 13 января 2013 г. N 6 (Зарегистрировано в Минюсте России 22.01.2013 N 4145).
12. Полуянович, Н. К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий : учеб. пособие для студентов вузов / Н. К. Полуянович. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 395 с.
13. Петунин Ю.П., Демьяненко А.В., Энергоэффективность электроприводов компрессорных установок Сборник статей Международной научно – практической конференции “ Современные проблемы и тенденции развития экономики и управления”: Казань, 15 января 2018 г: - Уфа: Аэтерна, 2018. – 262 с.
14. Ромасюков В.В., Демьяненко А.В., Стенд диагностики электротехнического оборудования для промышленного предприятия. Сборник статей Международной научно – практической конференции “Современные условия взаимодействия науки и техники”: Челябинск, 29 марта 2018 г: - Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2018. - 227с.
15. Тимофеев, И.А. Основы электротехники, электроники и автоматики. Лабораторный практикум. / И.А. Тимофеев. – СПб.: Лань, 2016. – 196 с.

16. Черепяхин, А.А. Электротехническое и конструкционное материаловедение. / А.А. Черепяхин, Т.И. Балькова, А.А. Смолькин. – М.: Феникс, 2017. – 349 с.
17. Рачков, М.Ю. Технические средства автоматизации устройств. Учебник. / М.Ю. Рачков. – М.: Юрайт, 2017. – 180 с.
18. Лыкин, А.В. Электроэнергетические системы и сети. Учебник для ВУЗов. / А.В. Лыкин. – М.: Юрайт, 2017. – 360 с.
19. Карпов, К.А. Основные методы автоматизации производств нефтегазохимического комплекса. Учебное пособие. / К.А. Карпов. – СПб.: Лань, 2017. – 108 с.
20. Рузанов, П.А. Электронные устройства. Учебник и практикум. / П.А. Курбатов. – М.: Юрайт, 2017. – 250 с.
21. Калиниченко, А.В. Справочник инженера по КИПиА. / А.В. Калиниченко. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 564 с.
22. Беляков, Г.И. Электробезопасность. Учебное пособие для студентов академического бакалавриата. / Г.И. Беляков. – М.: Юрайт, 2017. – 125 с.
23. Бочкарев В.М. Особенности моделирования и расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT [Электронный ресурс]. – URL: <http://elcut.ru/articles/gandshou/> (дата обращения: 3.03.2017)
24. Копылов, И.П. Проектирование и испытание электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 767 с.
25. Гольдберг, О.Д. Проектирование и испытание электрических машин. / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 2013. – 430 с.
26. Мелешин, В. И. Управление тиристорными преобразователями электрической энергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников – Москва: «Техносфера», 2015. – 576 с

27. Кочубиевский Н. Д. Системы экспериментальных нагрузок для исследования и испытаний. – М.: Машиностроение, 2015.
28. Водовозов В.М. Курсовое проектирование электропривода: Учебное пособие. – СПб.: изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
29. ТАУ. / Под ред. А. А. Воронова. – Ч. 1, 2. – М.: Высшая школа, 2015. – 382 с.
30. Схиртладзе, А.Г. Надежность и диагностика технологических систем / А.Г. Схиртладзе, М.С. Уколов, А.В. Сквордцов. – Москва: Новое знание, 2008. – 518 с.
31. Минаев, П.А. Монтаж систем контроля и автоматики / П.А. Минаев. – Л.: Стройиздат, 1990. – 543 с.
32. ГОСТ 26656-85. Контролепригодность. Общие требования. – Введ. 1987-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
33. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. Введ. 1975-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1975.
34. EMC standards [Electronic resource] URL: <http://www.radio-electronics.com/info/circuits/emc-emi/tutorial-basics-summary.php> (date of the application 5.05.2017г.)
35. Stephen Umans. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery. / Stephen Umans. – 7th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2014.
36. Rania F. Ahmed. Testing Methods For Fault Detection In Electronic Circuits. / Rania F. Ahmed, Ahmed M. Soliman, Ahmed G. Radwan. - Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014.
37. Paul Scherz. Practical Electronics for Inventors. / Paul Scherz, Simon Monk. – Fourth Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2016.
38. Matthew Scarpino. Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines. / Matthew Scarpino. – 1st Edition - USA: Pearson Education, 2016.

39. Richard Ed., Dorf C. The Electrical Engineering Handbook. Boca Ration: CRC Press LLC, 2016.
40. Ch. V. V. Ramana. Capacitance measurement system using integrated instruments. / Ch. V. V. Ramana, M. Ashok Kumar. - Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015 – 304 p.
41. Charles Alexander. Fundamentals of Electric Circuits. / Charles Alexander, Matthew Sadiku. – 6th Edition - New York, N.Y.: McGraw-Hill Education, 2017.
42. Adaptive Control Optimization of Cutting Parameters for High Quality Machining Operations based on Neural Networks and Search Algorithms. – J. V. Abellan, F. Romero, H. R. Siller, A. Estruch and C. Vila, Department of Industrial Systems Engineering and Design, Castellon, 12071, Spain – 2017.