

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция системы электроснабжения воздухоочистных сооружений
химического предприятия.

Обучающийся

Д.А. Кирилин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Аннотация

В рамках выпускной квалификационной работы проделана последовательность мероприятий с целью модернизации электроснабжения воздухоочистных сооружений химического предприятия.

Рассмотрев имеющуюся информацию о существующих электрических приемниках и их количестве, был произведен анализ и расчет ожидаемых максимальных электрических нагрузок. Для замены существующего оборудования был подобран тип современных асинхронных электрических двигателей, определена нужная мощность для этих двигателей, и был произведен расчет общей мощности, потребляемой новыми двигателями.

На основании номинальных и расчетных токов выбраны соответствующие проводники, коммутационные устройства и разработана схема для вычисления токов короткого замыкания, а также схема замещения, которая является основой для определения максимальных значений трехфазного тока короткого замыкания и его мгновенных значений в различных точках внутренней электрической сети.

В подтверждение полученных значений токов короткого замыкания проведена проверка способности выбранных ранее коммутационных устройств обеспечивать устойчивое и долговечное функционирование системы.

В рамках выпускной квалификационной работы был также выполнен расчет системы защитного заземления для установки электродвигателей и частотного преобразователя.

Единый объем работы составляет 45 страниц пояснительной записки, включая 19 рисунков и 3 таблицы. Помимо этого, в работе представлены 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ оборудования и определение желательности реконструкции	6
1.1 Значимость реконструкции оборудования.....	6
1.2 Исследование мотивов замены электродвигателей.....	7
2 Выбор модели и рабочей мощности электродвигателей после реконструкции	15
2.1. Подбор электродвигателей с переменной частотой.....	15
2.2. Описание принципа частотного регулирования.....	19
2.3. Разработка схемы управления электродвигателями	21
3 Развитие электроснабжения здания после замены электродвигателей.....	24
3.1. Расчет токов короткого замыкания	24
3.2. Выбор главного распределительного щита.....	27
3.3. Выбор компонентов внутри главного распределительного щита	30
3.4. Определение параметров автоматического выключения	35
4 Уникальные аспекты установки и управления электродвигателями на объекте.....	37
Заключение	41
Список используемых источников.....	43

Введение

Модернизация системы электроснабжения воздухоочистного оборудования – значимая тема для химических предприятий, предназначение которых является не только повышение надежности и безопасности производственных процессов, но и достижение более высокой энергоэффективности. Вентиляционное оборудование играет важную роль в следовании строгих экологических норм и требований. Следовательно, обновление системы электроснабжения становится важным шагом в улучшении экологической ситуации и снижении негативного воздействия производства на окружающую среду.

Энергетические системы химических заводов имеют решающее значение для непрерывной работы и безопасного производства. Воздухоочистительные устройства, тоже, способствуют минимизации выбросов вредных веществ в воздух, что важно, как с точки зрения соблюдения экологических норм, так и в контексте обеспечения здоровья человека и сохранения биоразнообразия.

Реконструкция системы электроснабжения включает в себя современные технические решения, допускающие эффективно управлять потреблением электроэнергии, минимизировать риски аварий и перебоев в электроснабжении, а также повысить общую эффективность производственных процессов и снизить негативное воздействие химического производства на окружающую среду и создать более безопасную и экологически устойчивую промышленную среду.

Существующие системы электроснабжения воздухоочистных сооружений химического предприятия часто характеризуются недостаточной надежностью и устаревшим оборудованием, что может привести к отказам в работе сооружений, нарушению процессов очистки и, как следствие, к ухудшению экологической ситуации в окружающей среде.

В контексте данной проблемы, исследование предполагает анализ фактического состояния системы электроснабжения воздухоочистных сооружений, оценку ее недостатков, разработку и оценку различных вариантов реконструкции, учета сложных технических и энергетических параметров, а также экологических аспектов, связанных с работой химического предприятия.

Цель работы: выполнить реконструкцию системы электроснабжения воздухоочистного оборудования химического предприятия.

- провести анализ оборудования и определить необходимость реконструкции;
- выбрать тип и производительность электродвигателей после реконструкции;
- спроектировать систему электроснабжения устройства после замены электродвигателей;
- учитывать особенности установки и эксплуатации электродвигателей на объекте.

1 Анализ оборудования и определение желательности реконструкции

1.1 Значимость реконструкции оборудования

Значимость реконструкции промышленного оборудования, в том числе электродвигателей, на сегодняшний день неоспорима, поскольку многие ресурсы и техническое оборудование используются в больших объемах и предрасположены естественному износу. Процесс реконструкции позволяет не только сохранить работоспособность и увеличить срок эксплуатации данного оборудования, но и снизить затраты на его полную замену и тем самым сэкономить на ремонте [13].

Рассмотрим основные преимущества, оправдывающие реконструкцию электрооборудования рассматриваемого устройства:

- системы воздухоочистки отвечают за обеспечение безопасности и надежности воздухоочистного оборудования на химическом заводе. Они должны уметь обеспечивать безопасность персонала, предотвращать аварийные ситуации и минимизировать воздействие на окружающую среду;
- воздухоочистительное оборудование потребляет значительное количество энергии для работы вентиляторов, насосов и другого оборудования. Использование энергосберегающих технологий в системах питания воздухоочистительного оборудования позволяет существенно снизить энергопотребление и эксплуатационные затраты на химическом предприятии;
- производственные компании обязаны соблюдать строгие правила и стандарты загрязнения воздуха, чтобы сократить выбросы и соответствовать экологическим требованиям. Системы электропитания воздухоочистного оборудования должны обеспечивать надежную работу соответствующего воздухоочистного оборудования;

- системы питания воздухоочистного оборудования постоянно разрабатываются и совершенствуются. Внедрение новых технологий и инноваций позволяет повысить эффективность и надежность таких систем, а также снизить их воздействие на окружающую среду;
- современное общество уделяет все больше внимания экологической ответственности и требует соблюдения экологических норм и стандартов промышленными предприятиями. Разработка и использование современных систем электропитания воздухоочистного оборудования химических предприятий позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду и повысить уровень социальной ответственности компании [30].

В дополнение к вышесказанному, восстановленные двигатели могут быть более энергоэффективными и подходящими для более широкого спектра применений, повышая их производительность и экономичность. Поэтому реконструкция электродвигателей является важной частью ремонта оборудования и способствует повышению его эффективности и надежности.

1.2 Исследование мотивов замены электродвигателей

В современной промышленности актуальны проблемы реконструкции оборудования и замены электродвигателей. Ниже приведен список основных причин, по которым требуется замена электродвигателей:

- старые электродвигатели могут быть более энергоемкими, чем современные аналоги. Модернизация старых электродвигателей на современные приводит к снижению затрат на электроэнергию;
- современные электродвигатели имеют повышенную производительность и производительность, что повышает производительность оборудования и увеличивает объем производства;

Электродвигатели, использованные в устройстве, относятся к серии 5АИ и являются асинхронными электродвигателями. Асинхронные электродвигатели серии 5АИ являются общепромышленными асинхронными электрическими двигателями и имеют широкое распространение в качестве приводных механизмов в различных установках. Конструктивно асинхронные двигатели (АД) 5АИ являются трехфазными с короткозамкнутым ротором закрытого исполнения для работы в продолжительном режиме работы S1. Данные асинхронные электродвигатели являются взаимозаменяемыми со всеми основными сериями асинхронных двигателей А, АДМ, АИР, АИРМ, 5АМ, 4АМУ, 5АМУ, 4А, 4АМ, АД [1] – [5].

Режим работы S1 характеризуется продолжительной нагрузкой ($P_{S1} = P_{ном}$) в течении длительного времени (T) с потерями $P_V = const$. В режиме S1 электродвигатель прогревается до постоянной, рабочей, температуры (Θ_{max}).

На рисунке 2 показаны графики, характеризующие режим работы S1.

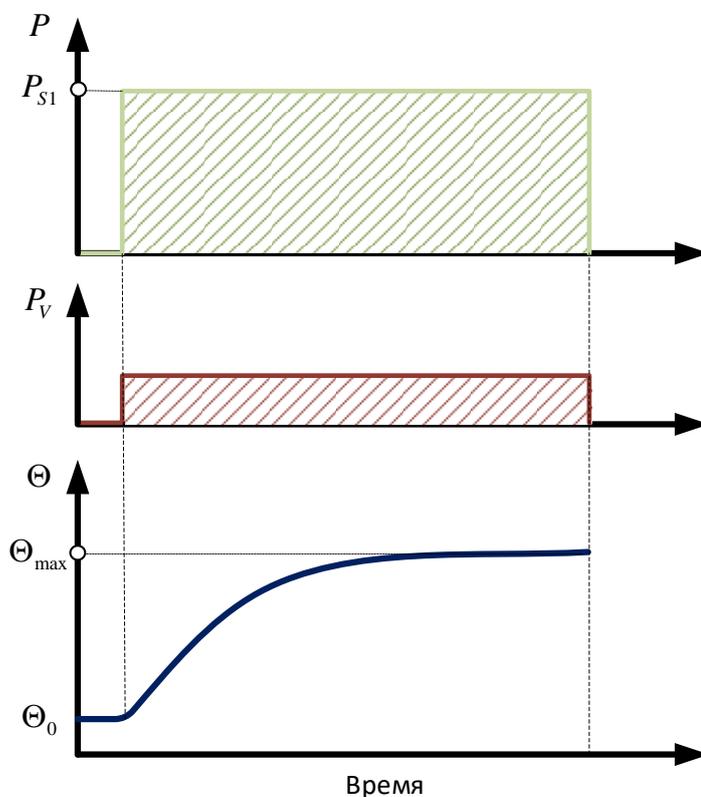


Рисунок 2 – Характеристика режима S1

Асинхронные электродвигатели на объекте функционируют с вентиляторной нагрузкой на валу, что способствует обеспечению постоянного притока и оттока воздуха.

Механическая характеристика $M_{\text{мех}}$ приводимого в движение асинхронным электродвигателем агрегата с вентиляторным типом нагрузки (рисунок 3) описывается формулой (1).

$$M_{\text{мех}} = M_{\text{Пмех}} + (K_3 - M_{\text{Пмех}}) \cdot \left(\frac{1 - S}{1 - S_{\text{H}}} \right)^p \quad (1)$$

где $M_{\text{Пмех}}$ – пусковой момент механизма – вентиляторной нагрузки асинхронного двигателя;

K_3 – коэффициент загрузки двигателя;

S – скольжение;

S_{H} – номинальное скольжение;

p – показатель степени характеризующий тип приводимого в движение механизма [12].

Для уравнения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показатель p может принимать три варианта фиксированного значения. Для вентиляторной нагрузки $p = 2$. Для данного режима характерно, что момент сопротивления пропорционален квадрату скорости. Пусковой момент вентиляторной нагрузки АД $M_{\text{п}} = [0,1; 0,3] \cdot M_{\text{H}}$ – этот факт облегчает процесс пуска синхронного электродвигателя [6].

На рисунке 3 показаны три различных механических характеристики. Характеристики 1 – это характеристики при номинальном значении питающего напряжения на зажимах АД, характеристика 2 – это характеристика при значении напряжения на зажимах АД равного $0,7U_{\text{ном}}$, а характеристика 3 – это механическая характеристики механизма который вращает АД, в данном случае показана механическая характеристика вентиляторной нагрузки.

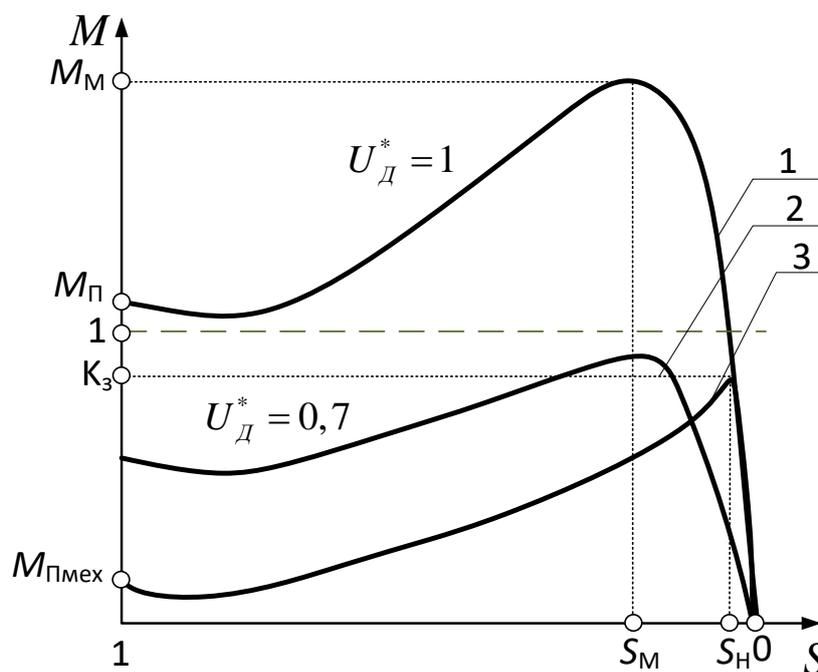


Рисунок 3 – Вид механической характеристики асинхронного электродвигателя при различных значениях питающего напряжения и механическая характеристика вентиляторной нагрузки

Рассматривая подробнее механические характеристики представленные на рисунке 3, можно сказать, что в начальный момент пуска, когда ротор асинхронного электродвигателя неподвижен и $S = 1$ на валу АД появляется момент $M_{П}$ называемый пусковым моментом. По мере увеличения скорости вращения АД, вращающий момент также увеличивается до значения максимального или критического момента M_M .

При этом по виду характеристик представленных на рисунке 3 можно определить рабочий режим АД, который соответствует значению K_3 , т.е. точке пересечения характеристики асинхронного двигателя с характеристикой приводного механизма.

Значение коэффициента в точке пересечения характеристик определяется по формуле (2).

$$K_3 = \frac{M_{\text{мех}}}{M_{\text{H}}} \quad (2)$$

где $M_{\text{мех}}$ – это тормозной момент АД или момент вращаемого механизма, имеющего вентиляторную характеристику;

M_{H} – номинальный вращающий момент асинхронного электродвигателя.

Таким образом, учитывая (1), а также то, что показатель $p = 2$ для вентиляторной нагрузки можно условно показать форму механической характеристики приводного механизма относительно характеристик асинхронного двигателя (рисунок 4).

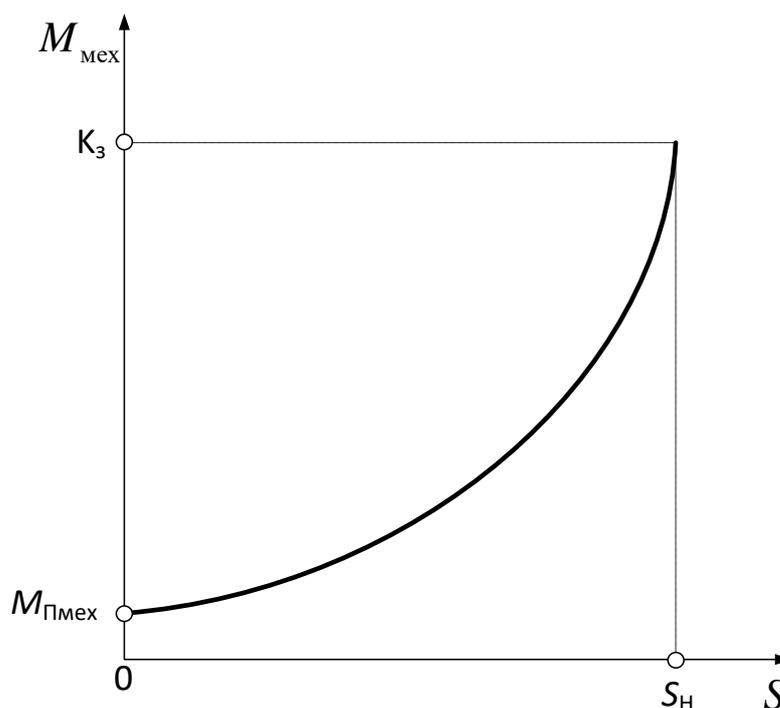


Рисунок 4 – Механическая характеристика приводного механизма с показателем степени $p = 2$

Как было сказано ранее, на объекте АД работает в режиме S1, что не допускает свободного регулирования скорости АД и позволяет использовать только систему регулирования подачи и оттока воздуха за счет

дросселирования. Дросселирование подразумевает использование задвижки, регулирующей поток или отток воздуха.

Для описания механизма дросселирования и определения того факта, что данный принцип регулирования не является эффективным и экономичным для предприятия рассмотрим характеристику, представленную на рисунке 5.

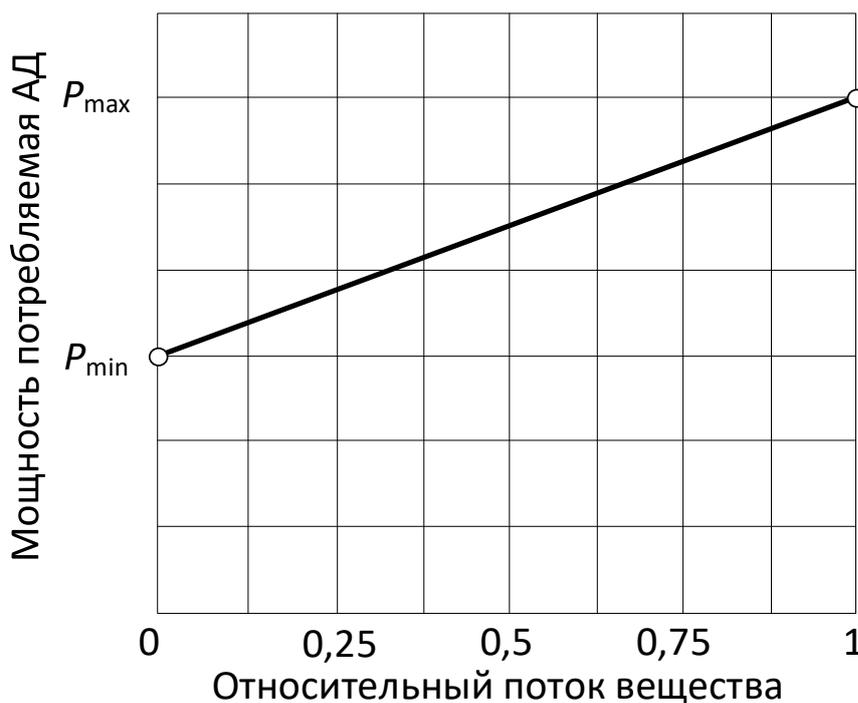


Рисунок 5 – Изменение мощности АД при использовании дросселирования

Для характеристики, представленной на рисунке 5 значение максимально потребляемой АД из сети мощности (P_{\min}) соответствует полностью закрытой заслонке, а значение максимально потребляемой мощности (P_{\max}) соответствует полностью открытой заслонке.

Такой способ управления является малоэффективным и энергозатратным, а использование АД в режиме частых пусков и остановок сказывается негативно на его ресурсе, то в рамках выполнения выпускной квалификационной работы предлагается использовать для замены на объекте реконструкции двигателя серии 5АИ, на двигатели серии АДЧЛ, имеющих возможность частотного регулирования [7].

В этом разделе значительное внимание было уделено вопросу реконструкции электродвигателей, что выявило его ключевое значение в сфере ремонта промышленного оборудования.

По результатам обследования оборудования выявлены основные факторы и причины, которые могут потребовать замены электродвигателей. Реконструкция электродвигателей – важное направление в техническом обслуживании и ремонте технической части оборудования. Электродвигатели являются неотъемлемой частью многих промышленных систем, и их производительность оказывает существенное влияние на эффективность производственных процессов.

В ходе проверки оборудования были выявлены различные причины, которые могут потребовать реконструкции или замены электродвигателей. Эти причины могут включать износ, устаревшее оборудование, несоблюдение текущих стандартов безопасности и эффективности, а также изменения в производственных потребностях, которые могут потребовать более крупных или более специализированных электродвигателей.

2 Выбор модели и рабочей мощности электродвигателей после реконструкции

2.1. Подбор электродвигателей с переменной частотой

Существует несколько типов электродвигателей, каждый из которых имеет свои особенности и применение в различных областях. Вот некоторые из наиболее распространенных типов электродвигателей:

- индукционные электродвигатели. Наиболее широко распространенными среди различных видов электродвигателей являются асинхронные двигатели, функционирование которых опирается на принцип индукции и охватывает широкий спектр областей применения. Преимуществами индукционных электродвигателей являются их сравнительно простое строение, надежность в работе и доступность по цене [26];
- синхронные двигатели. Синхронные двигатели используются, когда требуется постоянная скорость вращения и точное позиционирование. Они обладают высокой эффективностью и точностью управления, что делает их идеальными для применения в системах автоматического управления и прецизионных механизмах;
- шаговые (ступенчатые) двигатели. Шаговые двигатели являются особым типом двигателей, которые делают шаговое вращение. Они характеризуются высокой точностью позиционирования и простотой управления. Шаговые двигатели широко применяются в принтерах, робототехнике, автоматических системах и других приложениях, где точность и контроль положения являются важными [15];
- постоянного тока двигатели: Эти двигатели работают от постоянного тока и обладают высоким крутящим моментом при низких скоростях вращения. Они используются в таких областях, как промышленность, электротранспорт и энергетика [20];

- бесщеточные (синхронные) двигатели: Бесщеточные двигатели отличаются от традиционных двигателей тем, что они не имеют щеток и коммутаторов. Они обеспечивают высокую эффективность, длительный срок службы и низкий уровень шума. Бесщеточные двигатели широко применяются в автомобильной промышленности, промышленной автоматизации и других отраслях [34];
- линейные двигатели: Линейные двигатели предназначены для прямолинейного движения. Они обладают высокой точностью и скоростью перемещения и применяются в системах позиционирования и автоматического управления [24].

Выбор электродвигателя с частотным регулированием для насоса необходимо выбирать из следующего выражения [8] и рассчитывать по формуле (3).

$$P = \frac{k_{\text{зап}} \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_p \cdot k_{\text{пер}}} \quad (3)$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса, может принимать значения $k_{\text{зап}} \in [1,1; 1,4]$, в расчетах принимается $k_{\text{зап}} = 1,1$;

γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³, для холодной воды равен 9810;

Q – производительность насоса, м³/с;

H – напор насоса, м;

η_p – КПД передачи (при непосредственном соединении насоса с двигателем $\eta_n = 1$);

η_n – КПД насоса принимают равным: для поршневых насосов $\eta_n = 0,7 \dots 0,98$; для центробежных насосов с давлением свыше 39 кПа

$\eta_n = 0,6 \dots 0,75$; с давлением ниже 39 кПа $\eta_n = 0,3 \dots 0,6$. Наиболее эффективно определять КПД насоса по данным каталогов производителей оборудования;

$k_{\text{пер}}$ – коэффициент перевода производительности из м³/ч в м³/с,
принят равным $k_{\text{пер}} = 3600$.

По выражению (3) выполним расчет электрических двигателей для насосов Н215/1 и Н215/2.

Для насоса Н215/1 по выражению (3) получим:

$$P_{\text{Н215/1}} = \frac{k_{\text{зап}} \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_p \cdot k_{\text{пер}}} = \frac{1,1 \cdot 9810 \cdot 50 \cdot 30}{1000 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 3600} = 3,79 \text{ (кВт)}$$

Для насоса Н215/2 по выражению (3) получим:

$$P_{\text{Н215/2}} = \frac{k_{\text{зап}} \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_p \cdot k_{\text{пер}}} = \frac{1,1 \cdot 9810 \cdot 50 \cdot 30}{1000 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 3600} = 3,79 \text{ (кВт)}$$

По полученным значениям $P_{\text{Н215/1}} = P_{\text{Н215/2}} = 3,79$ (кВт) выберем двигатели типа АДЧР 100L2БО1У1, номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 5,5$ кВт, так как выполняется условие, которое представлено формулой (4).

$$P_{\text{Н215/1}} = P_{\text{Н215/2}} < P_{\text{ном}}$$

Вид выбранного электрического двигателя типа АДЧР 100L2БО1У1 показан на рисунке 6.

Технические характеристики выбранного электрического двигателя типа АДЧР 100L2БО1У1 приведены в таблице 1.

В зависимости от местных условий, выбранный электродвигатель необходимо подключить по одной из следующих схем (рисунок 7, рисунок 8).



Рисунок 6 – АДЧР 100L2BO1Y1 [16]

Таблица 1 – Технические характеристики электродвигателя АДЧР 100L2BO1Y1 [14]

Наименование параметра	Единица измерения параметра	Значение
Число фаз электродвигателя	-	1/3
Мощность двигателя	кВт	5,5
Обороты двигателя	об/мин	3000
Входное напряжение	В	220/380
Высота до центра вала	мм	100
Диаметр вала	мм	28
Диаметр внешний фланца В5	мм	250
Диаметр крепления фланца В5	мм	215
Степень защиты	-	IP55

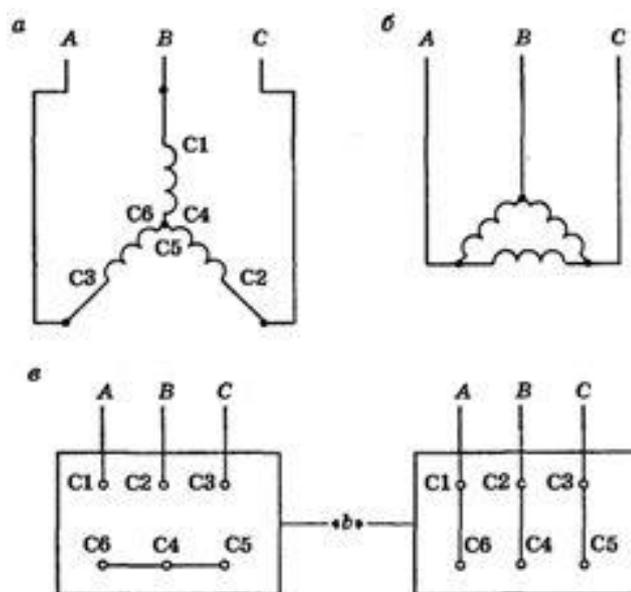


Рисунок 7 – Схемы соединения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя: а - в звезду, б - в треугольник, в - в звезду и треугольник на клеммном щитке электродвигателя [22]

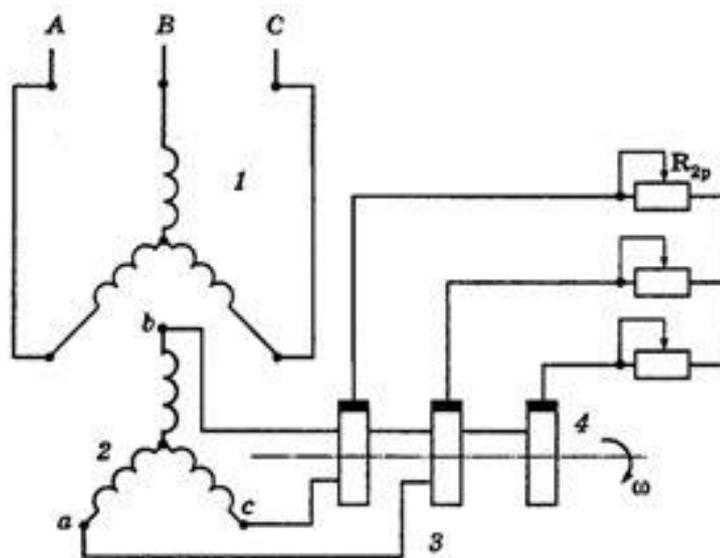


Рисунок 8 – Схема включения асинхронного электродвигателя с фазным ротором: 1 - обмотка статора, 2 - обмотка ротора, 3 - контактные кольца, 4 - щетки, R – резисторы [22]

2.2 Описание принципа частотного регулирования

Включение асинхронного электродвигателя в совокупность с частотным преобразователем представляет возможность субституции электрического привода на постоянном токе. Регулировочные системы скорости электродвигателей постоянного тока демонстрируют достаточно низкую степень комплексности, однако, уязвимым моментом такой силовой агрегации признается электродвигатель, который выделяется высокой ценой приобретения и несостоятельной надежностью в процессе долгосрочной эксплуатации [16].

В процессе функционирования наблюдается образование искр при контактировании щеток с коллектором, и под воздействием электро-эрозии происходит изнашивание поверхности последнего. Подобное обстоятельство исключает возможность использования указанного электродвигателя в условиях, характеризующихся высокой степенью пыли и наличием потенциальной взрывоопасности [9].

Асинхронные электродвигатели (далее - АД) превосходят электродвигатели постоянного тока по множеству технических параметров: их

конструкция является примитивной и демонстрирует высокую надежность ввиду отсутствия подвижных электрических контактов. Помимо этого, они обладают менее массивными размерами, невысокой массой и уступающей по стоимости компоновкой при одинаковой мощности. Надо также отметить, что изготовление и эксплуатация асинхронных электродвигателей оказываются мало сложными.

Следует уделить внимание основному изъяну асинхронных электродвигателей, который выражается в том, что их скорость представляет собой величину, регулировать которую с использованием стандартных методов (модификация напряжения питания, введение дополнительных сопротивлений в контур обмоток) является нетривиальной задачей.

Научными средствами известно, что управление частотой вращения исполнительных механизмов находит широкое применение с использованием разнообразных устройств, таких как механические вариаторы, гидравлические муфты, резисторы, введенные дополнительно в статор или ротор, а также электромеханические преобразователи частоты и статические преобразователи частоты [19].

Однако следует отметить, что первые четыре из перечисленных устройств не обеспечивают необходимого уровня качества при регулировании скорости, они неэффективны с экономической точки зрения и требуют значительных затрат как на этапе монтажа, так и в процессе эксплуатации.

Статические преобразователи частоты выделяются в настоящее время как наиболее совершенные средства управления асинхронными приводами, предоставляющие высокий уровень производительности и эффективности [25].

Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, можно в соответствии с выражением $\omega = \frac{2pI}{P}$ при неизменном числе пар полюсов^p изменять угловую скорость магнитного поля статора. Указанный метод обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, причем механические

характеристики системы обладают высокой жесткостью. Регулирование скорости не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя (АД), что приводит к минимизации потерь мощности в процессе регулирования [17].

Для достижения высоких энергетических показателей, таких как коэффициенты мощности, полезное действие и перегрузочная способность, требуется одновременное изменение как частоты, так и подводимого напряжения.

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки M_c . При постоянном моменте нагрузки $M_c = const$ напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте $\frac{u}{f} = const$. Для вентиляторного характера момента нагрузки это состояние имеет вид $\frac{U}{f} = const$, а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости $\frac{U}{\sqrt{f}} = const$ [21].

В целях достижения бесступенчатого и плавного регулирования частоты вращения вала асинхронного электродвигателя, преобразователь частоты должен обеспечивать совместное и одновременное управление как частотой, так и напряжением, подаваемым на статор асинхронного двигателя.

2.3 Разработка схемы управления электродвигателями

Для того, чтобы электродвигатели, выбранные в данной работе, могли обеспечивать работу насосных установок, необходимо разработать схему управления.

Схема управления электрическими двигателями Н215/1 и Н215/2 представлена на рисунке 9.

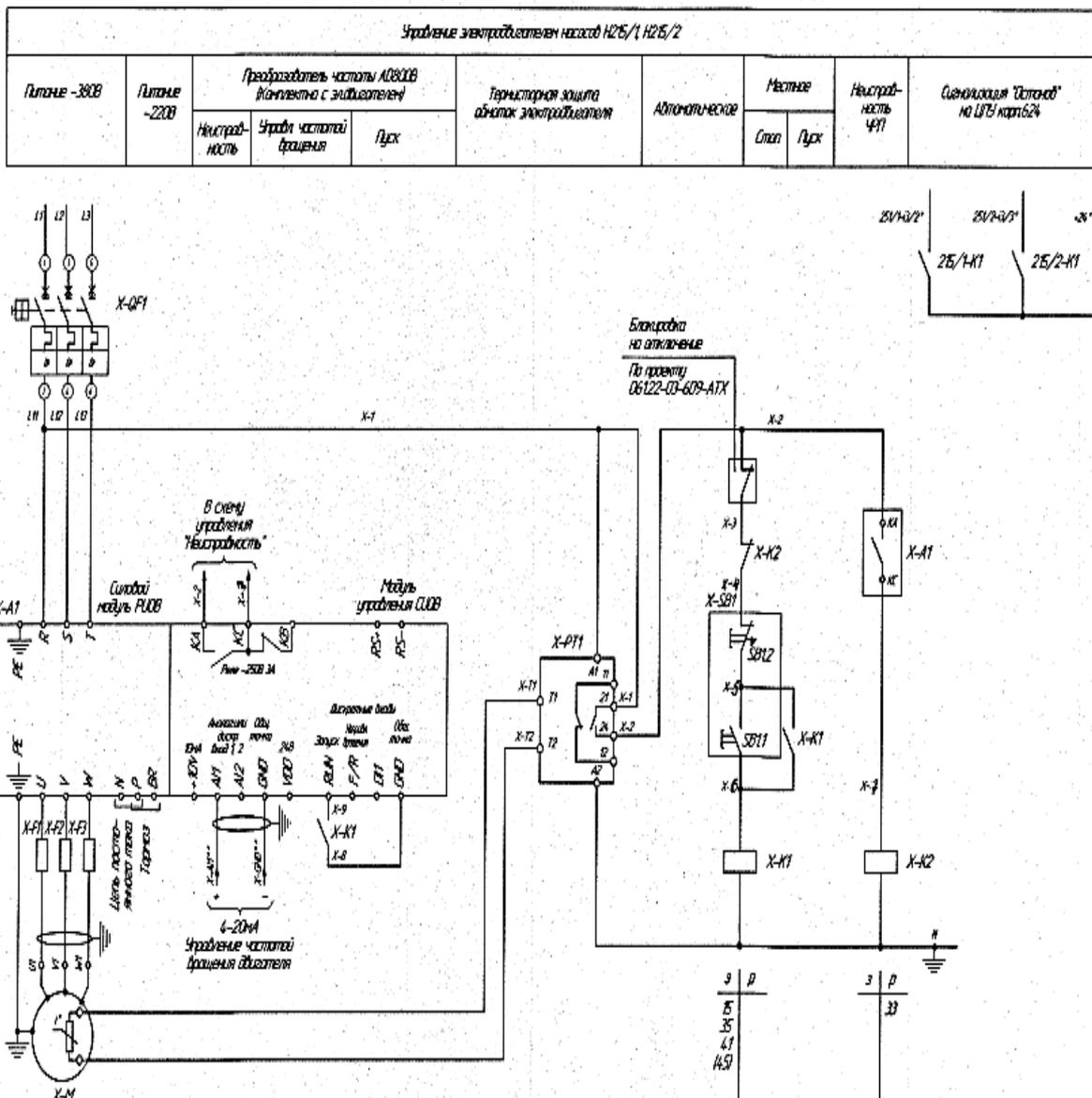


Рисунок 9 – Схема управления электрическим двигателем

Рассмотрим элементы разработанной схемы управления, представленной на рисунке 9:

- 215/1,2-QF1 – выключатель автоматический трехполюсный, типа ВА57-31-34-10-100-3165-380АС-УХЛ3-КЭА3;
- 215/1,2-A1 – преобразователь частоты АД800В-4Т505Н/7DSL-PUOVCUOB;
- 215/1,2-F1,2,3 – моторный дроссель ED3N-1,3/17 du/dt;
- 215/1,2-K1 – реле промежуточное РПУ-М2116 420У3;
- 215/1,2-K2 – реле промежуточное РПУ-М2116 020У3;

- 215/1,2-PT1 – реле термисторной защиты PT-M01-1-15;
- 215/1,2-SB1 – пост управления КУ-92-1 ExdII BT5;
- 215/1,2-M – электродвигатель АДЧР 100L2БО1У1.

В результате исследования в этом разделе рассмотрены различные типы электродвигателей, их применение в разных областях, а также и их способность выполнять работу с использованием математических формул. Также мы глубже углубимся в вопрос регулирования скорости сервоприводов, который имеет большое значение для точного управления производственными процессами.

Важным шагом стала разработка схемы управления, обеспечивающей основу для эффективного контроля и управления электродвигателями. Данная конструкция включает в себя методы регулирования скорости и мощности электродвигателей, что важно для обеспечения оптимальной производительности и удовлетворения требований конкретного производственного процесса.

3 Развитие электроснабжения здания после замены электродвигателей

3.1 Расчет токов короткого замыкания

Вычисление токов короткого замыкания представляет собой неотъемлемый этап в процессе подбора оборудования и проверки компонентов электроустановок, таких как шины, изоляторы, кабели и прочие элементы, на их способность сопротивляться электродинамическим и термическим воздействиям. Данный этап необходим для выбора параметров установок срабатывания систем защиты и дальнейшей проверки их чувствительности к возможным аварийным ситуациям. В целях упрощения математических расчетов в большинстве инженерных задач применяются допущения, что, как утверждается, не оказывает существенного влияния на точность и достоверность результатов [10].

Формула расчета тока короткого замыкания проста, она выходит из закона Ома для полной цепи и имеет следующий вид, формула (4).

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{транс.}} + z_{\text{л}}}, \quad (4)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, $U_{\phi} = 230$ (В);

$z_{\text{транс.}}$ – полное сопротивление обмоток распределительного трансформатора $z_{\text{транс.}} = 1,04$ (Ом);

$z_{\text{л}}$ – суммарное сопротивление линии от трансформатора до точки короткого замыкания (КЗ), Ом [23].

В свою очередь, полное сопротивление линии до точки КЗ определяется по формуле (5):

$$z_{\text{л}} = \sqrt{r_{\text{л}}^2 + x_{\text{л}}^2}, \quad (5)$$

где $r_{\text{л}}$ – активное сопротивление линии, Ом;

$x_{л}$ — индуктивное сопротивление линии, Ом [18].

Активное сопротивление линии определяется по формуле (6):

$$r_{л} = r_0 \cdot L, \quad (6)$$

где r_0 – удельное активное сопротивление проводника, Ом/км;

L – длина проводника, км [11].

Индуктивное сопротивление линии определяется по формуле (7):

$$x_{л} = x_0 \cdot L, \quad (7)$$

где x_0 – удельное индуктивное сопротивление проводника, Ом/км;

L – длина проводника, км [11].

Расчетный участок для определения токов короткого замыкания представлен на рисунке 10.

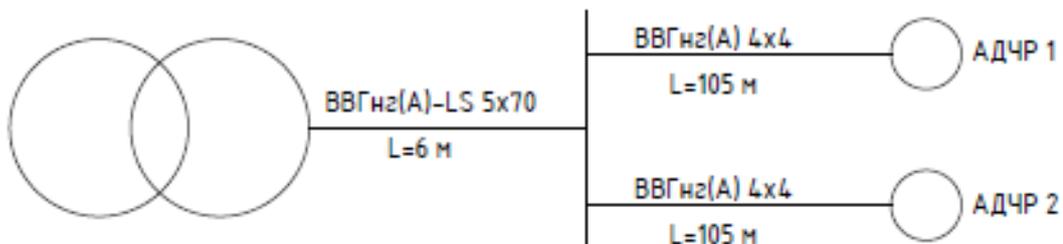


Рисунок 10 – Расчетный участок

Для расчетного участка, показанного на рисунке 10 составим схему замещения, показанную на рисунке 11.

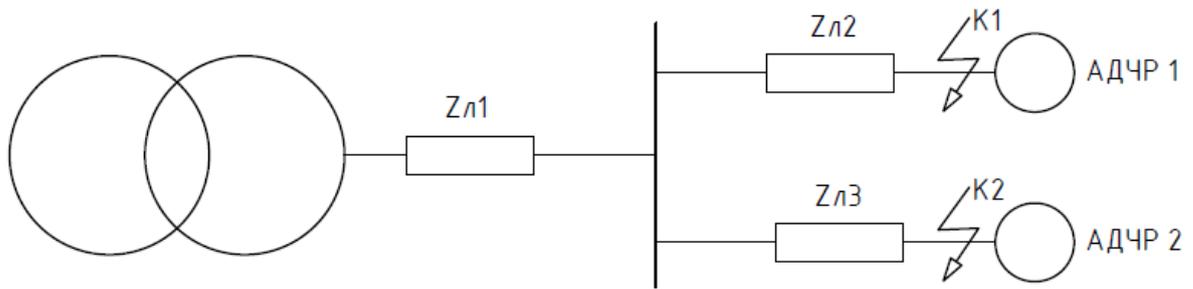


Рисунок 11 – Схема замещения расчетного участка
Выполним расчет элементов схемы замещения согласно выражениям (5)

– (7).

$$r_{л1} = r_0 \cdot L = 0,265 \cdot 0,006 = 0,00159 \text{ (Ом);}$$

$$x_{л1} = x_0 \cdot L = 0,0612 \cdot 0,006 = 0,0003672 \text{ (Ом);}$$

$$z_{л1} = \sqrt{r_{л1}^2 + x_{л1}^2} = \sqrt{0,00159^2 + 0,0003672^2} = 0,0016 \text{ (Ом);}$$

$$r_{л2} = r_0 \cdot L = 4,63 \cdot 0,15 = 0,6945 \text{ (Ом);}$$

$$x_{л2} = x_0 \cdot L = 0,095 \cdot 0,15 = 0,01425 \text{ (Ом);}$$

$$z_{л2} = \sqrt{r_{л2}^2 + x_{л2}^2} = \sqrt{0,6945^2 + 0,01425^2} = 0,6946 \text{ (Ом);}$$

$$r_{л3} = r_0 \cdot L = 4,63 \cdot 0,15 = 0,6945 \text{ (Ом);}$$

$$x_{л3} = x_0 \cdot L = 0,095 \cdot 0,15 = 0,01425 \text{ (Ом);}$$

$$z_{л3} = \sqrt{r_{л3}^2 + x_{л3}^2} = \sqrt{0,6945^2 + 0,01425^2} = 0,6946 \text{ (Ом)}$$

Полное сопротивление до точки К1 (рисунок 11):

$$z_{л.К1} = z_{л1} + z_{л2} = 0,0016 + 0,6946 = 0,6962 \text{ (Ом)}$$

Полное сопротивление до точки К2 (рисунок 11):

$$z_{л.К2} = z_{л1} + z_{л3} = 0,0016 + 0,6946 = 0,6962 \text{ (Ом)}$$

Переделим токи короткого замыкания в точках К1 и К2 по выражению (4):

$$I_{\text{кз.К1}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{транс.}} + z_{\text{л.К1}}} = \frac{230}{1,04 + 0,6962} = 132,47 \text{ (А)}$$
$$I_{\text{кз.К2}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{транс.}} + z_{\text{л.К2}}} = \frac{230}{1,04 + 0,6962} = 132,47 \text{ (А)}$$

Таким образом, при коротком замыкании в точках К1 и К2 сети с фазным напряжением 230 В, ток короткого замыкания составляет 132,47 А для обоих случаев. Для безопасности и надежности электрической сети необходимо предпринимать меры для предотвращения коротких замыканий и обеспечения быстрого отключения в случае их возникновения.

3.2 Выбор главного распределительного щита

Главный распределительный щит (ГРЩ) можно выбрать двух вариантов исполнения [11]:

- напольный;
- навесной.

Так же, выбор осуществляется исходя из места, где будет установлен ГРЩ.

Степень защиты по IP (Ingress Protection) главных распределительных щитов определяется согласно международному стандарту IEC 60529. Данный стандарт классифицирует и определяет степень защиты электрического оборудования от внешних факторов, таких как пыль, вода, касание и проникновение твердых предметов. IP-код состоит из двух цифр, которые обозначают степень защиты.

Первая цифра в IP-коде указывает на защиту от твердых предметов и пыли. Значение может быть от 0 до 6, где 0 означает отсутствие защиты, а 6 – полная защита от пыли.

Вторая цифра в IP-коде указывает на защиту от влаги. Значение может быть от 0 до 9, где 0 означает отсутствие защиты, а 9 - защита от воздействия воды при сильном напоре.

Например, IP54 означает, что главные распределительные щиты имеют защиту от пыли на уровне 5 (защита от пыли, которая может проникнуть, но не оказывает вредного воздействия) и защиту от влаги на уровне 4 (защита от брызг воды с любого направления) [31].

Степень защиты по IP может быть различной в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации. Для главных распределительных щитов, которые устанавливаются в помещении, обычно применяются IP20 или выше, чтобы обеспечить защиту от пыли и возможных касаний. В случае установки на открытом воздухе или во влажных условиях может потребоваться более высокая степень защиты, например, IP54 или выше [27].

Важно учитывать степень защиты при выборе и установке главных распределительных щитов, чтобы обеспечить безопасность и надежную работу электрического оборудования в соответствии с требованиями и условиями эксплуатации.

Необходимо, при выборе ГРЩ руководствоваться размерами размещаемого электрооборудования и его расположением.

В рамках данной работы выберем металлические корпуса ГРЩ 1600 А SMART IEK (рисунок 12).

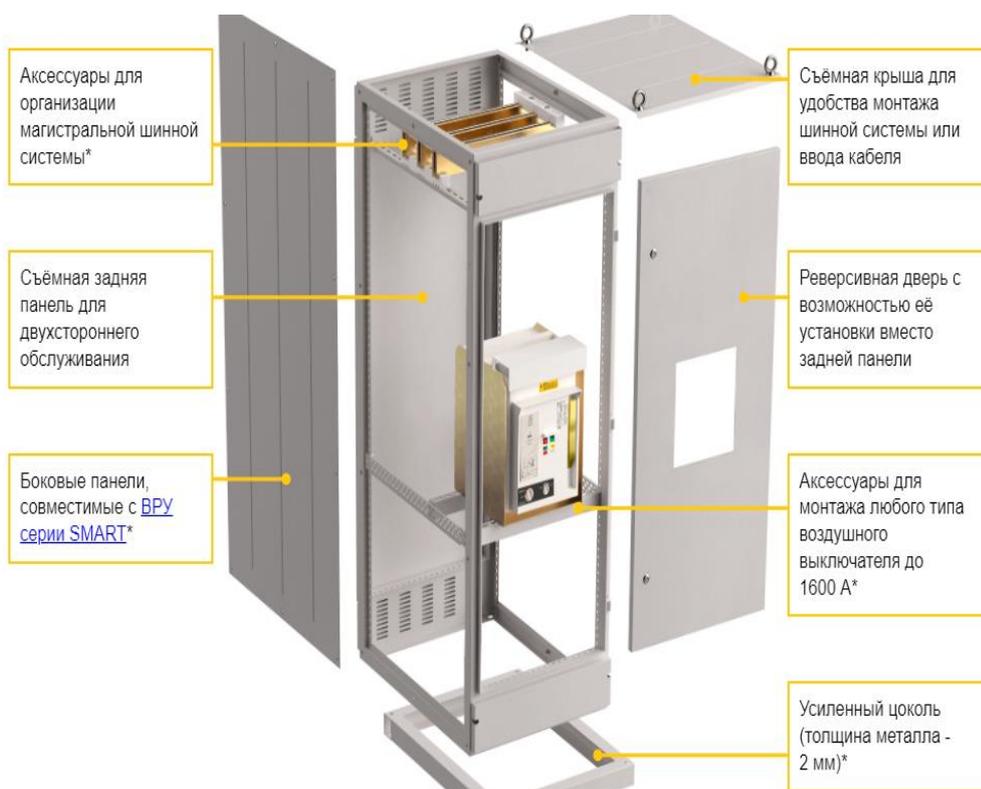


Рисунок 12 – ГРЩ 1600 А SMART IEK [24]

Металлические корпуса ГРЩ 1600 А SMART IEK представляют собой специальные герметичные конструкции, предназначенные для размещения электротехнических компонентов и обеспечения безопасности электрических схем и оборудования.

ГРЩ 1600 А SMART IEK обладают следующими характеристиками:

- металлические корпуса изготовлены из высококачественной стали, что обеспечивает прочность и долгий срок службы;
- корпуса обладают высокой степенью герметичности, что защищает внутренние компоненты от пыли, влаги и других агрессивных внешних воздействий;
- корпуса спроектированы с учетом защиты от механических воздействий, таких как удары и вибрации;

- внутренний объем корпусов предоставляет достаточно места для размещения электрооборудования, розеток, выключателей и других компонентов;
- корпуса оборудованы специальными элементами для удобства монтажа и обслуживания электрических устройств;
- ГРЩ 1600 А SMART IEK обеспечивают электрическую безопасность, предотвращая неправомерный доступ и защищая от возможных коротких замыканий.

В целом, металлические корпуса ГРЩ 1600 А SMART IEK представляют собой элемент для обеспечения надежной и безопасной работы электрических систем и оборудования.

3.3 Выбор компонентов внутри главного распределительного щита

Для того, чтобы выбрать оборудование ГРЩ, рассмотрим электрическую принципиальную схему (рисунок 13).

Частотный преобразователь (инвертор частоты) является устройством, которое позволяет регулировать скорость вращения электрического двигателя путем изменения частоты, подаваемого на него электрического тока [32].

Рассмотрим основные причины применения частотного преобразователя. Частотный преобразователь:

- позволяет регулировать скорость вращения электрического двигателя в широком диапазоне, что особенно полезно в приложениях, где требуется точное управление скоростью, таких как промышленные процессы или автоматизированные системы;
- позволяет оптимизировать энергопотребление электрического двигателя. Регулирование скорости вращения позволяет снизить потребление энергии, особенно при работе в условиях, когда полная мощность не требуется;

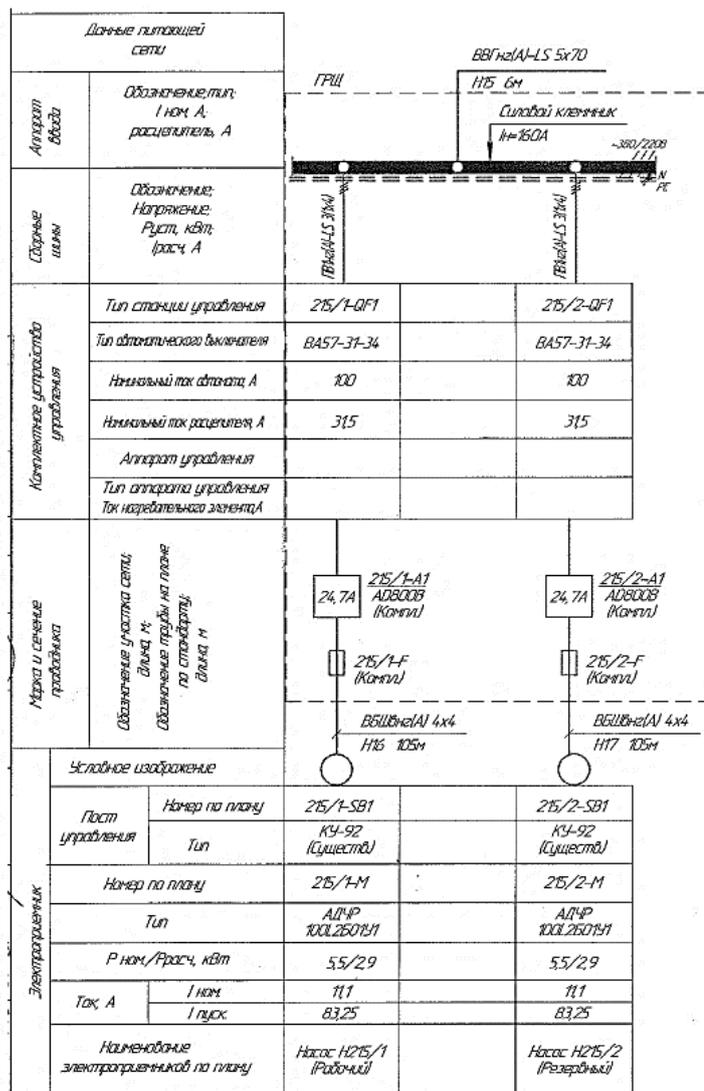


Рисунок 13 – Электрическая принципиальная схема ГРЩ

- обеспечивает плавный пуск и торможение электрического двигателя. Это позволяет снизить ударные нагрузки на систему и увеличить срок службы оборудования;
- позволяют отслеживать работу двигателя и обнаруживать возможные проблемы или неисправности за счет оснащения функциями защиты и диагностики, которые. Это помогает предотвратить поломки и своевременно проводить техническое обслуживание;
- может быть интегрирован с другими системами автоматизации и управления. Это позволяет обеспечить синхронизацию и

координацию работы двигателей с другими процессами и устройствами [33].

Выбор преобразователей частоты осуществляется по нескольким критериям.

Согласно [13] первым критерием выбора является выбор по величине активной мощности. Мощность преобразователя частоты ($P_{\text{прч}}$) определяется по формуле (8).

$$P_{\text{прч}} = \frac{U_{\text{эд}} \cdot I_{\text{эд}} \cdot \sqrt{3}}{1000} \quad (8)$$

где $U_{\text{эд}}$ – номинальное напряжение электродвигателя, кВ;

$I_{\text{эд}}$ – номинальный ток электродвигателя, А;

Согласно [13] вторым критерием выбора является выбор по напряжению преобразователя частоты ($U_{\text{прч}}$), формула (9).

$$U_{\text{прч}} = U_{\text{эд}} \quad (9)$$

где $U_{\text{эд}}$ – номинальное напряжение электродвигателя, кВ.

Согласно [13] третьим критерием выбора преобразователя частоты является выбор по току, формула (10).

$$I_{\text{прч}} = (1,05 \dots 1,1)I_{\text{эд}} \quad (10)$$

где $I_{\text{эд}}$ – номинальный ток электродвигателя, А.

Согласно [13] четвертым критерием выбора преобразователя частоты является выбор по методу управления. В преобразователях частоты применяются два метода управления – это векторный метод и скалярный метод.

Согласно представленным выражениями (8) – (10) выполним необходимые расчеты для выбора преобразователя частоты.

По формуле (8) получим:

$$P_{\text{прч}} = \frac{U_{\text{эд}} \cdot I_{\text{эд}} \cdot \sqrt{3}}{1000} = \frac{380 \cdot 14,47 \cdot \sqrt{3}}{1000} = 9,52 \text{ (кВт)}$$

По формуле (9) получим:

$$380 \text{ (В)} = 380 \text{ (В)}$$

По формуле (10) получим:

$$I_{\text{прч.}min} = 1,05I_{\text{эд}} = 1,05 \cdot 14,47 = 15,19 \text{ (А)}$$

$$I_{\text{прч.}max} = 1,1I_{\text{эд}} = 1,1 \cdot 14,47 = 15,92 \text{ (А)}$$

В результате выполненных расчетов выберем частотный преобразователь частоты типа AD800B-4T505H/7DSL-PUOBCUOB (рисунок 14).



Рисунок 14 – Частотный преобразователь типа AD800B-4T505H/7DSL-PUOBCUOB [13]

Технические характеристики выбранного частотного преобразователя AD800B-4T505H/7DSL-PUOBCUOB представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики частотного преобразователя AD800B-4T505H/7DSL-PUOBCUOB [13]

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	380
Номинальная мощность двигателя (тяжелый режим), кВт	5,5
Номинальная мощность двигателя (легкий режим), кВт	7,5
Наличие векторного режима	Да
Максимальная выходная частота, Гц	590
Номинальный выходной ток (тяжелый режим), А	13
Номинальный выходной ток (легкий режим), А	15,5
Максимальный ток двигателя (в течение 1 мин) в тяжелом режиме, А	19,5
Максимальный ток двигателя (в течение 1 мин) в легком режиме, А	18,6
Количество дискретных входов/выходов, шт.	3/1
Количество аналоговых входов, шт.	2
Количество аналоговых выходов, шт.	1
Типы аналоговых сигналов входа/выхода	10 В / 20 мА
Встроенный тормозной модуль	Да
Возможность подключения энкодера	Нет
Фильтр ЭМС	Да

В качестве моторного дросселя выберем ED3N-1,3/17 (рисунок 15).



Рисунок 15 – Моторный дроссель ED3N-1,3/17 [22]

Характеристики моторного дросселя ED3N-1,3/17 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики моторного дросселя ED3N-1,3/17 [22]

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	1,3
Индуктивность, мГн	4
Ток, А	3
Номинальное напряжение, В	3×380/400

3.4 Определение параметров автоматического выключения

Автоматическое выключение электродвигателя – это функция, которая обеспечивает безопасность и защиту оборудования. Ее цель заключается в том, чтобы остановить работу двигателя при определенных условиях, которые могут вызвать повреждения или проблемы. Включение автоматического выключения происходит автоматически по мере достижения этих условий [31].

Одно из основных условий, при котором происходит автоматическое выключение, это превышение тока. Когда ток, протекающий через двигатель, превышает предельное значение, функция автоматического выключения срабатывает и останавливает двигатель. Превышение тока может происходить из-за неисправности двигателя или перегрузки [14].

Еще одно условие, при котором происходит автоматическое выключение, это перегрузка. Если нагрузка на двигатель превышает заданный предел, то функция автоматического выключения активируется и отключает двигатель. Это помогает предотвратить повреждения, которые могут возникнуть при работе двигателя слишком высокой нагрузке.

Также, функция автоматического выключения защищает двигатель от короткого замыкания в схеме питания. Когда происходит короткое замыкание, двигатель автоматически отключается, чтобы предотвратить повреждения оборудования и риск возгорания.

Еще одно важное условие, при котором активируется автоматическое выключение, это обрыв фазы. Если одна из фаз схемы питания обрывается, то функция автоматического выключения гарантирует безопасность и отключает двигатель.

Функция автоматического выключения также предотвращает повреждения и проблемы, связанные с внутренними сбоями в контроллере или других устройствах. Если происходит внутренний сбой, то двигатель автоматически отключается.

Еще одна важная функция автоматического выключения – это предотвращение самовозбуждения двигателя. В определенных условиях, двигатель может начать самовозбуждаться при отключении или других обстоятельствах. Функция автоматического выключения предотвращает это самовозбуждение и предотвращает нежелательные последствия.

Наконец, функция автоматического выключения также защищает двигатель от низкого напряжения в схеме питания. Если напряжение падает ниже заданного уровня, то двигатель автоматически отключается, чтобы предотвратить поломки и повреждения оборудования [20].

Важно отметить, что параметры автоматического выключения могут быть настроены в соответствии с требованиями конкретной системы и при необходимости могут быть изменены. Автоматическое выключение электродвигателя является важной составляющей безопасности и защиты оборудования от возможных повреждений и нежелательных последствий.

В результате проведенной работы, был выполнен расчет токов короткого замыкания для системы электроснабжения двигателей воздухоочистных сооружений после реконструкции и замены асинхронных двигателей с установкой преобразователей частоты.

4 Уникальные аспекты установки и управления электродвигателями на объекте

Правильный порядок монтажа электродвигателя гарантирует безопасность, надежность и эффективность его работы [15].

Рассмотрим порядок для монтажа электродвигателей в системе электроснабжения воздухоочистных сооружений химического предприятия. Последовательность монтажа включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Подготовка места установки электродвигателей.

Этап 2. Проверка состояния электродвигателя. Данный этап включает в себя:

- проверку наличия повреждений электродвигателя, в том числе с применением испытательного оборудования;
- выявление очагов коррозии и других механических дефектов электродвигателя;
- визуальную проверку всех соединений, проводов и клемм. Все соединения должны находиться в хорошем состоянии.

Этап 3. Выбор крепежных элементов для монтажа электродвигателя на месте его установки согласно принятым проектным решениям.

Этап 4. Установка электродвигателя. Выполняется установка электродвигателя на предварительно подготовленное место. Также в рамках данного этапа необходимо убедиться, что электродвигатель устанавливается ровно и горизонтально. Также в рамках этапа монтажа выполняется крепление двигателя с помощью выбранных на третьем этапе крепежных элементов для обеспечения надежного закрепления.

Этап 5. Подключение электрических соединений электродвигателя согласно разработанным в проекте электрическим схемам.

Этап 6. Проверка и тестирование смонтированного электродвигателя. Выполняется проверка и тестирование электродвигателя, для того чтобы убедиться в правильности выполненных соединений проводов и клемм, а

также для контроля надежности закрепления всех контактных соединений. Запустить двигатель и проверить его работу, а также убедиться, что он включается и работает безотказно. При выявлении на данном этапе замечаний по работе электродвигателя необходимо провести дополнительные проверки, настройки и корректировки.

Этап 7. Заполнение документации с результатами монтажа электродвигателя, определенными на всех вышеуказанных этапах, а также определение периодичности обслуживания. Данный этап является важным в процессе монтажа и пуска электродвигателей, так как важно вести документацию о монтаже электродвигателя, включая инструкции по монтажу, электрические схемы и другую соответствующую информацию. Необходимо регулярно проводить обслуживание и осмотр электродвигателя для обеспечения его надежной, безопасной и безотказной работы [28].

Установка электродвигателя представлена на рисунке 16.

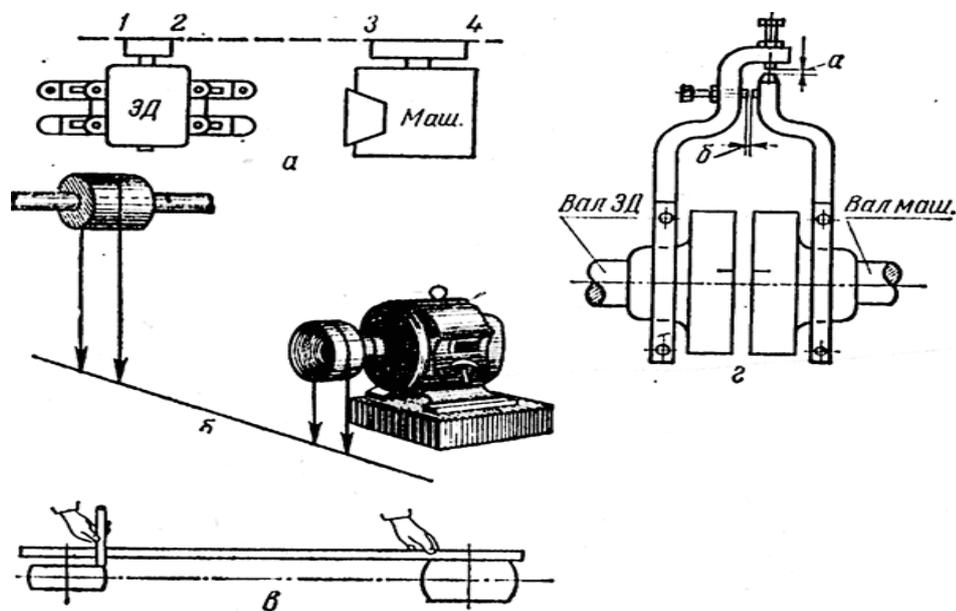


Рисунок 16 – Установка электродвигателя. Выверка правильности взаимного расположения шкивов электродвигателя и рабочей машины: а – при одинаковой ширине ведущего и ведомого шкивов; б – при равном уровне расположения шкивов; в – при разной ширине шкивов; г – выверка валов двигателя при соединении их муфтой при помощи центровочных скоб [29]

В данной работе монтаж электродвигателя и прокладка кабельных линий осуществляется согласно плана, представленного на рисунках 17 и 18.

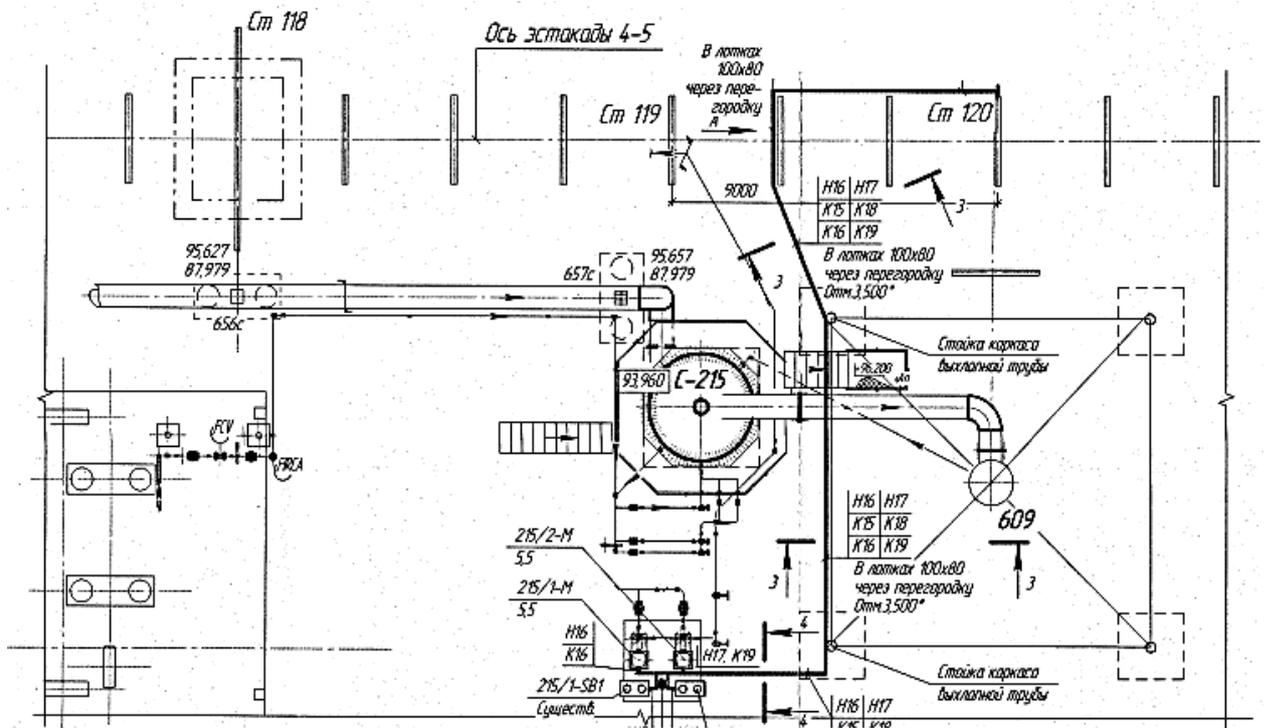


Рисунок 17 – План монтажа электродвигателя. Вид сверху [29]

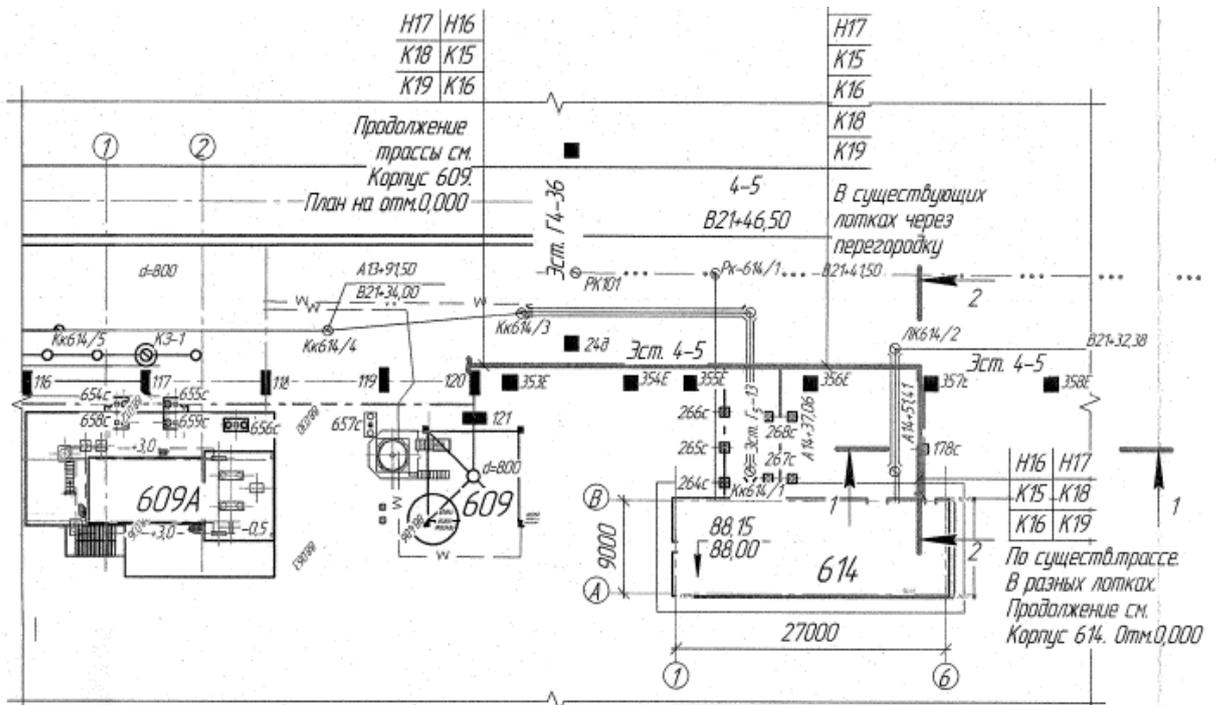


Рисунок 18 – План монтажа электродвигателя. Вид сбоку [29]

Монтаж кабеленесущих систем показан на рисунке 19.

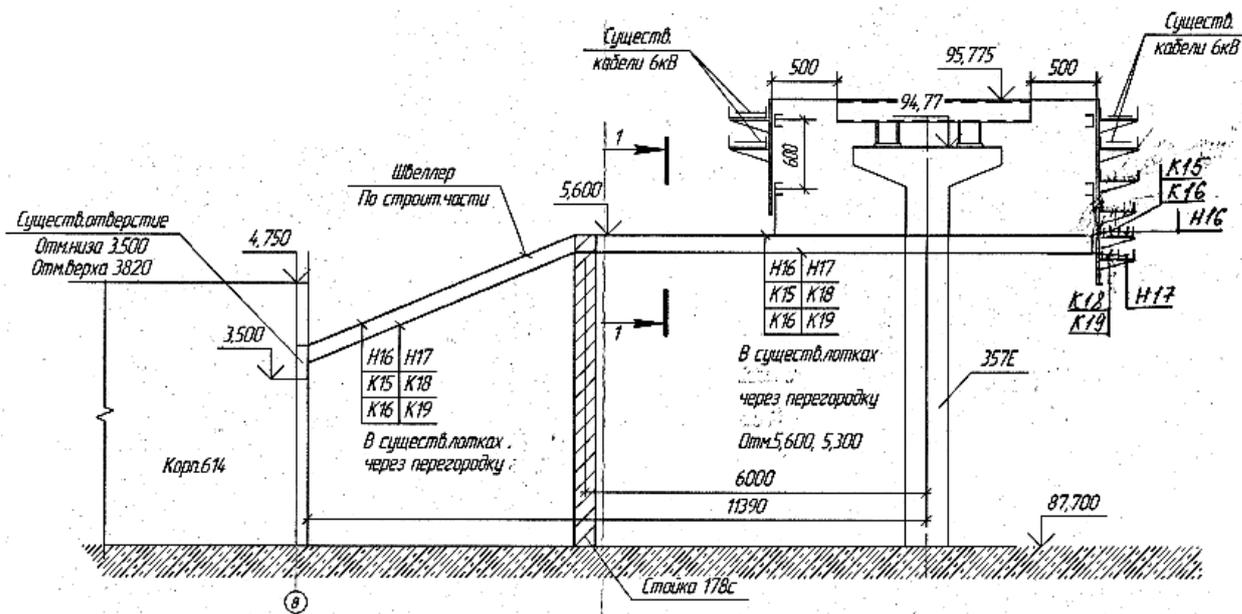


Рисунок 19 – Монтаж кабеленесущих систем [29]

В этом разделе описана последовательность монтажа электродвигателей в системе электропитания воздухоочистного оборудования химического завода. Данная процедура установки предназначена для обеспечения безопасности, надежности и эффективности электродвигателей.

Общий вывод из этого раздела заключается в том, что правильная установка электродвигателей важна для обеспечения безопасности и эффективности и включает в себя ряд ключевых шагов, от подготовки площадки до документирования результатов и технического обслуживания, которые имеют решающее значение для обеспечения надежной работы электродвигателей.

Заключение

В проделанной работе были решены следующие задачи:

Рассмотрена актуальность реконструкции оборудования. Было показано, что реконструкция любого промышленного оборудования, а также электродвигателей имеет большую актуальность в наши дни, так как различные ресурсы и оборудование используются в огромных количествах и довольно часто подвергается износу. Реконструкция позволит сохранить работоспособность и продлить срок службы данного оборудования, а также уменьшить затраты на его замену и соответственно ремонт.

Рассмотрены основные причины замены электродвигателей.

Был осуществлен выбор электрических двигателей с частотным регулированием. В качестве двигателей были выбраны АДЧР 100L2БО1У1.

Приведено описание принципа частотного регулирования.

Была спроектирована схема управления электрическими двигателями.

Далее, был осуществлен расчет токов короткого замыкания и осуществлен выбор главного распределительного щита.

После выбора ГРЩ был осуществлен выбор оборудования, устанавливаемого в ГРЩ.

В заключительной части работы были рассмотрены особенности монтажа и эксплуатации электродвигателей на объекте.

Поэтому в ходе исследования был проведен анализ существующей системы электропитания воздухоочистного оборудования на химическом заводе. В результате анализа выявлен ряд проблем, связанных с недостаточной надежностью, низким уровнем безопасности и значительными транзакционными издержками. Эти проблемы привели к авариям, остановке производства и неблагоприятному воздействию на окружающую среду.

На основе анализа были даны рекомендации и разработан проект реконструкции системы электроснабжения. В данном проекте учтены современные стандарты и требования, связанные с повышением надежности,

безопасности и энергоэффективности. Проект включает мероприятия по замене старого оборудования, повышению энергоэффективности и внедрению современных систем управления.

Реализация проекта реконструкции системы электропитания воздухоочистного оборудования химического завода приведет к следующим важным результатам:

- повышение надежности и безопасности системы. Замена устаревшего оборудования современными технологиями позволит существенно повысить стабильность работы системы, снизить риск возникновения аварийных ситуаций и гарантировать безопасность персонала и окружающей среды;
- сокращение эксплуатационных расходов. Повышение энергоэффективности системы позволит снизить затраты на электроэнергию и обслуживание, что приведет к существенному экономическому эффекту для предприятия;
- улучшение экологической ситуации. Благодаря реконструкции системы электропитания воздухоочистного оборудования существенно снизится негативное воздействие на окружающую среду, как следствие, снизятся выбросы вредных веществ и оптимизируется энергопотребление.

Реконструкция системы электроснабжения воздухоочистного оборудования химического завода является закономерным и эффективным шагом для повышения надежности, безопасности и энергоэффективности работы предприятия. Реализация предложенных рекомендаций и проекта принесет существенные улучшения в функционировании системы электроснабжения и принесет компании как экономические, так и экологические выгоды.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 50571.1-2013. Электрические установки. Исполнение, монтаж, эксплуатация и реконструкция электроустановок. Общие положения.
2. ГОСТ Р 50450-92. Системы электроснабжения. Требования к надежности.
3. ГОСТ 12.1.033-2014. Системы электроснабжения оборудования.
4. Андреев В.В. Электродвигатели: выбор, эксплуатация, контроль. Москва: Энергоатомиздат, 2008.
5. Барышников В.М., Колесников А.Н. Выбор и эксплуатация электрооборудования. Москва: Энергоатомиздат, 2012.
6. Барышников В.М., Колесников, А.Н. Электрооборудование: выбор, установка, эксплуатация. Москва: Энергоатомиздат, 2014.
7. Блинов Е.А., Дубровин С.И., Зырянов В.А. и др. Автоматическая система регулирования мощности электрической промышленной установки. М.: Энергоатомиздат, 2015.
8. Бобров Л.А., Зозуля В.А., Иванов В.Е. и др. Электропривод. М.: Изд-во «Наука и техника», 2017.
9. Борисевич А.В. Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями. Обзор состояния и новые результаты / А.В. Борисевич. М.: ИНФРА-М, 2015. 104 с.
10. Быков А.В., Дроздов В.В. Промышленная электроника. СПб.: Питер, 2018.
11. Гайдаржи И.А., Михайлов В.А. Электродвигатели: выбор, эксплуатация, ремонт. Москва: Издательский дом «ЛИБРОКОМ», 2010.
12. Горбачев В.Е. Основы электротехники и электрооборудования. М.: КолосС, 2016.
13. Горелик В.И. Электрооборудование: выбор, эксплуатация, ремонт. Москва: Издательство Юрайт, 2015.

14. Жгулёв А.С. Электродвигатели: выбор, эксплуатация, обслуживание. Москва: Академия, 2016.
15. Заливин В.В., Войнушин А.С. Электротехнические системы и сети. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2019.
16. Исмаилов Ш.Ю. Автоматические системы и приборы с шаговыми двигателями / Ш.Ю. Исмаилов. М.: Энергия, 2007. 136 с.
17. Князев В.Г., Копылов И.М., Серебренников В.Г. и др. Реконструкция электроустановок на промышленных предприятиях и в жилых помещениях. М.: Изд-во «Техносфера», 2020.
18. Лабунич В.И., Лушин В.В. Электрические системы и сети. М.: Изд-во Гос. ун-та «Высшая школа экономики», 2017.
19. Ландау П.С. Электродвигатели: устройство, эксплуатация, ремонт. Москва: Техносфера, 2011.
20. Лихачев В.Л. Электродвигатели асинхронные / В.Л. Лихачев. М.: Солон, 2003. 304 с.
21. Попов Н.А., Карасев В.В. Выбор и эксплуатация электродвигателей. Москва: Энергия, 2009.
22. Рыбкина М.А. Автоматика и системы управления электротехническими объектами. М.: Изд-во ГУАП, 2016.
23. Серебренников В.Г., Камышанский С.В. Электроэнергетические системы и сети. М.: Изд-во «Техносфера», 2018.
24. Стрелков В.А. Электрооборудование: выбор, эксплуатация, обслуживание. Москва: Издательство Юрайт, 2017.
25. Типовая инструкция по эксплуатации электродвигателей в установках собственных нужд электростанций. СО 34.45.509-2005.М.: Энергия, 2014. 841с.
26. Топорков В.В. Практический выбор и эксплуатация электрооборудования. Москва: Техносфера, 2013.
27. Фаихова О.В. Реконструкция электрических сетей промышленных предприятий. СПб.: Питер, 2017.

28. Хлебникова Е.В., Кравцов В.В. Электронные устройства обработки информации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
29. Шевелева В.Г., Шувалов Н.Т., Слинченко Н.В. и др. Реконструкция систем электроснабжения на промышленных предприятиях. М.: Изд-во «Техносфера», 2015.
30. Brown A. Powering the Future: The Problems and Possibilities of Green Energy. In Sourcebook on Contemporary Controversies. New York: International Debate Education Association. 2010.
31. Fanchi, J., Fanchi, C. Energy in the 21st Century. Hackensack, N.J.: World Scientific. 2011.
32. Mercier A., DuBois, E. Energy Recovery. New York: Nova Science Publishers. 2009.
33. Wilson, J., Burgh, G. Energizing Our Future: Rational Choices for the 21st Century. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience. 2008.
34. Witte J., Goldthau A., Global Energy Governance: The New Rules of the Game. Berlin, Germany: Global Public Policy Institute. 2010.