

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 «Модернизация электрооборудования электроцентробежного насоса для артезианской скважины энергоцеха предприятия теплоэнергооборудования г. Челябинска»

Студент

Д.В. Рычихин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., О.В. Самолина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## АННОТАЦИЯ

В представленной выпускной квалификационной работе разработано оборудование установки электроцентробежного насоса, применяемого на артезианских скважинах для добычи воды.

В пояснительной записке приводятся сведения о технологии добычи питьевых вод из артезианских, было проведено сравнение российских и зарубежных технологий и рассмотрены требования к оборудованию УЭЦН. На основе этих требований произведен выбор погружного электродвигателя, электроцентробежного насоса, расчет кабельной линии, трансформатора и частотного преобразователя, а также приведен экономический расчет.

В экономическом разделе рассчитаны затраты и показатели экономической эффективности по замене насосов на 2 скважины, которые подтверждают эффективность капиталовложений.

Разработанные технические решения позволяют обеспечить надежность спроектированного электрооборудования.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Физико-географические условия участка.....	6
2 Общие сведения о предприятии теплоэнергооборудования .....	7
3 Краткая характеристика исследуемого оборудования.....	11
3.1 Погружные центробежные насосы .....	12
3.2 Погружные электродвигатели .....	14
3.3 Гидрозащита погружных электродвигателей .....	15
3.4 Трансформаторы установки электроцентробежного насоса.....	17
3.5 Устройства станций управления и защиты для автоматизации погружных электроцентробежных насосов .....	19
3.6 Кабельные линии установки электроцентробежного насоса .....	22
4 перспективы развития оборудования артезианских скважин .....	24
4.1 Структура электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса .....	27
4.2 Энергосбережение в установке электроцентробежного насоса.....	31
5 Методика инженерного расчёта параметров установки электроцентробежного насоса для артезианской скважины .....	37
6 Расчеты исследования .....	47
6.1 Расчёт кабельной линии .....	47
6.2 Выбор трансформатора и расчёт потерь напряжения .....	49
6.3 Расчёт автономного инвертора напряжения пч для погружного асинхронного .....	53
6.4 Расчёт выпрямителя.....	58
6.5 Расчёт фильтра выпрямителя.....	60
6.6 Расчёт снаббера .....	63
6.7 Выходной фильтр для пч.....	66
6.8 Экономический расчёт .....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	76

## ВВЕДЕНИЕ

Предприятие теплоэнергооборудования расположено в г. Челябинске с собственным водозаборным участком на своей территории.

В соответствии с данными обследованиями общая потребность в воде с учетом перспективного развития Цеха-1 составляет 144 м<sup>3</sup>/сут или 19,44 л/с при работе насоса 20 часов.

В настоящее время водоснабжение промплощадки Цеха-1 предприятия осуществляется за счет водопровода г. Челябинска и, частично, за счет отбора подземных вод разведочно-эксплуатационными скважинами № 1 и 2 (рабочая и резервная). Водоотбор из скважин составляет 600 м<sup>3</sup>/сут. В городском водопроводе бывают перебои в водоснабжении. Требуется резервный автономный источник водоснабжения за счет подземных вод. В дальнейшем для бесперебойного водоснабжения Цеха-1 предприятия были построены 2 разведочно-эксплуатационные скважины с дебитом 20 м<sup>3</sup>/сут или 5,6 л/с у каждой скважины.

В настоящее время возможность выработки поставки воды в заданном режиме пользования скважиной составляет 20 м<sup>3</sup>/сут. В связи с тем, что производительность насоса составляет 32 м<sup>3</sup>/сут, что превышает возможности скважины по перекачке воды, оборудование работает «всухую», соответственно, затягивая воздух, система будет работать неудовлетворительно.

Соответственно, во избежание ситуации с поломкой УЭЦН, возникает необходимость установки насоса с меньшей производительностью, чем дебит скважины.

Таким образом, для оптимальных условий водозабора из скважины требуется проведение модернизации электрооборудования, включающей в себя технический расчет показателей для установки электроцентробежного насоса и расчет эффективности добычи питьевой воды собственного производства.

Исходя из технико-экономических возможностей заказчика площадь участка заложения скважин ограничивается территорией радиусом 0,6 км от предприятия, с учетом возможности создания трех поясов зоны санитарной охраны.

Цель: повышение эффективности добычи питьевой воды собственного производства.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- а) выполнение расчета электромеханических характеристик электродвигателя и насоса;
- б) решение вопроса энергосбережения;
- в) выбор кабельной продукции и силовых трансформаторов
- г) выбор оборудования для частотного регулирования

Объект: артезианские скважины энергоцеха.

Предмет: установка электроцентробежного насоса.

## **1 Физико-географические условия участка**

Место заложения скважины выбрано с учетом геолого-гидрогеологических условий участка и отвечает требованиям Сан.ПиН 2.1.4.1110–14.

Проектируемая скважина № 1 закладывается в 0,6 км на юго-запад от Цеха-1, в 0,35 км на юго-запад от существующей скважины.

Проектируемая скважина № 2 закладывается в 0,25 км на юг от Цеха-1, в 0,4 км на восток от существующей скважины и в 0,1 км на северо-восток от газового цеха.

В районе проектируемых скважин в пределах зоны санитарной охраны разведанные месторождения полезных ископаемых отсутствуют.

Для обеспечения водопотребления потребным дебитом в скважины необходимо установить водоподъемный насос марки ЭЦВ 8-25-180.

Начальный диаметр бурения скважин принимается 595 мм, конечный 245 мм с тем расчетом, чтобы в случае несовпадения геолого-гидрогеологического разреза была возможность продолжить дальнейшее бурение, если это окажется целесообразным.

В процессе бурения скважины производится следующее:

- отбор шлама, маркированный по интервалам бурения, с укладкой его в специальные ящики;
- систематическое наблюдение за уровнем подземных вод, вскрытых скважиной в процессе бурения и фиксация его в геологической документации;
- корректировка технической конструкции и глубины скважины в соответствии с фактически вскрытым геолого-гидрогеологическим разрезом.

## **2 Общие сведения о предприятии теплоэнергооборудования**

Предприятие теплоэнергооборудования располагается в г. Челябинск и специализируется на оказании широкого комплекс услуг в сфере реализации строительства и реконструкции объектов энергетики.

Ориентировочная численность работников предприятия – 834 человека (данные на январь 2020 г).

Основные направления деятельности предприятия: монтаж, ремонт, изготовление и наладка турбинного, основного котельного и вспомогательного оборудования и трубопроводов предприятий энергетики, черной и цветной металлургии, а также химической промышленности.

Спектр технических работ предприятия:

- монтаж, ремонт и изготовление объектов котлонадзора, грузоподъемных кранов и газового хозяйства;
- виброналадочные работы вращающихся механизмов;
- изготовление и монтаж вентиляционных систем;
- изготовление нестандартного оборудования.

Выполняемые работы носят комплексный характер – от монтажа до ввода объекта и оборудования в эксплуатацию. Необходимо отметить, что предприятие имеет собственную производственную базу, оснащенную современным технологическим оборудованием, грузоподъемной, транспортной и другой специализированной техникой.

Направления работы, установленные в соответствии с организационной структурой предприятия:

- строительно-монтажные работы;
- ремонт и изготовление оборудования (основного, вспомогательного) энергетических и металлургических объектов;
- услуги лаборатории неразрушающего контроля;
- технологическое проектирование;
- пусконаладочные работы;

- теплоизоляционные работы;
- электромонтажные работы;
- техническое обслуживание эксплуатируемого энергетического оборудования.

Энергообеспечение цехов и подразделений предприятия включает в себя:

- а) Электроснабжение. Осуществляется от главной понизительной подстанции № 12 (ГПП-12) с напряжением 110/6 кВ. ГПП-12 по двум линиям 6 кВ осуществляет питание распределительной подстанции № 33, от которой запитаны силовые цеховые трансформаторы.
- б) Теплоснабжение. Его источником на предприятии является ТЭЦ и пиковая котельная с шестью водогрейными котлами типа ПТВМ-100. Горячая вода подается в цеха по трубопроводам ( $d = 219$  мм). Бытовые помещения и помещения маслохозяйства отапливаются по двухтрубной системе с верхней разводкой подающей магистрали от двух газовых котлов напольного типа с параметрическими теплоносителями. Приготовление горячей воды бытового назначения ведется по закрытой схеме от вертикального водонагревателя.
- в) Обеспечение сжатым воздухом. Подается по трубопроводам ( $d = 219$  мм) от компрессорных станций № 2, 4, 5, цеха компрессии воздуха и собственной компрессорной станции, состоящей из четырех компрессоров ( $\sum$  (мощность) = 360 кВт; выходное давление  $\leq 8$  кгс/м<sup>2</sup>).
- г) Газоснабжение. В качестве технологического топлива в цехах используется природный газ, который подается по трубопроводу ( $d = 219$  мм) от ГРП-1, ГРП-19. Газовое хозяйство цехов предназначено для обеспечения комплекса технологических нужд подразделений предприятия в природном газе, путем поддержания заданного давления и расхода природного газа на газопотребляющих агрегатах.

Давление газа, используемое в подразделениях предприятия:

- $P = 0,056 - 0,06$  кгс/см<sup>2</sup> (давление газа после ГРУ-1).



- $P = 1,5 - 3,0 \text{ кгс/см}^2$  (давление газа после ГРУ-2).
- $P = 0,3 \text{ кгс/см}^2$  (общее давление газа).

Газорегуляторная установка (ГРУ-1) газопроводов – двухниточная, с одним байпасом; служит для снижения давления газа от  $2000 \text{ кгс/м}^2$  до  $560 - 600 \text{ кгс/м}^2$ . Газопровод из стальных бесшовных горячекатаных труб Ду 300, 200, 150, 50, 40, 20. ГРУ-1 оснащена:

- предохранительным клапаном ПКН- 200 (2 шт.);
- пружинным сбросным клапаном ПСК-50 (1 шт.);
- сварным фильтром (2 шт.);
- регулятором давления РДУК-2 (2 шт).

Газорегуляторная установка (ГРУ-2) газопроводов – двухниточная; служит для снижения давления газа с  $12 \text{ кгс/м}^2$  до  $2,2 \text{ кгс/м}^2$ . Газопровод из стальных бесшовных горячекатаных труб Ду 80, 100. ГРУ-2 оснащена:

- предохранительным клапаном ПКВ-100 (2 шт.);
- СППК4-16 (1 шт.);
- сварным фильтром ФГ-100 (2 шт.);
- РДУК-2В 100/50 (2 шт).

д) Снабжение кислородом. Кислородопровод ( $d = 57 \text{ мм}$ ) для автогенных нужд цехов, подключен к кислородопроводу ЭСПЦ-3. Давление кислорода составляет 15 атм.

е) Снабжение паром. Снабжение паром производится от ТЭЦ комбината.

ж) Техническое водоснабжение. Осуществляется от оборотных циклов предприятия, в которых задействованы насосная станция и двухсекционная капельная вентиляторная градирня для охлаждения отработанной воды.

з) Снабжение питьевой водой. Осуществляется за счет подземных вод из сетей городского водоснабжения.

и) Канализационные сети. Сети производственно-ливневой канализации ( $d$  (трубопроводов) = 200-500 мм) и фекальной канализации ( $d = 150$ -200 мм) подключены к действующим сетям ЦВС.

### **3 Краткая характеристика исследуемого оборудования**

Насосы ЭЦВ, в зависимости от своего функционального назначения, можно подразделить на два типа – погружные (глубинные) и поверхностные. Все они рассчитаны на одинаковые условия эксплуатации – температура перекачиваемой воды  $\leq 25^{\circ}\text{C}$ , концентрация механических примесей до 0,01 %, рН = 6,5–9,5. Обе разновидности оборудования могут эксплуатироваться только при комплектации автоматическими станциями защиты [2].

Различие между двумя типами оборудования заключается в том, что погружные агрегаты размещаются в рабочей среде – внутри скважины, тогда как поверхностные устанавливаются рядом с ее устьем, а внутрь источника опускается водозаборный шланг.

Погружные насосы ЭЦВ применяются для перекачивания чистой воды из скважин в промышленности и коммунальных хозяйствах. Скважинный насос этого типа используется для ирригации, обеспечения водоснабжения населенных пунктов, понижения уровня грунтовых вод. Данный тип ЭЦВ выпускается в разных серийных модификациях, которые могут погружаться в скважины различного диаметра. В связи с чем, агрегаты имеют отличия в характеристиках напора и скорости подачи воды.

Строение погружного скважинного насоса типа ЭЦВ характеризуется наличием следующих элементов - асинхронного погружного электродвигателя; одно- или многоступенчатого центробежного насоса; жесткой муфты, соединяющей их. Жидкость, в свою очередь, подаётся через подвод, который расположен между насосом и электродвигателем. Он защищён сетчатым фильтром от попадания крупных механических частиц.

Данный вид насосов широко применим на предприятиях водного хозяйства и системах водоснабжения, благодаря простоте своей конструкции и доступной цене [2].

Система водоснабжения включает в себя множество взаимосвязанных элементов, такие как насос, трубопровод, запорно-регулирующая арматура,

резервуары, баки. При этом эффективность работы всей системы в целом зависит от согласованности функционирования данных элементов [3].

Основные характеристики насоса:

- напорная характеристика - это зависимость напора насоса от его подачи;
- зависимость потребляемой мощности от подачи (для многоступенчатых - для насоса в целом, либо для ступени);
- зависимость коэффициента полезного действия от подачи с учетом потерь в обратном клапане и на входе в насос.

### **3.1 Погружные центробежные насосы**

Погружной центробежный агрегат ЭЦВ предназначен для подъема воды из артезианских скважин с целью осуществления водоснабжения, орошения и других подобных работ.

Агрегат ЭЦВ – это агрегат, который состоит из электрического двигателя, насоса и вспомогательных узлов (рисунок 1) [3].

Агрегат ЭЦВ предназначен для подъема воды с общей минерализацией (сухой остаток) не более 1500 мг/л, с водородным показателем рН = 6,5 - 9,5, температурой до 25 °С, массовой долей твердых механических примесей – ≤ 0,01 % с размером не более 0,1 мм, с содержанием хлоридов – до 350 мг/л, сульфатов – до 500 мг/л, сероводорода – до 1,5 мг/л.

Глубинные погружные насосы ЭЦВ широко применяются для перекачивания чистой воды из скважин в промышленности, сельском и городском коммунальном хозяйстве. Скважинный насос этого типа используется для обеспечения водоснабжения сельских и городских населенных пунктов.

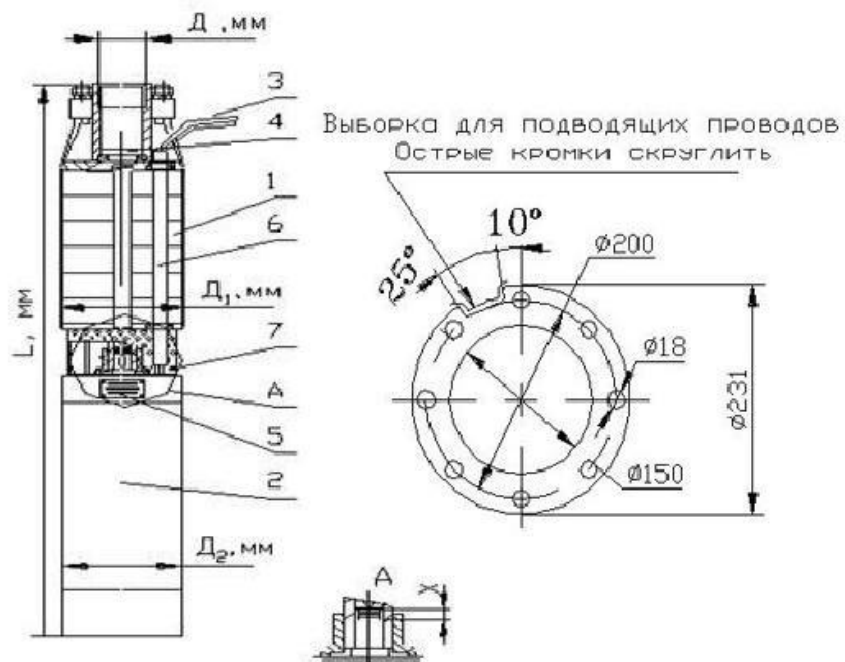


Рисунок 1 – Агрегат ЭЦВ

1 – насосная часть; 2 – электродвигатель; 3 – токоотводящие провода; 4 – клапан; 5 – паспортные данные; 6 – защитный кожух; 7 – защитная сетка; 8 – сетка или сливная пробка

На системах водоснабжения населенных пунктов и предприятий используются преимущественно глубинные погружные насосы, которые отличаются доступной ценой и относительной простотой в конструкции. Кроме того, данный вид насосов предполагает возможность подбора оптимальных решений для снижения энергетических затрат и затрат, возникающих в процессе эксплуатации. Данный вид оборудования также оказывает положительное влияние на окружающую природную среду, снижая негативное воздействие на водный бассейн промышленных площадок и населенных пунктов.

### 3.2 Погружные электродвигатели

Погружные двигатели для скважинных насосов являются асинхронными однофазными или трех фазными в зависимости от потребляемой мощности. Однофазные двигатели изготавливаются до мощности 2,2 кВт (3 HP – лошадиные силы). Двигатели для скважинных насосов производятся 4, 6, 8, 10, 12 дюймов и могут погружаться на глубину 300 – 350 метров. Изготавливаются двигатели для 4 дюймовых скважин трех видов маслonaполненные, водонаполненные и залитые компаундом. Для скважин 6, 8, 10, 12 дюймов изготавливаются водонаполненные двигатели. Чтобы компенсировать изменения давления снаружи и внутри маслonaполненного двигателя используется специальная камера с резиновой мембраной. С одной стороны мембраны находится масло, залитое в двигатель, а с другой стороны вода из скважины. Масло в двигателе заполняет все пустоты и тем самым улучшает отвода тепла из внутренней его части на поверхность при эксплуатации и защищает двигатель от перегрева. Для заливки масла в погружные двигатели применяется индустриальное масло марки И-18, или И-20 [5].

У водонаполненных двигателей встроен специальный предохранительный клапан двунаправленного действия. При увеличении давления внутри двигателя (двигатель нагревается при эксплуатации) клапан сбрасывает излишек давления в скважину, а при уменьшении давления внутри двигателя (двигатель начинает остывать после отключения) вода из скважины через клапан поступает в двигатель. Таким образом, все время происходит выравнивание давления воды в скважине и давления внутри двигателя.

Погружной двигатель для скважинных насосов, подобно поверхностному электрическому двигателю, состоит из двух главных элементов – статора и ротора.

В качестве примера представлены основные составляющие асинхронной электрической машины с короткозамкнутым ротором, приведенные на рисунке 2. Статор – неподвижная часть двигателя состоит из станины, сердечника, обмоток, подшипниковых щитов, закрывающих машину с торцов, и

клеммной коробки, куда выводятся начала и концы обмоток и куда подключается питающая двигатель сеть. Готовый статор запрессовывается в корпус из нержавеющей стали.

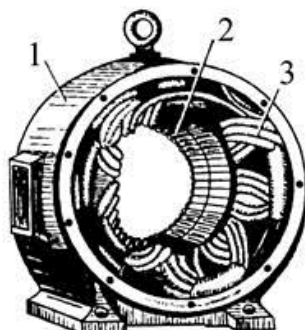


Рисунок 2– Статор асинхронного двигателя

1 – станина; 2 – сердечник; 3 – обмотка

Ротор представляет собой подвижную часть двигателя, вращающуюся на нержавеющей валу, на который напрессованы верхний и нижний подшипники. Для скважинных насосов данный элемент изготавливается с короткозамкнутыми обмотками. При этом конструкция может предполагать наличие двух нижних опорных подшипников, в зависимости от мощности двигателя. Применяют подшипники открытого типа (погружены в масло в электродвигателе). На вращающемся валу ротора монтируется подвижная часть механического торцевого уплотнения, а ответная неподвижная часть - в пазе верхнего фланца.

### **3.3 Гидрозащита погружных электродвигателей**

Основная цель гидрозащиты – отсутствие пластовой жидкости во внутренней полости электродвигателя, также компенсирование объема масла в ней от температурных показателей, передача крутящего момента от вала электродвигателя к валу насоса.

Гидрозащита подразделяется на следующие виды: П, ПД, Г.

В настоящее время гидрозащита выполняется в обычном и коррозионностойком исполнении. Гидрозащита открытого типа (рисунок 3) является

основным вариантом гидрозащиты для комплектации ПЭД. Подобный тип доступно использовать исключительно, применяя специальную барьерную жидкость (плотность до 21 г/см), которая имеет физико-химические характеристики пластовой жидкости и масла [2].

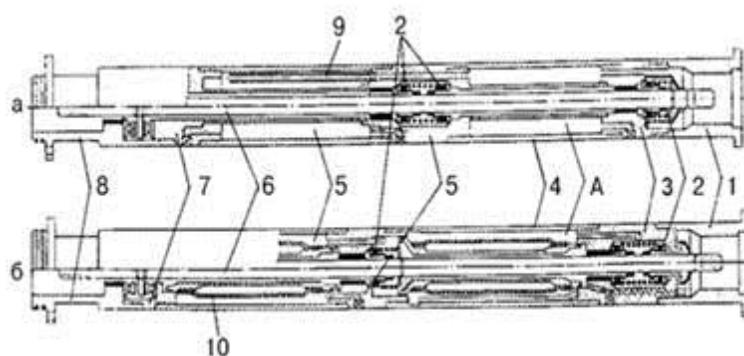


Рисунок 3 – Гидрозащита: а) открытого типа; б) закрытого типа

А – верхняя камера; Б – нижняя камера

1 – головка; 2 – торцевое уплотнение; 3 – верхний ниппель; 4 – корпус;  
5 – средний ниппель; 6 – вал; 7 – нижний ниппель; 8 – основание; 9 – соединительная трубка; 10 – диафрагма

Погружные электродвигатели представляют собой асинхронные устройства, заполненные специальным маслом, и являются одним из важнейших узлов установки электроцентробежного насоса.

Гидрозащита погружных электродвигателей призвана блокировать возможность возникновения целого ряда факторов. Во-первых, функцией гидрозащиты является предотвращение проникновения пластовой жидкости внутрь самого электродвигателя. Во-вторых, система защиты в случае изменения объема масла во внутренней полости двигателя предполагает компенсацию этого изменения, которое может происходить при изменении температуры двигателя, а также передачи крутящего момента от электродвигателя на вал насоса.



Конструкция гидрозащиты погружных электронных двигателей может состоять из одного протектора или из сочетания протектора и компенсатора. Рассмотрим подробнее варианты существующих систем.

Первый вариант представляет собой две сообщающиеся трубкой камеры, верхняя из которых заполнена так называемой барьерной жидкостью, а вторая – маслом. Тяжелая и обладающая высокой плотностью барьерная жидкость не смешивается ни с пластовой жидкостью, ни с маслом, и при изменении объема жидкого диэлектрика в двигателе перераспределяется между камерами. Данный вариант является основным видом гидрозащиты и относится к открытому типу.

Закрытые протекторы (второй вариант исполнения гидрозащиты погружных электродвигателей) используют резиновые диафрагмы, которые за счет своей эластичности компенсируют изменение объема диэлектрика [11].

Вариант компоновки, который включает протектор и компенсатор, обеспечивает защиту от проникновения жидкости внутрь двигателя за счет торцевых уплотнений. Протектор в таком варианте исполнения размещается над электродвигателем, а компенсатор – присоединяется к его нижней части.

Автоматизированный мониторинг состояния погружного центробежного насоса в ходе работы осуществляется термоманометрической системой. Это позволяет исключить возникновение негативного влияния аномальных режимов работы: например, при низком показателе давления при приеме насоса и при повышении температуры двигателя в скважине.

### **3.4 Трансформаторы установки электроцентробежного насоса**

Принимаем к установке на артезианских скважинах силовые трансформаторы типа ТМГ.

Изготавливаются Российскими компаниями Электроцит Самара («СЭЦ»), Свердловским заводом трансформаторов тока («СЗТТ» город Екатеринбург) и т.д.

ТМГ– это герметичные трехфазные силовые трансформаторы, которые используют естественное масляное охлаждение и переключение ответвлений обмоток без возбуждения с переменным током при частоте 50 Гц.

Трансформаторы такого типа используются для подачи потребителям электроэнергии общего назначения.

Трансформатор ТМГ:

- Т – трехфазный трансформатор;
- М – масляное охлаждение;
- Г – герметичное исполнение.

Производятся трансформаторы различных классов напряжения – 6 и 10 кВ, климатического исполнения «У», категории размещения 1 по ГОСТ 15150 и предназначены для эксплуатации в условиях:

- а) высота установки над ур. моря – до 1000 м;
- б)  $T_{\text{возд}}$  при эксплуатации для климатического исполнения «У» - – 45...+ 40 °С, для климатического исполнения «ХЛ» - – 60...+ 40 °С;
- в) показатель влажности воздуха в окружающей среде при температуре 25 °С должен составлять  $\leq 100 \%$ ;
- г) окружающая среда не подвержена фактору взрывоопасности;
- д) отсутствие в окружающей среде высоких концентраций агрессивных паров, которые могут привести к разрушению металлов.

Особенность силовых трансформаторов ТМГ заключается в том, что внутренний объем не имеет сообщения с внешней средой. Предварительно очищенное и дегазированное масло не имеет контакта с атмосферой, что позволяет избежать его увлажнения, окисления и других неприятных последствий. Благодаря чему его свойства сохраняются на весь период работы [11].

Конструктивно трансформатор состоит из:

- герметичного бака (не имеет расширителя– температурные изменения объема жидкости компенсируются за счет гофрированных стенок емкости);

- активной части (сердечник, выполненный из специальной электро-технической стали, а также трехфазные обмотки выполнены– из меди или алюминия);
- вводов низкого и высокого напряжения;
- поплавкового указателя уровня масла;
- предохранительных клапанов (для уменьшения давления);
- измерительных устройств.

Преимуществами данного трансформатора являются:

- отсутствие необходимости проводить отбор проб масла;
- уменьшение расходов на предпусковые работы;
- низкие затраты на эксплуатацию;
- отсутствие необходимости в профилактических ревизиях и осмотрах.

Внешний вид трансформатора ТМГ приведен на чертеже в приложении А.

### **3.5 Устройства станций управления и защиты для автоматизации погружных электроцентробежных насосов**

Назначение станций управления и защиты заключается в обеспечении питания, контроле работы погружного насоса и недопущения его функционирования в аномальных режимах работы.

Принимаем к установке наиболее распространенную в РФ (Российской Федерации) станцию управления и защиты «Лощман +». Внешний вид представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид Станции управления и защиты «Лоцман +»

Общая схема соединений станции представлена в приложении Б.

К установке была принята станция СУиЗ «Лоцман+ L2-40» при мощности электродвигателя равной 22 кВт, согласно [6].

Станция управления насосами и защиты электродвигателей "Лоцман+" выполняет следующие функциональные задачи:

- а) Предотвращение возможных перегрузок и недогрузок показателей тока в асинхронном трехфазном двигателе, обрыва фаз, «скачков» напряжения, «сухого» хода.
- б) Во время процесса налива и слива жидкости в используемые емкости применяется автоуправление погружными насосами, таким образом, система управления и защиты направлена на поддержание уровня воды в резервуаре.
- в) Автоматическое осушение дренажного приемка по датчикам уровня (с замыкающим контактом, электроконтактные манометры (ЭКМ)).

Характеристики эксплуатации СУиЗ: показатель температуры окружающей среды – 40 -+ 40 °С, влажность воздуха – 80 % при отсутствии конденсата.

Согласно характеристикам эксплуатационной законченности, система управления и относится к изделиям третьего порядка и является средством автоматизации.

Степень защиты СУиЗ от воды и пыли IP 20 (IP 31) по ГОСТ 14254–96 и климатического исполнения У2 по ГОСТ 15150–69.

По степени защиты человека от поражения электрическим током СУиЗ относится к первому классу по ГОСТ 12.2.007.0–75.

Положительными моментами применения СУиЗ являются:

- гибкая настройка режимов работы и параметров защит;
- отсутствие сложного оборудования для его обслуживания;
- невысокая стоимость;

Основные элементы системы управления и защиты:

- а) щит с автоматическим выключателем;
- б) микроконтроллер с кнопками управления «Пуск», «Стоп», светодиодным индикатором, светодиодами датчиков уровня на лицевой стороне и клеммными зажимами, применяемыми для подключения внешних силовых электроцепей;
- в) электромагнитный пускатель;
- г) силовой и сигнальный блоки;
- д) токовый трансформатор;
- е) сигнальный светодиод.

Работа СУиЗ предполагает обработку поступающих сигналов микроконтроллером и управление электромагнитным пускателем, который позволяет включать и отключать электродвигатель.

### 3.6 Кабельные линии установки электроцентробежного насоса

Кабельные линии предназначены для подачи электроэнергии с поверхности земли (от комплектных устройств и станций управления) к погружному электродвигателю.

В качестве проводников кабельной линии от станции управления к артезианским насосам выбираю наиболее распространенный провод с двойной изоляцией марки ВПВ (В– провод водопогружного типа, П– изоляция из полиэтилена, П– оболочка выполнена из полиэтилена). Кабель изготовлен в соответствии с ГОСТ или ТУ, в частности кабель КВВ (ТУ16.К13-035–2004).

ВПВ – это силовой провод с многопроволочной жилой из меди, предназначенный для подключения электрооборудования, находящегося в воде к электросетям на номинальное напряжение 380 и 660 В.

Данный провод является водопогружным, он специально разработан для прокладки в водных средах: реках, скважинах. Особенностью кабеля является то, что он способен функционировать даже под высокими давлениями вплоть до  $6.86 \times 10^6$  Па. При этом кабель изготовлен специально с расчетом на то, что оборудование будет работать в течение длительного промежутка времени.

В основном провода с подобной маркировкой применяются для подведения электричества к различного рода водяным насосам, расположенным на большой глубине в шахте или скважине. Кабель ВПВ соответствует первой, второй и пятой категории размещения. Это значит, что продукция может быть проложена также по воздуху, в закрытых и открытых объектах, в полых объемах строительных конструкций и в других местах.

Силовой кабель ВПВ предназначен для фиксированного монтажа (исключается движение энергопотребляющих установок). Монтаж разрешен при температуре выше  $(-15)^{\circ}\text{C}$  [4].

При этом допустимый диапазон температур эксплуатации провода располагается в пределах от  $(-40)$ – $(+80)^{\circ}\text{C}$ . Минимальный радиус изгиба провода составляет 10 внешних диаметров кабеля.

Данный кабель представлен на рисунке 5.

Основными производителями кабелей ВПП являются: Завод «Энергокабель» г.Москва, ЗАО «Кабельный завод «Кавказкабель ТМ» г.Прохладный, ООО «Рыбинсккабель» г. Рыбинск и др.

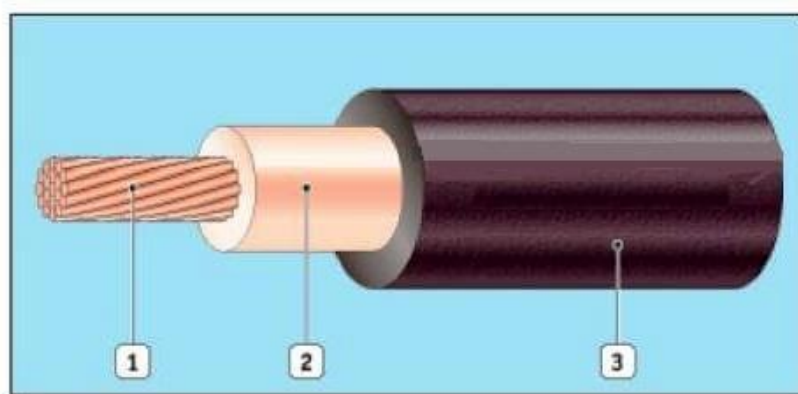


Рисунок 5 – Кабель ВПП

1 – медная токопроводящая жила; 2 – изоляция из полиэтилена; 3 – оболочка из полиэтилена (для ВПП)

#### **4 Перспективы развития оборудования артезианских скважин**

Основным из перспективных направлений развития оснащения артезианских скважин является применение частотных преобразователей для регулирования, управления и соблюдением режимов энергосбережения.

Преимущества частотного регулирования электродвигателя:

- а) автоматизация работы электродвигателя в процессе управления оборудованием;
- б) возможность автоматического запуска, торможения и реверса системы, что позволяет использовать плавное включение пусковых сопротивлений. Таким образом, данная оптимизация направлена на регулирование тока в необходимых пределах, на повышение производительности и на исключение возможности большого числа ошибок;
- в) частотное регулирование электродвигателя в целом продуктивно может быть использовано во всех областях хозяйства и промышленности в соответствии с тем фактом, что данный процесс представляет собой автоматизированную систему, что, в свою очередь минимизирует затраты электроэнергии, поднимает уровень качества продукции и, в целом, продуктивно влияет на надежность всей системы;
- г) в связи со снижением пусковых токов и отсутствием перегрузок в системе, частотное регулирование обеспечивает долговечность технологической системы, что позволяет задавать максимально точные технологические параметры;
- д) в связи с высокими затратами на обеспечение работоспособности системы и недостаточно высоким качеством производимых работ, основанных на узком диапазоне регулирования оборудования – преобразователи частоты избегают различных недостатков в работе системы.

Преимущества применения частотных преобразователей:

- а) возможность отказа от применения редукторов, вариаторов, дросселей и др., благодаря плавному регулированию скорости вращения электри-



- ческого двигателя, что позволяет упростить технологическую систему, повышая ее надежность и снижая расходы на эксплуатацию;
- б) плавный разгон во время работы частотного преобразователя, что позволяет использовать его исключая повышение пусковых токов и механических ударов. Таким образом, происходит снижение нагрузки на электродвигатель и передаточные механизмы, что, в свою очередь, увеличивает возможный срок эксплуатации.
  - в) встроенный микропроцессорный ПИД-регулятор дает возможность использовать системы регулирования скорости управляемых двигателей и сопутствующих технологических процессов;
  - г) обратная связь системы с частотным преобразователем обуславливает эффективное поддержание регулируемых технологических параметров при переменных нагрузках;
  - д) частотный преобразователь в совокупности с асинхронным электродвигателем могут применяться для замены приводов постоянного тока;
  - е) в свою очередь, преобразователь частоты в комплексе с программируемым микропроцессорным контроллером может быть использован для создания многофункциональных систем управления электроприводами;
  - ж) регулируемый частотный электропривод позволяет сохранять электроэнергию избеганием неоправданных ее затрат, которые возникают при реализации альтернативных методах регулирования с технологических потоков дросселированием, за счет гидромффт и других механических регулирующих средств.

Экономия электроэнергии при использовании описанной системы регулируемого электрического привода для насосных агрегатов равна около 50–75 % от потребляемой мощности. Технические характеристики преобразователя частоты приведены в таблице 1.

Применение устройств плавного регулирования частоты вращения двигателей в насосах, предоставляет ряд других преимуществ:

- а) плавный пуск и остановка двигателя, предотвращение негативного воздействия переходных процессов (например, гидравлический удар) в напорных трубопроводах и технологическом оборудовании;
- б) благодаря использованию токов номинального уровня при запуске двигателя повышается срок его эксплуатации;
- в) возможность модернизации функционирующих технологических схем без замены насосного оборудования.

Таблица 1 – Технические характеристики преобразователя частоты

Характеристика		Описание
Области применения		Нефтегазовая промышленность
		Металлургия, добыча полезных ископаемых
		Пищевая промышленность
		Водоподготовка, водоснабжение и водоотведение
Способ установки		Исполнение для настенного монтажа
Диапазон мощности, сеть 50/60 Гц (кВт)	Трехфазная, 380–480 В	0,75–90
Электропривод	Выходная частота	0,1–500 Гц
	Закон управления	Асинхронный двигатель По пяти точкам, энергосберегающий с контуром скорости, в разомкнутой системе, в замкнутой системе
Тип преобразователя частоты		ATV 930 .....

Схема управления одним двигателем преобразователем частоты с выходным фильтром представлена в приложении В.

Срок окупаемости при применении частотного привода на артезианских скважинах, согласно статистике, обычно составляет от одного до трех лет (окупаемость в основном происходит за счет экономии электроэнергии).

На рисунке 6 представлен преобразователь частоты 22 кВт 380–500В «SCHNEIDER ELECTRIC».



Рисунок 6 – Преобразователь частоты

#### **4.1. Структура электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса**

В настоящее время при активном использовании машин и механизмов выделяются несколько рабочих процессов, которые в свою очередь делятся по типу выполняемых задач:

- технологические;
- транспортные;
- энергетические;
- информационные.

В процессе функционирования значительная их часть применяет электроэнергию. Такие электротехнологические процессы реализуются при помощи электротехнологических систем (ЭТС). Данные системы подразделяются на следующие виды:

- электротермические;

- сварочные;
- пьезоэлектрические;
- электротехнологические;
- электромеханические;
- специализированные.

Рассматриваемая в данной работе установка электроцентробежного насоса относится, согласно классификации, к электротехнологическим и электромеханическим системам, которые способны изменять электроэнергию в механическую и наоборот [10].

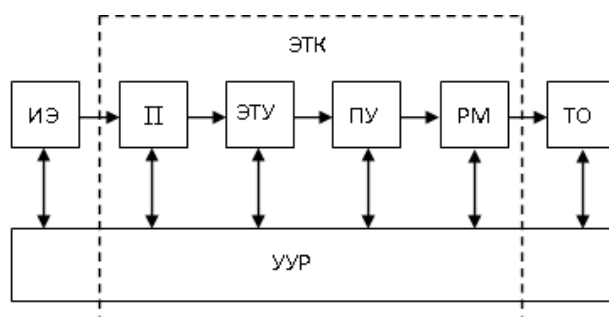


Рисунок 7 – Структура электротехнологических систем

ИЭ – источник электрической энергии; П– преобразователь электрической энергии; ЭТУ –электротехнологическое устройство; ПУ – преобразовательное устройство; РМ – рабочая машина; ТО – технологический объект;УУР – устройство управления и регулирования; ЭТК – электротехнический комплекс.

Структура электротехнологических систем по характеру использования имеет общие значения (рисунок 7).

В состав электротехнологических систем входят следующие показатели, которые имеют следующее назначение:

ИЭ – источник электрической энергии. Это любой источник, способный преобразовать какую-либо энергию в электрическую (солнечные батареи, автономные источники электропитания, электросети транспортных средств).

ПЭ – преобразователь электрической энергии. Данные устройства способны превратить электроэнергию с одним параметром в электроэнергию с другим (трансформаторы, электронные пушки).

ЭТУ – электротехнологическое устройство. Данное устройство способно преобразовать электрическую энергию в «технологическую». К такому виду энергии относятся механическая, химическая, тепловая, световая и другие (электромашин, электрические аппараты индуктивного и емкостного типов).

ПУ – преобразовательные устройства, основным назначением которых являются конвертация «технологической» энергии с одними показателями на другие (система охлаждения, теплоизоляция, гидроусилители).

РМ – рабочий механизм, который способен осуществить работу всех процессов в технологическом процессе.

ТО – технологический объект, для которого создается технологическая система.

УУР – устройство управления и регулирования. В систему данного устройства входят всевозможные информационные системы, которые отвечают за принципы управления в технологическом процессе и регулирование используемых параметров преобразования энергии.

Вышеуказанные элементы, входящие в структуру электротехнологических систем, отвечают за общий процесс энергопреобразования и в своей совокупности играют важную роль. Таким образом, возможно ввести следующее определение:

Электротехнический комплекс (ЭТК) – подсистема электротехнологической системы, которая состоит из структурных элементов электротехнологических систем (ПЭ, ЭТУ, ПУ, РМ, УУР) и назначение которой состоит в функционировании электротехнологической системы в необходимом технологическом процессе [2].

На рисунке 8 представлена общая схема проектируемой системы установки электроцентробежного насоса:

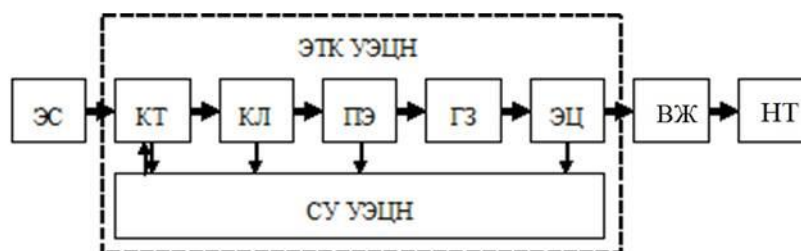


Рисунок 8 – Структура электротехнологической системы УЭЦН

ЭС – электросеть; КТУ – комплектное трансформаторное устройство (с преобразователем частоты); КЛ – кабельная линия; ПЭ – погружной электродвигатель; ГЗ – гидрозащита; ЭЦ – электроцентробежный насос; ВЖ – пластовая жидкость; НТ – колонна насосно-компрессорных труб; СУ УЭЦН – станция управления; ЭТК УЭЦН – электротехнический комплекс.

На основании структур ЭТС и УЭЦН можно сделать следующие выводы:

- для УЭЦН в качестве энергии применяется промышленная электросеть с показателями напряжения 380/6000 В;
- составными частями электроэнергии являются установка трансформатора (ТМПН), преобразователь частоты, кабельная линия;
- в качестве электротехнологического устройства используется погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД), который состоит из «элементарных» электродвигателей (5–20 шт.), связанных между собой;
- гидрозащита используется в качестве преобразовательного устройства;
- ЭЦН выполняет функции рабочей машины, который направляет энергию вращения вала к потоку пластовой жидкости;
- станция управления установки электроцентробежного насоса используется в качестве устройства управления и регулирования.

Из вышеуказанного следует, что установка электроцентробежного насоса представляет собой непростую систему, которая содержит в себе разнородные подсистемы.

#### 4.2. Энергосбережение в установке электроцентробежного насоса

Энергосбережение является приоритетным направлением технической политики развитых стран мира. Это обусловлено рядом причин:

- а) ограниченность и невозобновимость основных энергоресурсов;
- б) непрерывно растущие сложности добычи энергетических ресурсов и их высокая стоимость;
- в) глобальные экологические проблемы последних десятилетий.

Энергосбережение в УЭЦН – это наиболее дешевый и безопасный способ повышения мощности, т.к. затраты на экономию 1 кВт мощности составляют в 4–5 раз меньше, чем стоимость вновь вводимого 1 кВт. На рисунке 9 приведена обобщенная схема передачи мощности к пластовой жидкости от промышленного источника, которая отражает основные характеристики энергопроцесса в УЭЦН [11].

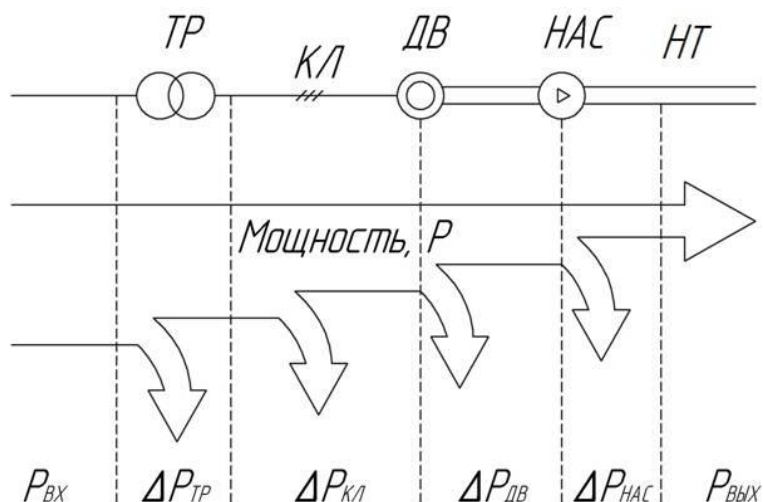
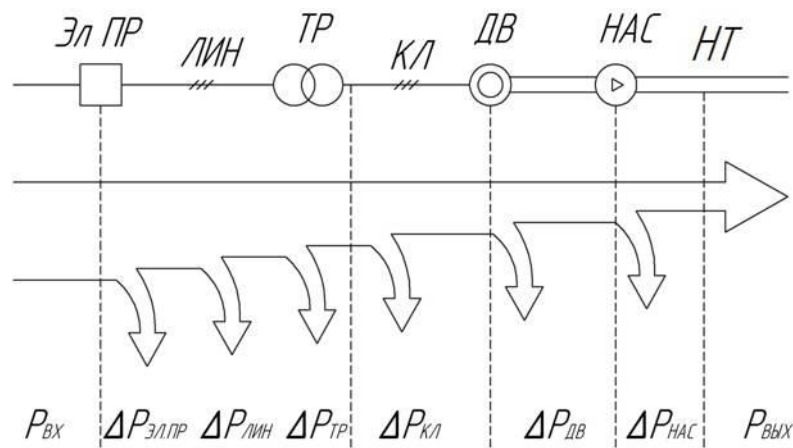


Рисунок 9 – Энергетическая диаграмма

а) нерегулируемый электропривод



б) регулируемый электропривод

Энергетический канал включает следующие структурные компоненты:

- ТР –промысловый трансформатор;
- КЛ – кабельная линия;
- ДВ – электродвигатель;
- НАС –рабочая машина (электроцентробежный насос);
- технологический орган (пластовая жидкость, поднимающаяся по колонне насосных труб– НТ).

При этом, каждая ступень передачи энергии сопровождается потерей  $\Delta P$ , значение которой зависит от оборудования и режимов его работы [11].

Энергосиловой основой УЭЦН является асинхронный электрический привод, благодаря которому поступающая из промышленной сети электрическая энергия переходит в механическую и подводится к рабочему органу – центробежному насосу. Благодаря чему, энергосбережение в УЭЦН значительно зависит от способа управления потоком энергии, подводимой к погружному электродвигателю, а также от рабочих характеристик ЦН, скважинной магистрали и т.д. До недавнего времени в большинстве случаев в ЦН оснащались нерегулируемым асинхронным электродвигателем. Для регулирования технологических параметров скважины, в данном случае применялось управление ее механической частью из устья скважины.



Это необходимо для вывода скважины на номинальный уровень работы, т.к. ЦН выбираются с запасом по производительности и имеют каталожные значения напора ( $H_{КАТ}$ ) и подачи ( $Q_{КАТ}$ ) больше номинальных, а также путем дросселирования становится возможным увеличение дебита скважины с помощью открытия задвижки, либо снятия шибера.

Энергетическая и технологическая неэффективность дроссельного регулирования не позволяют обеспечить необходимое механическое регулирование параметров артезианских скважин, соответствующих современным требованиям, что продемонстрировано на рисунке 11. Этот рисунок наглядно иллюстрирует характеристики производительности ЦН, отражающие зависимость напора  $H$  от расхода  $Q$ . Данные характеристики аппроксимируются следующей зависимостью [11]:

$$H = H_{OH} \left( \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^2 - CQ^2 \quad (1)$$

Они построены для частот  $\omega_{НОМ} > \omega_1 > \omega_2 > \omega_3$  в относительных единицах при использовании величин номинальной подачи  $Q_{НОМ}$  в качестве базовых единиц и номинального напора ( $H_{НОМ}$ ). В уравнении (1):

$\omega_{НОМ}$  – номинальная угловая скорость ПЭД;

$H_{OH}$  – напор насоса (при  $Q = 0$ ).

Характеристика магистрали артезианской скважины при номинально открытой заслонке представлена кривой 1 на рис. 10 и определяется:

$$H = H_C + RQ^2, \quad (2)$$

где  $H_C$  – статический напор, который вызван противодействием от веса столба водяной смеси (при  $Q = 0$ ) (задвижка закрыта);

$R$  – коэффициент гидравлического сопротивления магистрали.

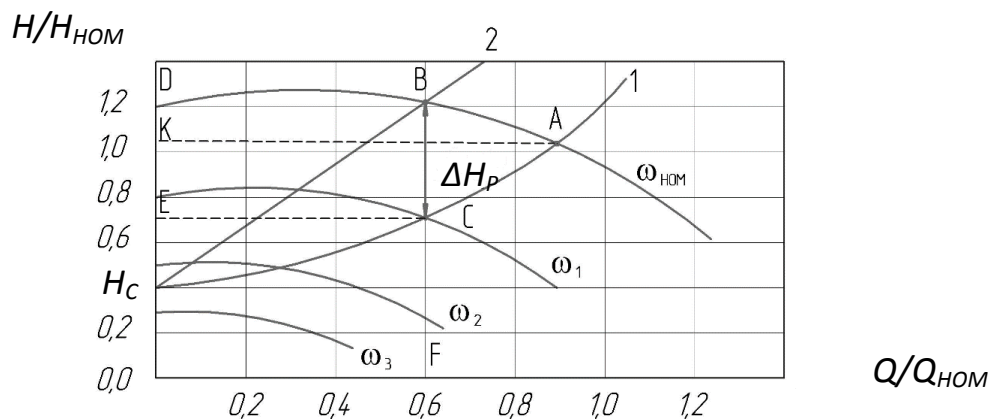


Рисунок 10 – Режимы работы УЭЦН при дроссельном и частотном регулировании

Насос потребляет мощность, которая определяется по выражению:

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (3)$$

где  $Q$  – подача,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напор, м;

$g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$\rho$  – плотность водной смеси,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\eta$  – коэффициент полезного действия центробежного насоса.

При номинальных значениях напора и расхода, насос работает в точке А пересечения характеристик его магистрали, а потребляемая мощность, пропорциональна мощности прямоугольника OKAL. Дроссельное регулирования параметров скважины основано на динамике ее гидравлического сопротивления при постоянной скорости вращения ротора УЭЦН. В данном случае рабочая точка УЭЦН перемещается по  $Q - H$  характеристики при

$\omega = \omega_{НОМ}$  с понижением подачи  $Q$  до точки пересечения с новой характеристикой магистрали. Доля напора  $\Delta H_{ПР}$  терпит потери на регулирующем устройстве, что ведет к росту напора, превосходя номинальный. Мощность насоса, пропорциональная площади прямоугольника  $ODBF$  на графике, и энергопотребление УЭЦН почти не изменяются. Из чего можно сделать вывод, что дроссельное регулирование энергетически нецелесообразно, т.к. сопровождается понижением КПД.

Данного недостатка позволяет избежать использование частотно-регулируемого асинхронного двигателя, а также реализовать энергосберегающее управление параметрами скважины, путем варьирования частоты вращения ротора УЭЦН при неизменной гидравлической характеристике. При этом рабочая точка перемещается до точки  $C$  и с уменьшением подачи  $Q$  одновременно падает необходимый напор, что ведет к понижению мощности УЭЦН, пропорциональной площади прямоугольника  $OECF$ , что подтверждает возможность существенного снижения энергопотребления.

Аналогично диаграмме, приведенной на рисунке 10а, можно отразить передачу мощности в УЭЦН с регулируемым электроприводом в виде энергетической диаграммы на рисунке 10б, где трансформатор  $Tr$  получает питание от электропреобразователя, благодаря чему потери  $\Delta P \rightarrow \Delta P_{MIN}$ , т.е.  $P_{ВЫХ}/P_{ВХ} \rightarrow MAX$ .

Предварительные расчеты показывают [12], что применение в качестве электропреобразователя регулятора частоты вращения вала ЦН обеспечивается экономия электроэнергии на 30-40 %.

Регулирование частоты электрического тока, питающего погружной двигатель, является одним из эффективных методов регулирования частоты вращения ротора ПЭД [4]. Скорость идеального холостого хода позволяет регулировать скорость ПЭД при изменяющейся величине частоты  $f_1$ :

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{p_H} f_1, \quad (4)$$

где  $f_1$  – частота напряжения обмотки статора;

$p_H$  – число пар полюсов двигателя.

В свою очередь, при неизменном напряжении источника тока  $U_1$  с понижением частоты  $f_1$  резко возрастает ток намагничивания и ток статора. Магнитная система ПЭД насыщается. При этом снижаются рабочие показатели ПЭД, в то же время повышается значение электрических и магнитных потерь. В данном случае, для возможности сохранения технических и экономических показателей ПЭД при изменении показателя частоты  $f_1$  и момента нагрузки  $M$ :

$$U_1 = U_1(f_1, M). \quad (5)$$

В разомкнутых системах управления напряжение  $U_1$  регулируется в функции от частоты  $f_1$ :

$$U_1 = U_1(f_1). \quad (6)$$

В приложении Г представлена схема силовой части установки погружных электроцентробежных насосов.

## 5 Методика инженерного расчёта параметров установки электроцентробежного насоса для артезианской скважины

В выпускной квалификационной работе подбор установки центробежного электрического насоса картезианской скважине с глубиной залегания водоносного пласта 120 м осуществляется с помощью методики инженерного расчета с применением калькулятора. Исходными данными для расчета [10] являются следующие параметры артезианской скважины:

- $\rho_{\text{воды (ст. усл.)}} = 877 \text{ кг/м}^3$ ;
- $\rho_{\text{попутной воды (ст. усл.)}} = 1010 \text{ кг/м}^3$ ;
- дебит скважины (ст. усл.)  $Q = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- объемная доля попутной воды (ст. усл.)  $b = 0,30$ ;
- газовый фактор воды  $G = 38,84 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- объемный коэффициент воды  $b_H = 1,12$ ;
- глубина расположения пласта от устья скважины  $L = 1919 \text{ м}$ ;
- средний угол между осью ствола скважины и вертикалью  $\theta = 12^\circ$ ;
- пластовое давление  $N_{\text{пл}} = 15,1 \text{ МПа}$ ;
- давление насыщения воды попутным газом  $N_{\text{нас}} = 6,4 \text{ МПа}$ ;
- пластовая температура  $T_{\text{пл}} = 349 \text{ }^\circ\text{К}$ ;
- температурный градиент горных пород, вскрытых скважиной  $G_T = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ К/м}$ ;
- коэффициент продуктивности скважины  $K = 7,5 \text{ м}^3/\text{МПа} \cdot \text{сут}$ ;
- внутренний диаметр обсадной колонны  $D_{\text{ВН}} = 0,128 \text{ м}$ ;
- устьевое давление  $N_\gamma = 0,49 \text{ МПа}$ ;
- $\rho_{\text{попутного газа (ст. усл.)}} = 1,15 \text{ кг/м}^3$ ;
- вязкость воды  $\mu_H = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Па/с}$ .

Подбор параметров УЭЦН проводится следующим образом:

- а) Определяется плотность системы «вода – газ» на участке «забой – прием насоса».

$$\rho_{\text{см}} = [\rho_B \cdot b + \rho_H (1 - b)] \cdot (1 - \Gamma) + \rho_G \cdot \Gamma, \quad (7)$$

$$\rho_{CM} = [1010 \cdot 0,3 + 877(1 - 0,30)] \cdot (1 - 0,15) + 1,15 \cdot 0,15 = 779,54 \text{ кг/м}^3.$$

б) Показатель забойного давления для необходимого дебита скважины

$$N_{ЗАБ} = N_{ПЛ} - \frac{Q}{K}, \quad (8)$$

где  $N_{ПЛ}$  – пластовое давление;

$Q$  – заданный дебит скважины;

$K$  – коэффициент продуктивности скважины.

$$N_{ЗАБ} = 15,1 - \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{7,5} \cdot 86400 = 8,41 \text{ МПа.}$$

в) Проводится расчет значения глубины расположения динамического уровня

$$H_{ДИН} = L - \frac{N_{ЗАБ}}{\rho_{CM} \cdot g}, \quad (9)$$

где  $L$  – глубина расположения пласта.

$$H_{ДИН} = 1919 - \frac{8,41 \cdot 10^6}{779,54 \cdot 9,81} = 819,3 \text{ м.}$$

г) Определяется показатель давления на приеме насоса с выбранным показателем газосодержания на входе в систему насоса, при котором не происходит превышение значения

$$N_{ПР} = N_{НАС} \cdot (1 - \Gamma), \quad (10)$$

где  $N_{НАС}$  – давление насыщения воды.

$$N_{ПР} = 6,4(1 - 0,15) = 5,44 \text{ МПа.}$$

д) Определяется глубина подвески насоса по вертикали

$$H_{ПОДВ} = H_{ДИН} + \frac{N_{ПР}}{\rho_{СМ} \cdot g}, \quad (11)$$

$$H_{ПОДВ} = 819,3 + \frac{5,44 \cdot 10^6}{779,54 \cdot 9,81} = 1530,6 \text{ м.}$$

е) Определяется глубина спуска насоса по оси скважины

$$L_{СП} = \frac{H_{ПОДВ}}{\cos \Theta},$$

$$L_{СП} = \frac{1530,6}{\cos 12^\circ} = 1576 \text{ м.}$$

ж) Проводится расчет температурного показателя пластовой жидкости на приеме насоса

$$T = T_{ПЛ} - (L - H_{ПОДВ}) \cdot G_T, \quad (12)$$

где  $G_T$  – температурный градиент.

$$T = 349 - (1919 - 1530,6) \cdot 3,3 \cdot 10^{-2} = 336,18^0 \text{ К}, (63^0 \text{ С}).$$

з) Определяется заданный напор насоса в условиях работы на воде

$$H_B = \left[ L - \frac{10^6}{\rho_{CM} \cdot g} (N_{ЗАБ} - N_Y) - 160 D_{HKT} \cdot G \cdot (1 - b) \cdot (1 - \sqrt[3]{N_Y / N_{НАС}}) \right] \cdot K_B^{-1}, (13)$$

где  $D_{HKT}=0,062$  м – диаметр насосно-компрессорных труб;

$K_B$  – коэффициент, учитывающий влияние на напор насоса попутного газа.

и) Принимается  $K_B=0,87$ ,  $Q=5,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ :

$$H_B = \left[ 1919 - \frac{10^6}{779,54 \cdot 9,81} (8,41 - 0,49) - 160 \cdot 0,062 \cdot 38,63 \cdot (1 - 0,30) \cdot (1 - \sqrt[3]{0,49/6,4}) \right] \cdot K_B^{-1}$$

$$H_B = 879,76 \cdot K_B^{-1},$$

$$H_B = \frac{1}{0,87} \cdot 879,76 = 1011,2 \text{ м.}$$

к) Значение подачи насоса

$$Q_B = Q \cdot K_Q^{-1}, (14)$$

где  $K_Q$  – коэффициент изменения подачи при работе смеси относительно водной характеристики. Принимается  $K_Q=0,85$ , и вычисляется подача насоса

$$Q_B = \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{0,85} \cdot 86400 = 58,9 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

л) Исходя из величин  $Q_B$ ,  $H_B$  и  $D_{ВН}$  выбирается погружной ЭЦН, его величины [17].

Такой установкой является ЭЦН5-50-1300 (оптимальная подача насоса  $50 \text{ м}^3/\text{сут}$ , номинальный напор  $1360 \text{ м}$ , общее количество ступеней  $z = 264$ , диаметр корпуса (пятая группа)  $92 \text{ мм}$ , номиналь-



ная частота вращения  $n = 2850$  об/мин, номинальная мощность  $P_{НОМ} = 17,94$  кВт, номинальный КПД  $\eta = 43\%$ ).

м) Определяется скорость вращения ЭЦН для достижения необходимой подачи на воде, используя законы подобия.

$$n_{НАС} = n_{НОМ} \cdot \frac{Q_B}{Q_{НОМ}}, \quad (15)$$

$$n_{НАС} = 2850 \cdot \frac{58,9}{50,1} = 3350 \text{ об/мин.}$$

н) Согласно рисунку 11 проводится расчет напора насоса

$$H_{НАС} = H_{СТ} \cdot \frac{z_{НОМ}}{z_{СТ}}, \quad (16)$$

где  $H_{СТ}$  – значение напора для стандартного количества ступеней  $z_{СТ} = 100$  при  $Q_B = 58,9$  м<sup>3</sup>/сутки

$$H_{НАС} = 470 \cdot \frac{264}{100} = 1240,8 \text{ м.}$$

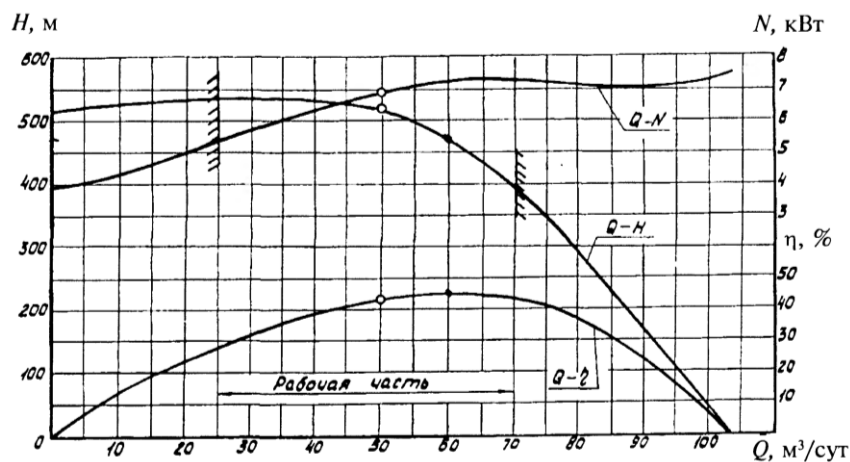


Рисунок 11 – Характеристики насоса ЭЦВ 8-25

Результаты проведенных расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Пересчет напорно-расходных характеристик насоса ЭЦНМ 5–50 для частот  $\omega_1 = 1,1\omega_{НОМ}$  и  $\omega_2 = 0,9\omega_{НОМ}$

$Q_i(\omega_{НОМ}),$ м <sup>3</sup> /сут	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
	25	40	60	70	80
$H_i(\omega_{НОМ}),$ м	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
	1157	1157	1010	860	645
$a_i, \text{сут/м}^2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
	1,8512	0,7231	0,2805	0,7155	0,10078
$Q_i(\omega_1),$ м <sup>3</sup> /сут	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
	27,5	44	66	77	88
$H_i(\omega_1), \text{м}$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
	1399,9	1399,9	1222,1	1040,5	780,4
$Q_i(\omega_2),$ м <sup>3</sup> /сут	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
	22,5	36	54	63	72
$H_i(\omega_2), \text{м}$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
	933,17	937,13	817,93	696,55	522,4

Для данного режима скважины выполнены расчеты по формулам и последовательно определены:

а) забойное давление:

$$N_{ЗБ}^* = N_{ПЛ} - \frac{Q^*}{K} a, \quad (17)$$

$$N_{ЗБ}^* = 15,1 - \frac{0,58 \cdot 10^{-4}}{7,5} 86400 = 14,43 \text{ МПа};$$

б) динамический уровень при данном дебите скважины:

$$H_{\text{дин}}^* = L - \frac{N_{\text{зАБ}}^*}{\rho_{\text{см}} g}, \quad (18)$$

$$H_{\text{дин}}^* = 1919 - \frac{14,43 \cdot 10^6}{779,54 \cdot 9,81} = 32 \text{ м};$$

в) давление на приеме насоса при значении газосодержания  $\Gamma = 0,15$

$$N_{\text{пр}}^* = N_{\text{нас}} (1 - \Gamma), \quad (19)$$

$$N_{\text{пр}}^* = 6,4(1 - 0,15) = 5,44 \text{ МПа};$$

г) глубина подвески насоса по вертикали:

$$H_{\text{подв}}^* = H_{\text{дин}}^* + \frac{N_{\text{пр}}^*}{\rho_{\text{см}} g}, \quad (20)$$

$$H_{\text{подв}}^* = 32 + \frac{5,44 \cdot 10^6}{779,54 \cdot 9,81} = 743,36 \text{ м};$$

д) глубина спуска насоса по оси скважины:

$$L_{\text{сп}}^* = \frac{H_{\text{подв}}^*}{\cos \theta}, \quad (21)$$

$$L_{\text{сп}}^* = \frac{743,36}{\cos 12^\circ} = 765 \text{ м};$$

е) необходимый напор насоса при работе на воде:

$$H_B^* = \left[ L - \frac{10^6}{\rho_{CM} \cdot g} (N_{ЗБ} - N_y) - 160 D_{HKT} \cdot G \cdot (1-b) \cdot (1 - \sqrt[3]{N_y / N_{HAC}}) \right] \cdot K_B^{-1}, \quad (22)$$

$$H_B^* = \left[ 1919 - \frac{10^6}{779,54 \cdot 9,81} (14,43 - 0,49) - 160 \cdot 0,062 \cdot 38,63 \cdot (1 - 0,30) \cdot (1 - \sqrt[3]{0,49/6,4}) \right] \cdot 0,87^{-1} = 106,4^{-1}$$

Вычислены значения коэффициента сопротивления  $R$  и коэффициенты статического напора  $H_{CT}$ :

$$R = \frac{H_B - H_B^*}{Q_B^2 - (Q_B^*)^2}, \quad (23)$$

$$R = \frac{1011,2 - 106,4}{58,9^2 - 5,89^2} = 0,263 \text{ сут}^2 / \text{м}^5,$$

$$H_{CT} = H_B - RQ_B^2 = 1011,2 - 0,263 \cdot 58,9^2 = 97,26 \text{ м.}$$

На рисунке 11 построена рабочая характеристика скважинной магистрали  $H_{СКВ} = f(Q_{СКВ})$  по результатам ее расчетов, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Данные расчета кривой скважины

$Q_{СКВ},$ м <sup>3</sup> /сут	0	5,89	10	20	30	40	50	60	70	80
$H_{СКВ}$ ,м	97,2 6	106,4	1236	202,6	334,3	518,7	755,8	1045,6	1388,1	1783,2

Пересечения этой характеристики с семейством напорно-расходных характеристик в точках А, D, С дает фактические значения напора и дебита, которые обеспечивает насос ЭЦВ 8-25 с частотным преобразователем в системе УЭЦН – скважина на воде в следующем диапазоне частот вращения ротора ЭЦВ 8-25:

$$n_{MAX} = 1,1n_{НОМ},$$

$$n_{MAX} = 1,1 \cdot 2850 = 3135 \text{ об/мин},$$

$$n_{MIN} = 0,9n_{НОМ},$$

$$n_{MIN} = 0,9 \cdot 2850 = 2565 \text{ об/мин}.$$

При этом производительность (или дебит) скважины изменяется от  $Q_{MAX} = 67 \text{ м}^3/\text{сут}$  до  $Q_{MIN} = 53 \text{ м}^3/\text{сут}$  путем снижения напора насоса соответственно от  $H_{MAX} = 1238 \text{ м}$  до  $H_{MIN} = 810 \text{ м}$ . Видно также, что при дроссельном регулировании дебита скважины насос при дебите  $Q_{MIN}$  работает в точке  $B$ , что приводит к возрастанию напора до  $H_B = 1342 \text{ м}$  и соответственно повышению мощности и энергопотребления УЭЦН, в сравнении с частотным регулированием на коэффициенте равный отношению:

$$\frac{H_B}{H_{MIN}} = \frac{1342}{810} = 1,65. \quad (24)$$

о) Находится КПД действующего насоса в скважине

$$\eta_{H.СК} = \eta_{НОМ} \cdot K_\eta, \quad (25)$$

$$\eta_{H.СК} = 0,43 \cdot 0,79 = 0,339.$$

Значения  $K_\eta$  приведены на графике рисунке 12.

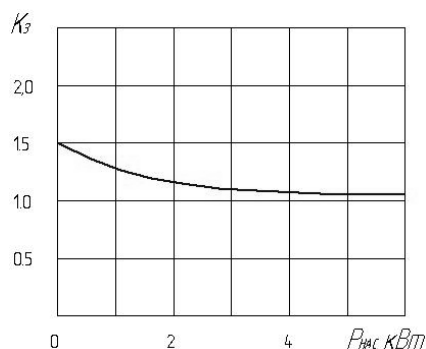


Рисунок 12– Коэффициент запаса для центробежных насосов

Таблица 4– Пределы регулирования скорости и значения  $K_p$  регулируемых систем ЭП

Система ЭП	Пределы регулирования скорости	$K_p$
АД с частотным управлением	$0,1\omega_{НОМ} - 314 \text{ 1/с}$	$1,1\omega_{НОМ} / \omega_{МАХ}$
АД с регулированием напряжения	$(0,5...1)\omega_{НОМ}$	$\Delta P_{2МАХ} / P_{НОМ} \cdot s_{НОМ}$

п) Выбирается типоразмер погружного электрического двигателя, номинальная мощность которого при прочих равных условиях должна составлять не менее  $1,3 P_{п.д.}$ , [14].

р) Выбирается штатный двигатель ЭД22-103 с номинальной мощностью  $P_{ш.д.} = 22 \text{ кВт}$ . Определяется отношение

$$\frac{P_{ш.д.}}{P_{п.д.}} = \frac{22}{14,6} = 1,5.$$

Это отношение должно быть не менее 1,3, что выполняется.

с) Осуществляется проверка разности

$$\Delta P = P_{ш.д.} - P_{п.д.},$$

$$\Delta P = 22 - 14,6 = 7,4 \text{ кВт}.$$

## **6 Расчеты исследования**

### **6.1 Расчёт кабельной линии**

Кабельные линии в установках электроцентробежных насосов предназначены для подачи электроэнергии с поверхности земли (от комплектных устройств и станций управления) к погружному электродвигателю. Данный расчет необходим для определения показателя сечения токопроводящей жилы кабеля, потерь напряжения в кабельной линии [11].

По техническим условиям выбор сечения кабелей осуществляется по нагреву, расчетным токам в 2-х режимах: нормальном и послеаварийном. В том случае, если линия работает параллельно, то в расчете используется ток послеаварийного режима. В таком случае, в числе рабочих остается одна питающая линия.

Производим выбор и расчет кабеля от станции управления до электродвигателя артезианского насоса.

Выбор сечения кабеля по условию нагрева производим по формуле:

$$I_p = \frac{P_D}{\sqrt{\sqrt{3} * U_H * \cos f}}, \quad (26)$$

где  $P_D$  – мощность электродвигателя артезианского насоса, кВт;

$\cos f$  – коэффициент мощности электродвигателя;

$U_H$  – номинальное напряжение сети, кВ.

$$I = \frac{22}{\sqrt{3} * 0,4} = 31,8 \text{ А.}$$

По таблице 1.3.8 [10] ПУЭ принимаем кабель ВПП 3(1×4),  $I_{\text{дл. доп.}} = 36 \text{ А}$ . Расчетное значение тока не должно превышать значение тока стандартного сечения

$$I_p \leq I_{\text{дл.доп}}, \quad (27)$$

$$31,8 \text{ A} \leq 36 \text{ A}.$$

Вывод: по условию нагрева принимаем к установке кабель ВПП 3(1×4).

Расчетный ток принимаем для нормального режима работы, т.е. увеличение токов в послеаварийных и ремонтных режимах сети не учитывается.

$$S = \frac{I_p}{j} \quad (28)$$

где  $j$  – нормативное значение экономической плотности тока, А/мм<sup>2</sup>, находится по таблице 1.3.36 ПУЭ [10].

$$-2,7 \text{ A/мм}^2$$

$$S = \frac{22}{2,7} = 8,1 \text{ мм}^2$$

Сечение, полученное в результате, округляется, до ближайшего стандартного сечения.

Вывод: по условию экономической плотности тока принимаем кабель марки ВПП 3(1×10).

Вывод: окончательно принимаем к установке кабель ВПП 3(1×10).

Проверка выбранного сечения на условие потери напряжения проводится по следующей формуле. Потери напряжения не должны превышать 5 %.

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100 \%}{U_H} \cdot (r_0 \cdot \cos f + x_0 \cdot \sin f), \% \quad (29)$$

где  $I_p$  – расчетный ток, А;

$L$  – длина кабеля от станции управления до артезианского насоса, км;



$U_n$  – номинальное напряжение сети, В;

$r_0, x_0$  – активное и индуктивное сопротивления (берутся из таблицы 1.9.5 [10]), мОм/м;  $r_0 = 1,84$ ;  $x_0 = 0,0612$ .

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 22,0 \cdot 0,11 \cdot 100 \%}{400} \cdot (1,84 \cdot 0,8 + 0,099 \cdot 0,6) = 0,21 \%$$

Вывод:  $0,21 \leq 5 \%$ , выбранный проводник удовлетворяет условиям проверки на потерю напряжения в линии и принимается к установке.

В итоге к установке от станции управления до артезианских насосов принимается кабель ВПП 3(1×10).

## 6.2 Выбор трансформатора и расчёт потерь напряжения

Трансформаторы ТМГ предназначены для питания установок общего назначения сети переменного тока напряжением 380 или 6000В, частотой 50Гц.

Основные параметры трансформаторов данной серии приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры трансформаторов ТМГ

Параметры	ТМГ 40/6	ТМГ 63/6	ТМГ 100/6
Номинальная мощность, кВА	40	63	100
Напряжение х. х. вторичной обмотки	370–495	391–1023	475–736
Потери х. х., кВт	0,19	0,265	0,365
Потери к. з., кВт	0,88	1,28	1,97
Ток х. х., %	3	2,8	2,6
Напряжение к. з., %	5,5	5,5	5,5

Во избежание магнитного насыщения и увеличения потерь встали, требуется регулирование магнитного потока, в том числе с изменением напряжения, которое подается к трансформатору.

Знание параметров выходной энергии силового трансформатора необходимо при выборе его типоразмера.

$$U_1 = U_{HK} = 490,7 \text{ В}, \quad (30)$$

типовую мощность

$$S_{тип} = S_{вэщн} = 47 \text{ кВА}. \quad (31)$$

По параметрам типовой мощности  $S_{тип}$  и напряжению  $U_1$  выбирается трансформатор типа ТМГ 63/6 со следующими показателями: номинальная мощность – 63 кВА, напряжение холостого хода на стороне выходной обмотки, регулируемым ступенчато – от 391 до 1023 В.

Параметры трансформатора приведены в таблице 6.

Таблице 6 – Параметры трансформатора ТМГ 63/6

Тип	Потери холостого хода, кВт	Ток холостого хода, %	Потери короткого замыкания, кВт	Напряжение короткого замыкания, %
ТМГ 63/6	0,265	2,8	1,28	5,5

Величина потерь активной мощности в трансформаторе:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot k_3^2 = 0,265 + 1,28 \cdot 0,75^2 = 0,496 \text{ кВт}, \quad (32)$$

где  $\Delta P_{xx} = 0,265$  – потери холостого хода (потери в стали);

$\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания, примерно равные потерям в обмотках;

$k_3$  – коэффициент загрузки трансформатора (отн. ед). Это отношение фактической нагрузки трансформатора к его номинальной мощности:

$$k_3 = \frac{S_{\text{ТИП}}}{S_{\text{НОМ}}},$$

$$k_3 = \frac{47 \cdot 10^3}{63 \cdot 10^3} = 0,75,$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{\text{XX}} + \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot k_3^2,$$

$$\Delta P_T = 0,265 + 1,28 \cdot 0,75^2 = 0,496.$$

Величина потерь реактивной мощности в трансформаторе:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{\text{НОМ}} + \Delta Q_{\text{РАС}} \cdot k_3^2, \quad (33)$$

$$\Delta Q_T = 1,76 + 5,5 \cdot 0,75^2 \approx 2,38 \text{кВАр},$$

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = \frac{I_{\text{XX}}(\%)}{100(\%)} \cdot S_{\text{НОМ}}, \quad (34)$$

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = \frac{2,8}{100} \cdot 63 \approx 1,76 \text{кВАр},$$

$$\Delta Q_{\text{РАС}} = \frac{U_{\text{КЗ}}(\%)}{100(\%)} \cdot S_{\text{НОМ}}, \quad (35)$$

$$\Delta Q_{\text{РАС}} = \frac{5,5}{100} \cdot 63 \approx 3,46 \text{кВАр},$$

где  $\Delta Q_{НОМ}$  – потери реактивной мощности на намагничивание;

$\Delta Q_{РАС}$  – потери реактивной мощности рассеяния в трансформаторе при номинальной нагрузке;

$S_{НОМТР}$  – номинальная мощность трансформатора.

Определяется активное сопротивление трансформатора

$$R'_{TP} = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{НОМ(ПЕРВ)}^2}{S_{НОМ}^2}, \quad (36)$$

$$R'_{TP} = \frac{1,28 \cdot 10^3 \cdot (0,38 \cdot 10^3)^2}{(63 \cdot 10^3)^2} \cong 0,046 \text{ Ом},$$

Потери напряжения в трансформаторе:

$$\Delta U_{TP} = \frac{P_{TP} \cdot R_{TP} + Q_{TP} \cdot X_{TP}}{U_1}, \quad (37)$$

$$\Delta U_{ОБ} = \frac{31,77 \cdot 10^3 \cdot 4,6 \cdot 10^{-2} + 15,64 \cdot 10^3 \cdot 8,8 \cdot 10^{-2}}{380} = 6,25 \text{ В},$$

где  $P_{TP} = P_{VЭЦН}$ ;  $Q_{TP} = Q_{VЭЦН}$  – активная и реактивная составляющие типовой мощности трансформатора.

Количество потерь напряжения на высокой стороне трансформатора

$$\Delta U_{TP.B} = 6,25 \cdot \frac{859}{380} = 14,07 \text{ В}$$

Напряжение холостого хода равно  $U_{xx} = 824B$ .

$$U_{TP.PACЧ}^{XX} = U_{д.н.} + \Delta U_{л} + \Delta U_{TP} \quad (38)$$

$$U_{TP.PACЧ}^{XX} = 750 + 40,7 + 14,07 = 804,77 B$$

Производятся вычисления показателя отклонения напряжения на двигателе

$$\delta U_1 = \frac{U_{xx} - \Delta U_{л} - \Delta U_{TP.B} - U_{дв}}{U_{дв}} \cdot 100\%, \quad (39)$$

$$\delta U_1 = \frac{824 - 40,7 - 14,07 - 750}{750} \cdot 100\% = 2,6 \%$$

Полученное значение менее 5 %, что находится в допуске.

### **6.3 Расчёт автономного инвертора напряжения пч для погружного асинхронного**

Схема частотного преобразователя с автономным инвертором напряжения представлена в приложении Д.

Для управления асинхронным короткозамкнутым двигателем, в преобразователе применена распространенная схема ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения на выходе, неуправляемым выпрямителем на входе силовой части схемы и микропроцессорным управлением [16].

Далее приведен расчет преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения [2], выполненный на основе гибридных модулей, состоящих из ключей IGBT и обратных диодов FWD, смонтированных в одном корпусе на общей тепловыводящей пластине.

Максимальный ток через транзисторные IGBT ключи инвертора определяется из выражения:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{I_{C.MAX}}{\sqrt{2}} \right) \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_{УЭЦН} + n \cdot P_T}{U_d} \quad (40)$$

$$I_{C.MAX} = \frac{\sqrt{2} \cdot 21,77 \cdot 10^3 \cdot (1,2 \dots 1,5) \cdot (1,1 \dots 1,2)}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,68 \cdot 0,98 \cdot 0,8} = 114,7 \dots 157,6 \text{ А,}$$

где  $k_1 = 1,2 \dots 1,5$  – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току;

$k_2 = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока;

$\eta$  – КПД электродвигателя с учетом кабельной линии:

$$\eta = \frac{P_{ПОЛ}}{P_{НОМ} + \Delta P_L}, \quad (41)$$

$$\eta = \frac{14,6}{19,88 + 1,67} = 0,68,$$

$$\eta_{ТР} = \frac{P_{ТР}}{P_{ТР} + \Delta P_T} = \frac{21,77 \cdot 10^3}{21,77 \cdot 10^3 + 0,496 \cdot 10^3} = 0,98,$$

где  $\eta_{ТР}$  – КПД трансформатора;

$\cos \varphi_{УЭЦН}$  – коэффициент мощности установки УЭЦН с кабельной линией.

$$\cos \varphi_{УЭЦН} = \frac{P_{НОМ} + \Delta P_L}{S_\Sigma} = \frac{19,88 + 1,67}{27} = 0,8, \quad (42)$$

где  $P_{УЭЦН}$  – потребляемая мощность установки ЭЦН с учетом потерь в кабельной линии;

$U_1$  – напряжение на приемной стороне промышленного трансформатора.

Среднее выпрямленное напряжение:

$$U_d = k_{HC} \cdot U_1, \quad (43)$$

$$U_d = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В.}$$

где  $k_{HC}$  – схемный коэффициент.

Ключи IGBT подбираются с постоянным (номинальным) током коллектора  $I_C \geq I_{C,MAX}$  и с постоянным напряжением коллектор-эмиттер  $U_{CE} \geq U_d$ .

Выбран модуль (полумост) IGBT фирмы Mitsubishi третьего поколения CM200D-Y-12H с соответствующими характеристиками.

Потери IGBT в проводящем состоянии:

$$P_{SS} = I_{CP} \cdot U_{CE(SAT)} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \theta \right) \quad (44)$$

$$P_{SS} = 105 \cdot 2,5 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3 \cdot \pi} \cdot 0,8 \right) = 54 \text{ Вт,}$$

где  $I_{CP}$  – максимальная амплитуда тока на входе инвертора, равная:

$$I_{CP} = \frac{I_{C,MAX}}{k_1} = \frac{157,6}{1,5} = 105 \text{ А,} \quad (45)$$

где  $U_{CE(SAT)}$  – прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном состоянии при  $I_{CP}$  и  $T_j = 125^\circ\text{C}$ , типовое значение составляет 2,1 В;

$D$  – максимальная скважность IGBT ключа примерно равная 0,95;

$\cos \theta \approx \cos \varphi_{уэщн} = 0,8$  – коэффициент мощности погружной электроцентробежной насосной установки.

Потери IGBT при коммутации составляют:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(I_{CP} \cdot U_{CC}) \cdot (t_{C(ON)} + t_{C(OFF)}) \cdot f_{SW}}{2}, \quad (46)$$

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{(105 \cdot 513) \cdot (0,55 + 0,60) \cdot 10^{-6} \cdot 5000}{2} = 34,98 \text{ Вт},$$

$t_{C(ON)}$ ,  $t_{C(OFF)}$  – продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открывание ( $t_{C(ON)}$ ) и закрывание ( $t_{C(OFF)}$ ).

$$t_{C(ON)} \approx t_R = 0,55 \text{ мкс};$$

$$t_{C(OFF)} \approx t_{d(OFF)} + t_f = 0,30 + 0,30 = 0,60 \text{ мкс}, \quad (47)$$

где  $U_{CC}$  – напряжение на коллекторе IGBT, равное коммутируемому напряжению  $U_d$  звена постоянного тока для системы АИН – ШИМ.

$$U_{CC} = U_d = 513 \text{ В};$$

Суммарные потери IGBT составляют:

$$P_Q = P_{SS} + P_{SW}, \quad (48)$$

$$P_Q = 54 + 34,98 = 88,98 \text{ Вт}.$$



Максимально допустимое переходное сопротивление «охладитель – окружающая среда»  $R_{th(f-a)}$  в расчеты на пару IGBT/FWD («транзистор – обратный диод»)

$$R_{th(f-a)} \leq \frac{T_C - T_A}{P_T} - R_{th(c-f)}, \quad (49)$$

$$R_{th(f-a)} \leq \frac{100 - 47}{153,18} - 0,13 = 0,216 \text{ } ^\circ\text{C/Вт},$$

где  $T_A = 45 \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$  – температура охлаждающего воздуха;

$T_C = 90 \dots 110 \text{ } ^\circ\text{C}$  – температура теплопроводящей пластины;

$P_T$  – суммарная мощность, рассеиваемая парой IGBT/FWD части модуля, Вт;

$R_{th(c-f)}$  – термическое переходное сопротивление «корпус-поверхность теплопроводящей пластины модуля» в расчете на пару IGBT/FWD модуля (0,13  $^\circ\text{C/Вт}$ ).

Температура кристалла обратного диода FWD:

$$T_{jd} = T_C + P_D \cdot R_{th(j-c)d}, \quad (50)$$

$$T_{jd} = 100 + 62,4 \cdot 0,35 = 121,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $R_{th(j-c)d}$  – термическое переходное сопротивление «кристалл-корпус» для FWD части модуля (0,35  $^\circ\text{C/Вт}$ ).

При условии ( $T_{jd} \leq 125 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) - не нужно улучшать теплоотдачу за счет эффективности охладителя с меньшим значением сопротивления  $R_{th(f-a)}$ .

## 6.4 Расчёт выпрямителя

Усредненная величина выпрямленного напряжения  $U_d$  (3-хфазный мостовой выпрямитель) была определена ранее и составила 513В. Максимальное значение среднего выпрямленного тока составило:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{I_{CMAX}}{\sqrt{2}} \right) \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_{\text{вЭЦН}} + n \cdot P_T}{U_d} \quad (51)$$
$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{157,6}{\sqrt{2}} \right) \cdot 380 \cdot 0,8 + 6 \cdot 153,18}{513} = 116,37 \text{ А,}$$

где  $n$  – количество пар IGBT/FWD в инверторе.

Максимальный рабочий ток диода равен:

$$I_{VM} = k_{CC} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 116,37 = 121,6 \text{ А,} \quad (52)$$

где  $k_{CC} = 1,045$  для мостовой трехфазной схемы при оптимальных параметрах Г-образного LC-фильтра, установленного на выходе выпрямителя.

Максимальное обратное напряжение диода вычисляется по формуле:

$$U_{VM} = \sqrt{2} \cdot k_{ZH} \cdot U_1 \cdot k_{CH} \cdot k_C + \Delta U_{II}, \quad (53)$$
$$U_{VM} = \sqrt{2} \cdot 1,15 \cdot 380 \cdot 1,35 \cdot 1,1 + 150 = 1065 \text{ В,}$$

где  $k_C \geq 1,1$  – коэффициент допустимого повышения напряжения сети;

$k_{ZH} \geq 1,15$  – коэффициент запаса по напряжению;

$\Delta U_{II} \approx 100 \dots 150$  В – запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока;

$k_{CH} = 1,35$  – коэффициент схемы для номинальной нагрузки.

Для расчета взят диодный модуль RM250DZс током  $I_{FAV} = 250 \text{ А}$  и напряжением  $U_{RRM} = 1600 \text{ В}$  (16-й класс). Из трех диодных модулей реализуется мостовая схема трехфазного выпрямителя(рисунок13)[10].

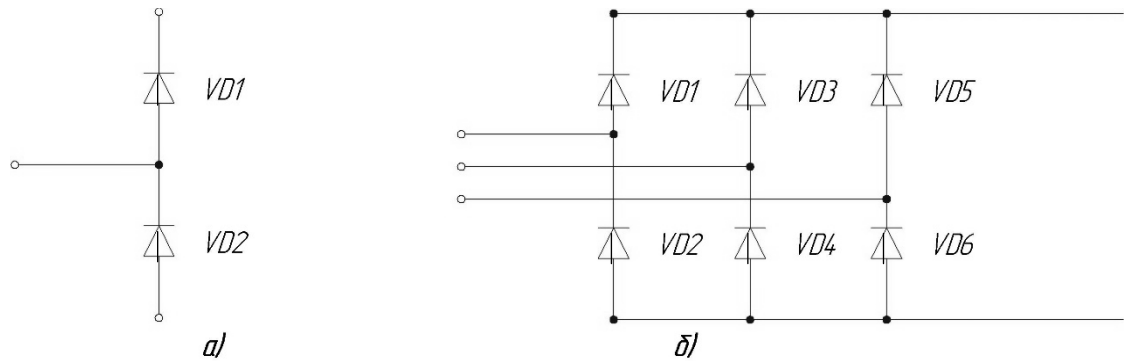


Рисунок 13– а) схема диодного модуля;  
б) схема трехфазного выпрямителя

Расчет потерь мощности в выпрямителе для установившегося режима работы преобразователя частоты составляет:

$$P_{DV} = m_V \cdot k_{CS} \cdot \left( U_j + R_{ON} \cdot \frac{I_{dM}}{k_1} \right) \cdot \frac{I_{dM}}{k_1} , \quad (54)$$

$$P_{DV} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{116,37}{1,5} = 268,6 \text{ Вт},$$

где  $k_{CS} = 0,577$  – для мостовой трехфазной схемы;

$R_{ON}$  – динамическое сопротивление полупроводникового диода в проводящем состоянии, Ом;

$U_j$  – прямое падение напряжения, В, на полупроводниковом приборе

при значении тока 50 мА; для диода  $\left( U_j + R_{ON} \cdot \frac{I_{dM}}{k_1} \right) \leq 1 \text{ В};$

$m_v$  – число полупроводниковых диодов в схеме выпрямителя,  $m_v = 6$ .

В процессе установки модуля выпрямителя и модуля инвертора на общий охладитель показатель необходимого сопротивления определяется:

$$R_{th(f-a)} = \frac{R_{th(f-a)1} \cdot R_{th(f-a)2}}{R_{th(f-a)1} + R_{th(f-a)2}}, \quad (55)$$

$$R_{th(f-a)} = \frac{0,216 \cdot 0,111}{0,216 + 0,111} = 0,073 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

### 6.5 Расчёт фильтра выпрямителя

Коэффициент пульсации на входе фильтра (отношении амплитуды пульсации к среднему значению напряжения):

$$q_{1BX} = \frac{2}{(m_2 \cdot p)^2 - 1}, \quad (56)$$

$$q_{1BX} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057,$$

где  $m_2 \cdot p = 6$  – пульсность выпрямителя по трехфазной мостовой схеме.

Параметр сглаживания  $LC$  – фильтра:

$$L_0 C_0 = \frac{s + 1}{(2 \cdot \pi \cdot m_2 \cdot p \cdot f_s)^2}, \quad (57)$$

где  $s$  – коэффициент сглаживания, принимающий значения от 3 до 12;

$f_s$  – частота сети, Гц.

$$L_0 C_0 = \frac{3+1}{(2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 50)^2} = 1,1 \cdot 10^{-6}.$$

Останавливаемся на значении  $s = 3$ . Индуктивность дросселя  $k_M = 0,95$ , для обеспечения коэффициента мощности на входе выпрямителя, определяется при соблюдении следующих условий:

$$L_0 \geq 3 \cdot L_{0MIN} = 0,405 \text{ мГн},$$

$$L_{MIN} \approx \frac{0,013 \cdot U_1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot I_d}, \quad (58)$$

где  $I_d$  – номинальный средний ток звена постоянного тока, равный  $\approx 116,37\text{А}$ .

$$L_{MIN} \approx \frac{0,013 \cdot 380}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 116,37} = 0,135 \text{ мГн}.$$

Устанавливается стандартное значение  $L_0 = 0,15 \text{ мГн}$ .

Емкость конденсатора  $C_{02}$ , необходимая для возврата реактивной энергии в конденсатор, определяется следующим образом:

$$C_{02} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{SM1} \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot U_1 \cdot f_{sw} \cdot q_1}, \quad (59)$$

где  $I_{SM1}$  – амплитудное значение тока в обмотке низшего напряжения трансформатора, близкое максимальному значению тока через IGBT ключ инвертора (157,6А);

$\varphi_1$  – угол сдвига между первой гармоникой фазового напряжения и фазового тока, около  $\text{arcCos}\varphi_{\text{вЭЦН}} = 36^\circ$  (т.к.  $\text{Cos}\varphi_{\text{вЭЦН}} = 0,8$ );

$q_1$  – коэффициент пульсации, определяемый по выражению:

$$q_1 = \frac{q_{1\text{ВХ}}}{s} = \frac{2}{[(m_2 \cdot p)^2 - 1] \cdot s} = \frac{2}{[(3 \cdot 2)^2 - 1] \cdot 3} = 0,019, \quad (60)$$

где  $f_{\text{sw}}$  – частота ШИМ, ранее принята 5000 Гц.

$$C_{02} = \frac{\sqrt{3} \cdot 157,6 \cdot \text{Sin}^2\left(\frac{36}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot 380 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2}} = 360,5 \text{ мкФ.}$$

Емкость конденсатора  $C_{02}$ , необходимого для реализации LC-фильтра:

$$C_{02} = \frac{L_0 C_0}{L_0}, \quad (61)$$

$$C_{02} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{0,405 \cdot 10^{-3}} = 2716 \text{ мкФ.}$$

Для практических целей использования фильтра, применяют конденсаторы с малым значением емкости  $C_{01}$ ,  $C_{02}$ , т.е. равной 2716 мкФ.

Амплитуда тока через конденсаторы фильтра на частоте пульсаций выпрямленного тока (1-ой гармонике) равна:

$$I_{\text{Com}} = q_1 \cdot U_1 \cdot 2\pi m_2 p \cdot f_s \cdot C_{01}, \quad (62)$$

$$I_{\text{Com}} = 0,019 \cdot 380 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 2716 \cdot 10^{-6} = 37 \text{ А.}$$

## 6.6 Расчёт снаббера

Напряжение  $U_{CE}$  резкоповышается и достигает критического уровня, ввиду того что IGBT коммутируется с большой скоростью. Такой уровень напряжения способен привести к пробое коллектора или затвора транзистора. Чтобы снизить перенапряжение и не допустить экстренных случаев, нужно установить снаббер (демпфирующую цепь). Схемы строения снабберов и их характеристики представлены в таблице 7.

Конденсатор выбирается высокочастотный, с высокими значениями предельных импульсных токов и малым  $\text{tg}$  угла потерь (К78–2, Э63К).

Сопротивление резистора при этом зависит от емкости конденсатора ( $C$ ) и частоты коммутации IGBT ( $f_{sw}$ ). Выражения для расчета мощности выбранного резистора:

- схемы 2, 3 и 5 из табл.7:

$$P = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw}; \quad (63)$$

- схема 4 из табл.7:

$$P = 0,5 \cdot C \cdot (U + \Delta U)^2 \cdot f_{sw}, \quad (64)$$

где  $U$  – напряжение в системе «коллектор – эмиттер» в установленном режиме, равное напряжению звена постоянного тока преобразователя системы АИН ШИМ;

$\Delta U$  – перенапряжение (рис. 14).

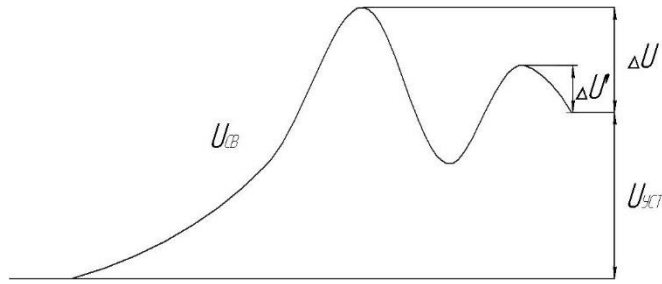


Рисунок 14– Напряжение «коллектор-эмиттер»  
на IGBT транзисторе при выключении

Величина сопротивления устанавливается исходя из минимума колебаний тока коллектора при включении IGBT:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L_{Sn}}{C}}, \quad (65)$$

где  $L_{Sn}$  – индуктивность цепей снаббера ( $\leq 10 \text{ нГн}$ ).

Емкость конденсатора снаббера определяется значением второго скачка напряжения ( $\Delta U' \leq 20\text{--}25 \text{ В}$ ). Значение индуктивности проводов между электролитическим конденсатором и IGBT модулем равна  $L_1$ , а отключаемый ток равен  $I_C$ . Расчет емкости:

$$C = L_1 \cdot \left( \frac{I_C}{\Delta U'} \right)^2 \quad (66)$$

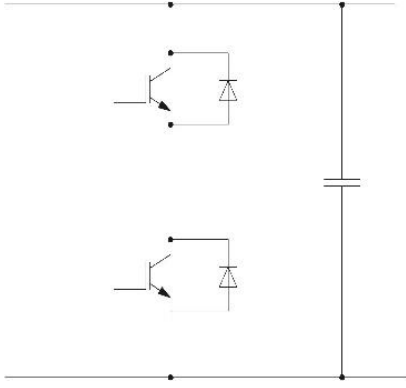
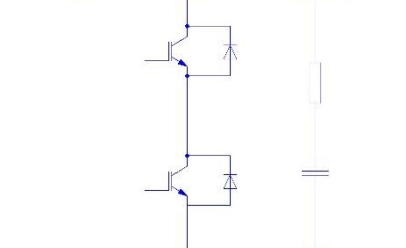
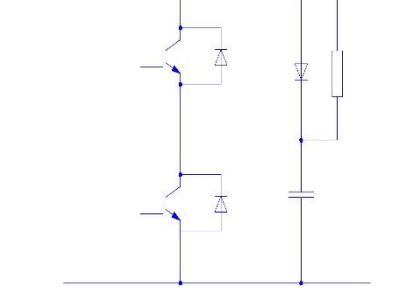
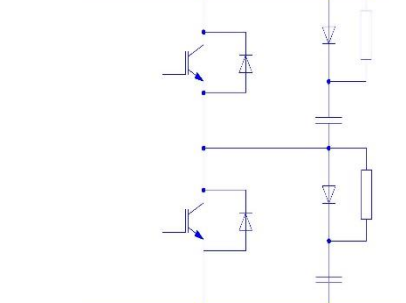
Установив модуль и определив перенапряжение, можно точно определить емкость.

Стандартное значение  $C$  (демпфирующей цепи) =  $1 \text{ мкФ} / 100 \text{ А}$  коммутируемого транзистором IGBT тока.

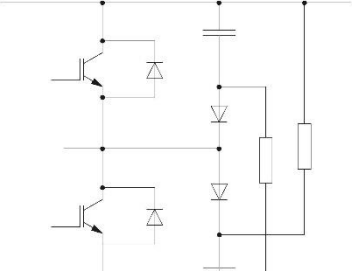


Исходя из величины тока ( $I_{Cmax} = 157,6 \text{ A}$ ) выбирается  $C_{\text{снаббера}} = 2 \text{ мкФ}$ , и применяются высокочастотный конденсатор К78-2 (два параллельно соединенных конденсатора 1 мкФ/600В).

Таблица 7 – Типичные схемы снабберов и их особенности

Схема	Особенности
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– малый набор элементов;</li> <li>– короткий провод снаббера (демпфирующей цепи);</li> <li>– высокие пульсации тока через электролитический конденсатор;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– малый набор элементов;</li> <li>– провод снаббера длиннее, чем в схеме 1;</li> <li>– низкие пульсации тока через электролитический конденсатор;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– малый набор элементов;</li> <li>– малые потери мощности;</li> <li>– подходит для средней и малой емкости конденсатора;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Большое количество элементов;</li> <li>– Высокие потери;</li> <li>– перенапряжение может быть эффективно ограничено;</li> </ul>

## Продолжение таблицы 7

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Большое количество элементов;</li> <li>– Малые потери;</li> <li>– подходит для большой емкости конденсатора.</li> </ul>
---	--

Сопротивление резистора:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L_{Sn}}{C}}, \quad (67)$$

$$R \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-6}}} \geq 0,15 \text{ Ом.}$$

Мощность резистора по схеме 3 из табл.7.

$$P = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw}, \quad (68)$$

где  $\Delta U = 60\text{В}$ ;

$$P = 0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 18 \text{ Вт.}$$

Таким образом, для установления показателя эквивалентного напряжения, равного 0,15 Ом (мощность 20 Вт), необходимо использование резистора снаббера, состоящего из 10 параллельно соединенных 2-х ваттных сопротивлений (МЛТ 1,5 Ом  $\pm$  10 %).

### 6.7 Выходной фильтр для пч

Предназначен для подавления высокочастотных гармоник несущей частоты 3-х фазного выходного напряжения станций управления с частотным регулированием. LC-фильтр включается между выходами СУ с частотным

регулирующим и повышающим трансформатором. Номинальный ток фильтра должен соответствовать номинальному выходному току частотного преобразователя. Ниже приводятся технические данные на выходные фильтры, производимые ОАО «Электон» для скважинных установок для добычи питьевой воды. Общая схема синусного фильтра представлена в приложении Е.

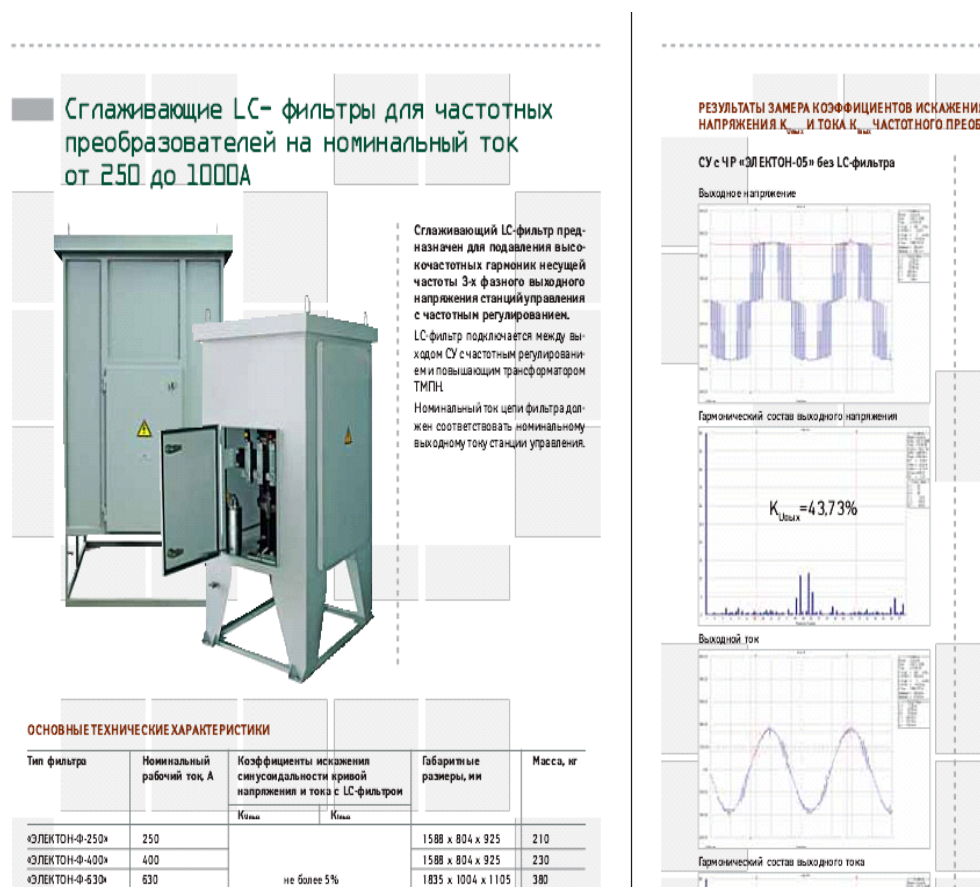


Рисунок 15– Технические данные выходных фильтров ОАО «Электон» для скважинных установок с частотным регулированием

## 6.8 Экономический расчёт

В данном разделе произведен экономический расчёт эффективности замены насосов в УЭЦН в 2 скважинах. Старые насосы заменены на новые с большей производительностью. Также учитывается замена кабельной линии и насосных труб. Следует произвести расчет себестоимости добычи воды, экономической эффективности капитальных вложений, а также рассчитать

срок окупаемости этих вложений. В таблице 8 приведены основные экономические показатели.

Таблица 8 – Исходные данные для расчёта экономической эффективности

Показатель	Обозначение	Значение
Объем добычи питьевой воды до мероприятия, т.	$Q_d$	292010
Объем добычи воды после мероприятия, т.	$Q_p$	310047,72
Цена 1 тонны воды, руб.	$C$	42
Затраты на производство продукции, руб;		109723941
– затраты на электроэнергию;	$Z_{ЭЛ}$	17874266
– затраты на подготовку воды;	$Z_{ПОДГ}$	2457711
– затраты на перекачку воды;	$Z_{ПЕР}$	1929077
– затраты на восполнение минерально-сырьевой базы.	$Z_{ВМСБ}$	81777
Норма амортизации, %		
– насос	$H_N$	2
– НКТ	$H_{НКТ}$	12
– кабель	$H_K$	13,6
Социальные отчисления, %		34
Часовая тарифная ставка, руб./час:		
– машинист насосной станции 3 раз.	$C_i$	14,04
Стоимость машино-часа, руб./час:		
– подъёмник А-50	$C_{Чi}$	164,12
– трубовоз ЗИЛ-131		85,10
Время проведения одного ПРС, час	$t$	35,7
Премия, %	$П_{ПР}$	100

Продолжение таблицы 8

Районный коэффициент, %	РК	15
Время использования спец. техники во время ПРС, час:		35,7
– подъёмник А-50	t	8
– трубовоз ЗИЛ-131		6

Для определения экономической эффективности определим годовой экономический эффект по формуле:

$$\mathcal{E}_Г = \mathcal{E}_{\text{ЭКСП}} - \mathcal{Z}_t \cdot e_H, \quad (69)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ЭКСП}}$ – эффект в сфере эксплуатации;

$\mathcal{Z}_t$ – общие затраты на проведение мероприятия;

$e_H$ – коэффициент эффективности капитальных вложений..

Для расчёта годового эффекта от проведения мероприятия необходимо определить эффект в сфере эксплуатации и затраты на проведение мероприятия. Эффект с сфере эксплуатации определим по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ЭКСП}} = P_T - \mathcal{Z}_{\text{ДОП}} \pm \Delta A, \quad (70)$$

где  $P_T$ – стоимостная оценка результатов мероприятия;

$\mathcal{Z}_{\text{ДОП}}$ – затраты связанные с дополнительной добычей питьевой воды;

$\Delta A$ – разница амортизационных отчислений до и после проведения мероприятия.

Стоимостная оценка результатов мероприятия рассчитывается по формуле:

$$P_T = C \cdot \Delta Q_{\text{ДОП}}, \quad (71)$$

где  $C$  – цена одной тонны воды;

$\Delta Q_{\text{ДОП}}$  – годовой прирост добычи воды.

$$\Delta Q_{\text{ДОП}} = Q_{\text{П}} - Q_{\text{Д}},$$

$$\Delta Q_{\text{ДОП}} = 310047,72 - 292010 = 18037,72 \text{ м},$$

$$P_T = 42 \cdot 18037,72 = 552678,2 \text{ руб.}$$

Затраты связанные с дополнительной добычей воды:

$$Z_{\text{ДОП}} = Z_{\text{ПЕР}} \cdot \Delta Q_{\text{ДОП}},$$

где  $Z_{\text{ПЕР}}$  – условно-переменные затраты на добычу одной тонны воды;

$$Z_{\text{ПЕР}} = \frac{Z_{\text{ЭЛ}} + Z_{\text{ПОДГ}} + Z_{\text{ПЕРЕКАЧ}} + Z_{\text{ВМСБ}}}{Q_{\text{Д}}},$$

где  $Z_{\text{ЭЛ}}$  – затраты на электроэнергию;

$Z_{\text{ПОДГ}}$  – затраты на подготовку воды;

$Z_{\text{ПЕРЕКАЧ}}$  – затраты на перекачку воды;

$Z_{\text{ВМСБ}}$  – затраты на восполнение минерально-сырьевой базы.

$$Z_{\text{ПЕР}} = \frac{17874266 + 2457711 + 1929077 + 81777}{292010} = 92,28 \text{ руб / м},$$

$$Z_{\text{ДОП}} = 92,28 \cdot 18037,72 = 1028250,2 \text{ руб.}$$

Для определения разницы амортизационных отчислений рассчитаем амортизационные отчисления до мероприятия  $A_{ГД}$  и после мероприятия  $A_{ГП}$ , данные берем из таблицы 9.

Таблица 9 – Стоимость подземного оборудования

N скв.	Тип насоса		Стоимость, руб			
	До мероприятия	После мероприятия	Насоса		НКТ 2", $S_{НКТ}$	
			До мероприятия, $S_{Н.Д}$	После мероприятия, $S_{Н.П}$		
1	ЭЦН 10-16-110	ЭЦВ 8-25-180	201030	206955	192192	

$$A_{ГД} = \frac{S_{Н.Д} \cdot H_{Н} + S_{НКТ} \cdot H_{НКТ} \cdot S_{К} \cdot H_{К}}{100},$$

где  $S_{Н.Д}$  – стоимость насосов до мероприятия;

$H_{Н}$  – норма амортизационных отчислений для насосов;

$S_{НКТ}$  – стоимость НКТ;

$H_{НКТ}$  – норма амортизационных отчислений для НКТ;

$S_{К}$  – стоимость кабеля;

$H_{К}$  – норма амортизационных отчислений для кабеля.

$$A_{ГД} = \frac{2106930 \cdot 2 + 1841280 \cdot 12 \cdot 825600 \cdot 13.6}{100} = 564997,5 \text{ руб.},$$

$$A_{ГП} = \frac{S_{Н.П} \cdot H_{Н} + S_{НКТ} \cdot H_{НКТ} \cdot S_{К} \cdot H_{К}}{100},$$

где  $S_{Н.П}$  – стоимость насосов после мероприятия;

$H_{Н}$  – норма амортизационных отчислений для насосов;

$S_{НКТ}$  – стоимость НКТ;

$H_{НКТ}$  – норма амортизационных отчислений для КНТ;

$S_K$  – стоимость кабеля;

$H_K$  – норма амортизационных отчислений для кабеля.

$$A_{ГД} = \frac{2247655 \cdot 2 + 1841280 \cdot 12 \cdot 825600 \cdot 13.6}{100} = 580477,25 \text{ руб.},$$

$$\Delta A = A_{ГП} - A_{ГД}, \quad (72)$$

$$\Delta A = 580477,25 - 564997,5 = 15479,75 \text{ руб.}$$

Далее мы можем рассчитать эффект в сфере эксплуатации.

$$\mathcal{E}_{\text{ЭКСП}} = 5526789,2 - 102825,2 - 15479,75 = 5422416,25 \text{ руб.}$$

Имея капитальные затраты и общие затраты на проведение мероприятия, мы можем определить экономический годовой эффект.

$$\mathcal{E}_Г = 5422416,25 - 504742,50 \cdot 0,15 = 5346704,72 \text{ руб.} \quad (73)$$

Так же рассчитаем себестоимость добычи воды до и после проведения мероприятия.

$$C_{Д} = \frac{Z_{П}}{Q_{Д}},$$

$$C_{Д} = \frac{109723941}{242120} = 47,18 \text{ руб/т.}$$



$$C_{\Pi} = \frac{C_{\text{Д}} \cdot Q_{\text{Д}} + Z_{\text{ДОП}} + Z_{\text{МЕР}} + \Delta A}{Q_{\text{Д}} + \Delta Q_{\text{ДОП}}},$$

$$C_{\Pi} = \frac{45,18 \cdot 242120 + 102825,2 + 19361 + 1547,75}{242120 + 1114,72} = 45,61 \text{ руб/т},$$

$$\Delta C = C_{\Pi} - C_{\text{Д}},$$

$$\Delta C = 45,61 - 47,18 = -1,57 \text{ руб/т}.$$

Срок окупаемости замены новых насосов, НКТ и кабеля составит:

$$T = \frac{K}{\Delta C},$$

$$T = \frac{491453}{5346704,72} = 0,09 \text{ г}.$$

Вывод: в результате мероприятий по замене насосов на 2 скважинах дополнительная добыча воды составила 11142,72 т/год. Себестоимость добычи одной тонны воды снизилась на 1,57 руб. Экономический годовой эффект составил 5346704,72 руб, а срок окупаемости 0,09 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной выпускной квалификационной работе было разработано оборудование установки электроцентробежного насоса (УЭЦН), применяемой на артезианских скважинах для добычи воды.

В пояснительной записке был произведен выбор погружного электродвигателя (ПЭД), электроцентробежного насоса (ЭЦН), расчет кабельной линии, трансформатора и частотного преобразователя. Было проведено сравнение российских и зарубежных технологий и рассмотрены требования к оборудованию ЭЦВ, а также приведен экономический расчет.

В экономическом разделе были рассчитаны затраты и показатели экономической эффективности по замене насосов на 2 скважинах, которые подтверждают эффективность капиталовложений.

Таким образом, на основании всего вышесказанного мы можем сделать следующие основные выводы:

- а) УЭЦН – представляет собой сложный ЭТК, состоящий из взаимодействующих физически разнородных подсистем.
- б) Применяемые к установке на артезианских скважинах силовые трансформаторы типа ТМГ имеют ряд преимуществ: отсутствие необходимости проводить отбор проб масла; сокращение расходов на предпусковые работы; минимизация затрат на эксплуатацию; сокращение профилактических работ.
- в) Положительными моментами применения СУиЗ «Лоцман+» являются: гибкая настройка защит; настройка станции не требует дополнительного оборудования и высокой квалификации; невысокая стоимость.
- г) Основным из перспективных направлений развития оснащения артезианских скважин является применение частотных преобразователей для регулирования, управления и соблюдением режимов энергосбережения.

- д) Основными преимуществами частотного регулирования являются автоматизация производственных процессов, экономичность, высокое качество получаемой продукции, надежность и долговечность работы системы за счет снижения пусковых токов, устранения перегрузок.
- е) Применение в качестве электропреобразователя регулятора частоты вращения вала ЦН повышает надежность УЭЦН в 2–3 раза.
- ж) В ходе подбора параметров УЭЦН были определены: плотность системы «вода - газ» на участке «забой – прием насоса», забойное давление, глубина расположения динамического уровня, давление на приеме насоса, глубина подвески насоса, глубина спуска насоса, температура пластовой жидкости, необходимый напор, подача насоса, скорость вращения ЭЦН, скорректированное число ступеней, напорно-расходная характеристика, рабочая характеристика скважинной магистрали, мощность насоса, типоразмер электродвигателя, штатный двигатель.
- з) К установке от станции управления до артезианских насосов принимается кабель ВПП 3(1×10).
- и) Использование в сглаживающем фильтре ЧП серии ЗСС НЗТМ фирмы EPCOS.
- к) Для установления показателя эквивалентного напряжения, равного 0,15 Ом (мощность 20 Вт), необходимо использование резистора снаббера, состоящего из 10 параллельно соединенных 2-х ваттных сопротивлений (МЛТ 1,5 Ом ± 10 %).
- л) В результате мероприятий по замене насосов на двух скважинах, дополнительная добыча воды составила 11142,72 т/год. Себестоимость добычи одной тонны воды снизилась на 1,57 руб. Экономический годовой эффект составил 5346704,72 руб, а срок окупаемости 0,09 года.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.В. Вахнина, О.В. Самолина, А.Н. Черненко. Электроэнергетика и электротехника. Выполнение бакалаврской работы: учебно-методическое пособие для студентов направления 13.03.02 / В.В. Вахнина, О.В. Самолина, А.Н. Черненко. – Тольятти: ТГУ, 2019. – 35 с.
2. Электротехнические изделия и устройства: электротехнический справочник: в 4 т. / под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. Т. 2. – 518 с.
3. Использование электрической энергии: электротехнический справочник: в 4 т. / под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. Т. 4. – 696 с.
4. Алиев, И.И. Кабельные изделия: справочник / И.И. Алиев, С.Б. Казанский. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 224 с.
5. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
6. Руководящие материалы по расчету токов КЗ и выбору электрооборудования.- СПб.: Изд-во ДЕАН, 2015.
7. Мазур, И. И. Инженерная экология. Общий курс: учебное пособие для вузов / И.И. Мазур, О.И. Молдаванов, В.Н. Шишов. – М.: Высшая школа. 2006. – 637 с.
8. Матросов, А.С. Управление отходами: учебник / А.С. Матросов. – М.: Гардарики, 2011. – 480 с.
9. Конюхова Е.А.: Электроснабжение. учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. — М. : Издательский дом МЭИ, 2014. —3-е изд., перераб. и доп. – 428 с.
10. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: Норматика, 2012 г. – 464 с.
11. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание седьмое. – М.: Главгосэнергонадзор, 2008. – 58 с.
12. Справочник по проектированию электрических сетей/ Под ред. Д.Л. Файбисовича. -М.: ЭНАС, 2007. – 233 с.

13. Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: технический справочник / комп. Эллипс, 2016. – 94 с.
14. Амизов, Б.М. Производственная санитария и гигиена труда: учебное пособие / Б.М. Амизов, И.В. Чепегин. – Казань: КГТУ, 2009. – 565 с.
15. Улицкий, В.А. Классификация и паспортизация вторичных материальных ресурсов: материально-техническое снабжение / В.А. Улицкий. – 2-е изд. – М.: ЦНИИТЭИС, 2007. – 224 с.
16. Алексеев, В.С. Основы безопасности жизнедеятельности: учебное пособие / В.С. Алексеев, М.И. Иванюков. – М.: Дашков и К, 2007. – 240 с.
17. Правила устройства электроустановок. Раздел 4. Распределительные устройства и подстанции. Главы 4.1, 4.2 [Электронный ресурс]. – 7-е изд. – Электрон. текстовые данные. – М.: ЭНАС, 2013. – 104 с.
18. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: Учебник / Б.И. Кудрин. - М.: Academia, 2016. - 160 с.
19. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. / Б.Ю. Липкин. - Высшая школа, 2008. – 363 с.
20. Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: технический справочник / комп. Эллипс, 2016. – 94 с.