

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 Электроснабжение ремонтной базы филиала ПАО «РКК «Энергия»

Обучающийся

В.Р. Гольц

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., П.А. Николаев

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

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа 49 страниц, 7 рисунков, 13 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: электроснабжение, ремонтная база, предприятие, система электроснабжения, нагрузка, мощность, оборудование, надежность.

Актуальность разработки: филиал ПАО «РКК «Энергия» испытывает нарастающую потребность в неотложном ремонте и наладке различного технологического и производственного оборудования. На данный момент основная часть ремонтных и наладочных работ по восстановлению работоспособности оборудования производится силами сторонних организаций. Это существенно удлиняет сроки ремонта, усложняет организационные и технологические аспекты ремонта и приводит к дополнительным финансовым затратам. Кроме того, общее качество ремонта и наладки оборудования с привлечением сторонних организаций является неудовлетворительным. В связи с этим будет построена ремонтная база, для технологических процессов которой требуется ее надежное питание электрической энергией. Таким образом, разработка СЭС для рассматриваемой ремонтной базы является необходимой, важной и актуальной задачей. Практическая реализация надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию.

Содержание ВКР включает в себя вопросы: разработка системы электроснабжения предприятия; расчет электрических нагрузок; картограмма нагрузок; выбор трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ ; выбор силовых трансформаторов ГПП, компенсация реактивной мощности; выбор схемы внутренней сети предприятия, выбор кабелей; определение токов короткого замыкания; выбор и проверка электрооборудования ГПП.

Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика предприятия, исходные данные на проектирование.....	7
2 Разработка системы электроснабжения предприятия.....	11
2.1 Расчет электрических нагрузок	11
2.2 Картограмма нагрузок, выбор местоположения ГПП.....	16
2.3 Выбор трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ производственных участков.....	22
2.4 Выбор силовых трансформаторов ГПП, компенсация реактивной мощности	28
2.5 Выбор схемы внутренней сети предприятия, выбор кабелей	33
2.6 Определение токов короткого замыкания.....	38
2.7 Выбор и проверка электрооборудования ГПП	42
Заключение	47
Список используемой литературы и источников	48

Введение

Ремонтные базы предприятий играют ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы производственных процессов. Они представляют собой специализированные подразделения, которые занимаются техническим обслуживанием и ремонтом оборудования, машин и механизмов, используемых в различных отраслях промышленности. В условиях современного производства, где высокая степень автоматизации и сложность оборудования становятся нормой, значение ремонтных баз возрастает многократно. Одной из основных функций ремонтных баз является поддержание работоспособности оборудования. Регулярное техническое обслуживание и своевременный ремонт позволяют предотвратить аварии и простои, которые могут привести к значительным финансовым потерям. Хорошо налаженная деятельность ремонтных служб позволяет существенно продлить срок эксплуатации техники, уменьшая расходы на её обновление и улучшение. Помимо этого, такие службы предоставляют компетентную помощь в устранении возникающих неполадок. Присутствие профессионалов, умеющих своевременно выявлять и исправлять дефекты, играет ключевую роль в повышении эффективности работы организации. В конкурентной среде бизнеса умение мгновенно решать технические сложности становится весомым аргументом успеха компании.

Различные технологические процессы ремонта оборудования и его элементов проводятся в производственных цехах, как правило, объединенных в группы по специализации ремонта различных типов оборудования или его сборке, комплектации и наладке. «Вместе со вспомогательными производственными участками (ПУ), такими как, например, склады, хранилища, административно-бытовые корпуса (АБК), лаборатории, котельные, насосные, компрессорные, испытательные цеха и т.д., обеспечивающими вспомогательные технологические процессы на данном промышленном объекте, группы основных производственных цехов

образуют цельное крупное предприятие – ремонтную базу» [6]. Данное предприятие представляет собой огороженную металлическим или железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. Питание ПУ со значительными суммарными электрическими нагрузками (ввиду наличия большого числа энергоемких промышленных электроприемников) выполняется от собственных трансформаторных подстанций (ТП) класса напряжения 10 (6)/0,4 кВ. В случае наличия на участке только высоковольтной нагрузки (например, дуговых сталеплавильных печей или мощных высоковольтных электродвигателей), на производственном участке устанавливается отдельное распределительное устройство (РУ) класса напряжения 10 (6) кВ. Если же общая нагрузка электроприемников ПУ относительно невелика, то участок целесообразно питать электрической энергией от наиболее близко расположенной ТП соседнего здания. «В целом, цеховые ТП и высоковольтные РУ участков питаются от главной понизительной подстанции (ГПП).

Электроснабжение является одной из ключевых составляющих эффективной работы ремонтных баз предприятий. В условиях современного производства, где автоматизация и высокие технологии становятся нормой, надежное и качественное электроснабжение играет решающую роль в обеспечении бесперебойной работы всех процессов» [6]. Ремонтные базы, как специализированные подразделения, требуют особого внимания к вопросам электроснабжения, так как от этого зависит не только производительность, но и безопасность работников. Одной из основных задач электроснабжения ремонтных баз является обеспечение стабильного и качественного электропитания для всех используемых машин и оборудования. Современные предприятия технического обслуживания оснащаются разнообразной электроинструментальной базой, станочным парком и диагностической аппаратурой, нуждающимися в стабильном энергоснабжении. Отключение электроэнергии способно вызвать длительные

перерывы в работе, замедлить процесс ремонтных работ и повлечь экономические убытки. Следовательно, крайне важно проектировать системы подачи электричества таким образом, чтобы учитывать возможные риски, предусматривать аварийное питание согласно требованиям Правил устройства электроустановок [10]. Нарушения правил организации электропитания грозят авариями, повреждениями оборудования, увечьями сотрудников и трагедиями с летальным исходом.

Актуальность разработки: филиал ПАО «РКК «Энергия» испытывает нарастающую потребность в неотложном ремонте и наладке различного технологического и производственного оборудования. На данный момент основная часть ремонтных и наладочных работ по восстановлению работоспособности оборудования производится силами сторонних организаций. Это существенно удлинняет сроки ремонта, усложняет организационные и технологические аспекты ремонта и приводит к дополнительным финансовым затратам. Кроме того, общее качество ремонта и наладки оборудования с привлечением сторонних организаций является неудовлетворительным. В связи с этим будет построена ремонтная база, для технологических процессов которой требуется ее надежное питание электрической энергией. Таким образом, разработка СЭС для рассматриваемой ремонтной базы является необходимой, важной и актуальной задачей. Практическая реализация надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию.

Цель работы: обеспечение ремонтной базы качественным и надежным питанием электрической энергией.

Задачи работы:

- определить электрические нагрузки;
- рассчитать рабочие и аварийные режимы системы электроснабжения (СЭС);
- выбрать электрооборудование СЭС.

1 Характеристика предприятия, исходные данные на проектирование

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» (ПАО «РКК «Энергия») – одно из ведущих предприятий России в области космической отрасли, которое играет ключевую роль в разработке и производстве ракетно-космической техники. Основанная в 1946 году, корпорация на протяжении десятилетий является символом отечественной космонавтики, внося значительный вклад в развитие научных исследований и технологий, связанных с освоением космоса. Одним из основных направлений деятельности РКК «Энергия» является разработка и производство пилотируемых и беспилотных космических аппаратов. Компания зарекомендовала себя выдающимися успехами в проектировании космических аппаратов вроде «Союза», десятилетиями доставляющих астронавтов до Международной космической станции (МКС). Они уже давно превратились в визитную карточку отечественной космонавтики и важнейший инструмент межгосударственного взаимодействия в освоении внеземного пространства. Помимо этого, ракетно-космическая корпорация «Энергия» ведёт активную работу над перспективными технологиями и системами, способствующими продвижению вперёд рубежей изучения вселенной. Такие начинания способствуют укреплению авторитета России среди мировых лидеров космической отрасли, а также создают предпосылки для дальнейших прорывов в науке и технике.

Филиал в г. Байконур испытывает нарастающую потребность в неотложном ремонте и наладке различного технологического и производственного оборудования. В настоящее время основная часть ремонтных и наладочных работ по восстановлению работоспособности оборудования производится силами сторонних организаций, что существенно удлиняет сроки ремонта, усложняет организационные и технологические аспекты ремонта и приводит к дополнительным

финансовым затратам. Также общее качество ремонта и наладки оборудования с привлечением сторонних организаций является неудовлетворительным. Ввиду указанных причин будет построена ремонтная база, для технологических процессов которой требуется ее надежное питание электрической энергией, реализация качественного и надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию и обеспечит внутренние нужды предприятия по неотложному ремонту оборудования и техники.

«Производственные участки (ПУ), их нагрузки, средневзвешенные коэффициенты мощности и спроса нагрузок приведены в таблице 1» [6].

Таблица 1 – Производственные участки

Участки	Номер на генплане	$\Sigma P_{ном}$, кВт	$\cos\varphi$	K_c
Хозблок	1	462	0,73	0,4
Ремонтный цех (РЦ)	2	2280	0,78	0,7
РЦ	3	2950	0,69	0,35
РЦ	4	2000	0,71	0,4
РЦ	5	2390	0,73	0,35
РЦ	6	1690	0,73	0,3
РЦ	7	910	0,73	0,35
РЦ	8	2595	0,78	0,35
Цех покраски	9	19	0,72	0,3
Насосная, 10 кВ	10	2000	0,8	0,65
Испытательный цех	11	1880	0,82	0,7
Цех наладки	12	425	0,76	0,45
Хранилище	13	48	0,8	0,2
Мастерская	14	498	0,79	0,37
РЦ	15	738	0,73	0,3
РЦ	16	595	0,83	0,4
РЦ	17	1590	0,74	0,35
Компрессорная	18	1020	0,77	0,6

«Генплан предприятия показан на рисунке 1.

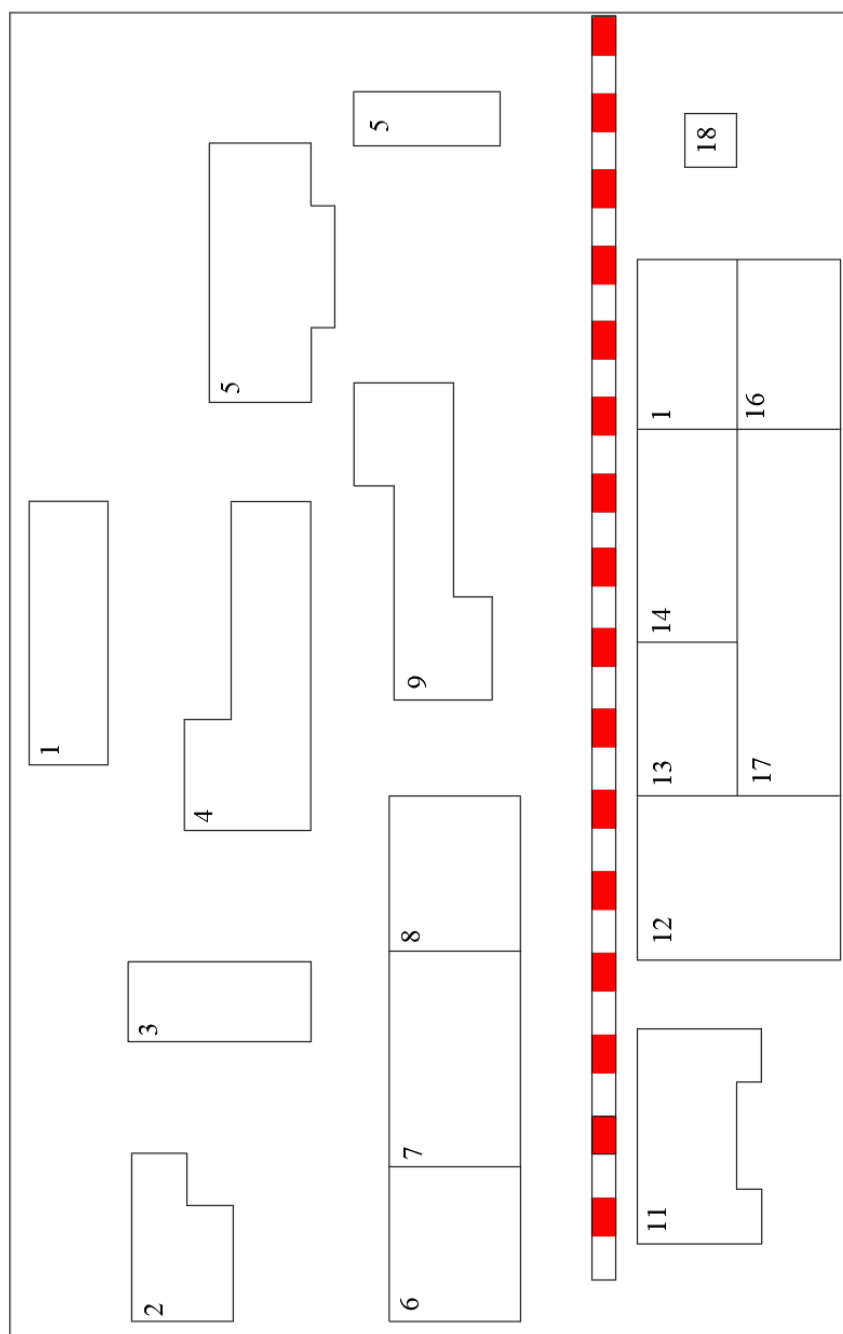


Рисунок 1 – Генплан предприятия

Источник питания ГПП – подстанция (ПС) энергосистемы, питание ГПП будет выполнено по ВЛ 110 кВ с проводами АС-70/11. Категории надёжности электроснабжения участков приведены в таблице 2» [6].

Таблица 2 – Требования к надёжности электроснабжения ПУ

Участки	Категория
Хозблок	III
Ремонтный цех (РЦ)	II
РЦ	II
РЦ	II
РЦ	II
РЦ	II
РЦ	II
РЦ	II
Цех покраски	III
Насосная, 10 кВ	I
Испытательный цех	II
Цех наладки	II
Хранилище	III
Мастерская	II
РЦ	III
РЦ	II
РЦ	II
Компрессорная	I

Вывод по разделу.

Реализация надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию и обеспечит внутренние нужды предприятия по неотложному ремонту оборудования и техники. Всего на территории предприятия будет размещаться 18 производственных участков, в основном, это ремонтные цеха, специализирующиеся на ремонте и наладке оборудования. Вместе со вспомогательными производственными участками, основные цеха образуют цельное крупное предприятие – ремонтную базу. Данное предприятие представляет собой огороженную железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. Ремонтная база относится к первой категории надежности электроснабжения, что обусловлено остановкой основного технологического процесса, массовым браком сырья и продукции в случае перерывов ЭСН [10].

2 Разработка системы электроснабжения предприятия

2.1 Расчет электрических нагрузок

Сегодня надежное энергоснабжение производственных объектов играет важнейшую роль в обеспечении стабильной деятельности любого промышленного предприятия. Электроэнергия должна подаваться стабильно, непрерывно и соответствовать требованиям безопасности, оставаясь при этом экономически оправданной. Потребляемая мощность складывается из суммы мощностей всех электроприборов и оборудования, включённых в сеть. Различают активную нагрузку (отвечающую за полезную работу), реактивную нагрузку (необходимую для формирования магнитных и электрических полей) и полную нагрузку – итоговую сумму обеих предыдущих величин. Грамотный расчет электрической нагрузки служит основой для проектирования рациональной и производительной энергосистемы предприятия. Правильно проведённый расчёт позволяет:

- обеспечить надёжную работу всех потребителей;
- оптимизировать затраты на оборудование;
- предотвратить аварийные ситуации;
- соблюсти требования безопасности;
- создать экономически целесообразную систему электроснабжения.

Таким образом, грамотное проектирование СЭС с учётом всех факторов электрических нагрузок является залогом успешной и безопасной работы промышленного предприятия. «Правильный расчёт нагрузок позволяет также оптимизировать затраты на электроэнергию, что в условиях современного рынка является важным конкурентным преимуществом» [6].

«Для расчета электрических нагрузок производственных участков используется метод коэффициента спроса активной нагрузки. Формулы для расчета среднесменных активных, реактивных и полных нагрузок по участкам:

$$P_c = K_c \cdot P_{ном}, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент спроса нагрузки;

$P_{ном}$ – номинальная нагрузка, кВт.

$$Q_c = P_c \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}. \quad (3)$$

Пример расчета, участок №1, по (1-3)» [7]:

$$P_c = 0,4 \cdot 462 = 184,8 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 184,8 \cdot 0,94 = 173,02 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{184,8^2 + 173,02^2} = 253,15 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Нагрузки предприятия

Цеха	$\Sigma P_{ном}$, кВт	$\operatorname{tg} \varphi$	K_c	Среднесменные нагрузки		
				P_c , кВт	Q_c , квар	S_c , кВА
Хозблок	462	0,94	0,4	184,80	173,02	253,15
Ремонтный цех (РЦ)	2280	0,8	0,7	1596,00	1280,44	2046,15
РЦ	2950	1,05	0,35	1032,50	1083,09	1496,38
РЦ	2000	0,99	0,4	800,00	793,47	1126,76
РЦ	2390	0,94	0,35	836,50	783,16	1145,89
РЦ	1690	0,94	0,3	507,00	474,67	694,52
РЦ	910	0,94	0,35	318,50	298,19	436,30
РЦ	2595	0,8	0,35	908,25	728,67	1164,42
Цех покраски	19	0,96	0,3	5,70	5,49	7,92

Продолжение таблицы 3

Цеха	$\Sigma P_{ном}$, кВт	tgφ	Kc	Среднесменные нагрузки		
				Pc, кВт	Qc, квар	Sc, кВА
Насосная, 10 кВ	2000	0,75	0,65	1300,00	0,00	1300,00
Испытательный цех	1880	0,7	0,7	1316,00	918,57	1604,88
Цех наладки	425	0,86	0,45	191,25	163,55	251,64
Хранилище	48	0,75	0,2	9,60	7,20	12,00
Мастерская	498	0,78	0,37	184,26	143,00	233,24
РЦ	738	0,94	0,3	221,40	207,28	303,29
РЦ	595	0,67	0,4	238,00	159,94	286,75
РЦ	1590	0,91	0,35	556,50	505,82	752,03
Компрессорная	1020	0,83	0,6	612,00	507,12	794,81
Итого	-	-	-	10818,26	8232,68	13594,55

«Нагрузка освещения рассчитывается методом удельной нагрузки. Расчетные активные и реактивные нагрузки освещения по участкам:

$$P_{po} = P_0 \cdot K_{co} \cdot F, \quad (4)$$

где P_0 – удельная мощность, Вт/м²;

K_{co} – коэффициент спроса освещения;

F – площадь здания, м².

$$Q_{po} = P_{po} \cdot tg\varphi. \quad (5)$$

Освещение обеспечивается современными светодиодными светильниками» [17].

«Одним из основных достоинств светодиодных светильников является их высокая энергоэффективность. В отличие от традиционных ламп, светодиоды потребляют значительно меньше электроэнергии при

одинаковом уровне освещенности» [1]. Это позволяет предприятиям существенно сократить затраты на электроэнергию, что особенно актуально в условиях растущих цен на энергоресурсы. Энергоэффективность светодиодов также способствует снижению углеродного следа. Долговечность светодиодных светильников – ещё одно важное преимущество. Срок эксплуатации светодиодных ламп достигает 50 тысяч часов – показатель существенно превосходит аналогичный параметр обычных лампочек накаливания и люминесцентных источников света. Благодаря этому компании могут заметно уменьшить затраты на покупку новых ламп и сервисное обслуживание, что крайне актуально для крупных промышленных предприятий и складских помещений, где замена осветительных приборов бывает сложной задачей. Помимо длительного срока работы, светодиоды отличаются высоким качеством освещения: они излучают интенсивный ровный свет без пульсаций, снижая нагрузку на глаза персонала и повышая уровень комфорта на рабочих местах. В отличие от некоторых других типов ламп, светодиоды лишены вредных компонентов вроде ртути, что благоприятствует охране здоровья людей и экологии.

«Для ПУ №1 нагрузки освещения, по (4,5):

$$P_{po} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 2701 = 9,51 \text{ кВт},$$

$$Q_{po} = 9,51 \cdot 0,33 = 3,14 \text{ квар.}$$

Итого нагрузки ПУ №1:

$$P_p' = 184,8 + 9,51 = 194,31 \text{ кВт},$$

$$Q_p' = 173,02 + 3,14 = 176,15 \text{ квар},$$

$$S_p' = \sqrt{194,31^2 + 176,15^2} = 262,27 \text{ кВА.}$$

Расчетные нагрузки предприятия сведены в таблице 4» [17].

Таблица 4 – Расчетные нагрузки предприятия

Участки	Pp' , кВт	Qp' , квар	Sp' , кВА
Хозблок	194,31	176,15	262,27
Ремонтный цех (РЦ)	1602,48	1282,58	2052,55
РЦ	1039,12	1085,28	1502,53
РЦ	815,38	798,54	1141,28
РЦ	851,48	788,10	1160,23
РЦ	515,72	477,55	702,87
РЦ	330,81	302,25	448,09
РЦ	917,44	731,71	1173,50
Цех покраски	18,82	9,82	21,23
Насосная, 10 кВ	1303,16	1,04	1303,16
Испытательный цех	1325,71	921,78	1614,68
Цех наладки	205,90	168,38	265,99
Хранилище	12,27	8,08	14,70
Мастерская	193,37	146,01	242,31
РЦ	228,64	209,67	310,23
РЦ	245,65	162,46	294,51
РЦ	573,03	511,27	767,96
Компрессорная	613,24	507,53	796,02
Итого по участкам	10986,54	8380,76	13818,15
Территория	28,34	9,35	29,84
Итого	11014,88	8390,11	13846,35

«Наглядное обозначение электрических нагрузок на территории предприятия с помощью их картограммы, а также определения места эквивалентного центра электрических нагрузок позволяют оптимально расположить главную понизительную подстанцию. Это обеспечит минимальную общую длину электрической сети и снижение потерь напряжения, мощности и энергии» [6].

2.2 Картограмма нагрузок, выбор местоположения ГПП

Картограмма электрических нагрузок (КЭН) представляет собой важный инструмент в области проектирования и эксплуатации систем электроснабжения на предприятиях. «Она позволяет визуализировать распределение электрических нагрузок по различным участкам и объектам, что способствует более эффективному управлению энергоресурсами и повышению надежности электроснабжения» [2]. Одним из основных преимуществ КЭН является возможность наглядного представления данных о потреблении электроэнергии. С помощью картограммы можно легко увидеть, какие участки предприятия имеют наибольшие нагрузки, а какие – минимальные, что позволяет специалистам быстро идентифицировать проблемные зоны, например, если определённый участок предприятия демонстрирует высокие нагрузки. Это может указывать на потребность в обновлении техники либо оптимальном распределении нагрузки среди разных источников энергии. Электрическая картограмма нагрузок имеет большое значение при разработке проектов и планов строительства новых сооружений. В случае расширения производства или внедрения инновационных решений важно понимать влияние этих изменений на уже действующую сеть энергоснабжения. Карта электрических нагрузок даёт возможность заблаговременно определить необходимые корректировки для поддержания надежного и безопасного энергообеспечения, предотвращая возможные трудности, вызванные нехваткой мощности.

«КЭН представляет собой размещённые по генеральному плану окружности, площади которых соответствуют расчётным нагрузкам цехов. Радиус окружностей определяется как:

$$R = \sqrt{\frac{S_p}{\pi \cdot m}}, \quad (6)$$

где S_p – расчетная нагрузка цеха, кВА;

m – масштаб.

Доля осветительной нагрузки:

$$\alpha = 360 \cdot S_{oc} / S_p, \quad (7)$$

где S_{oc} – нагрузка освещения, кВА.

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) определяется для нахождения местоположения ГПП. Координаты ЦЭН:

$$x_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot x_i)}{\sum_1^n S_p}; \quad y_0 = \frac{\sum_1^n (S_p \cdot y_i)}{\sum_1^n S_p}, \quad (8)$$

где x_i, y_i – координаты центра цеха, м;

n – число цехов, шт» [19].

«ГПП может располагаться не в ЦЭН, а может быть смещена в направлении от ЦЭН к источнику внешнего питания за территорию предприятия, чтобы обеспечить удобные подъездные пути и не мешать производственному процессу предприятия, исключить прохождение высоковольтной ЛЭП по территории предприятия и попадание вредных выбросов предприятия на ГПП» [16].

Расчет координат ЦЭН приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет координат ЦЭН

Участки	X_i , см	Y_i , см	S_p , кВА	$S_p \cdot X_i$, кВА	$S_p \cdot Y_i$, кВА
Хозблок	13,3	15,0	262,3	3497	3938

Продолжение таблицы 5

Участки	X_i , см	Y_i , см	Sp , кВА	$Sp \cdot X_i$, кВА	$Sp \cdot Y_i$, кВА
Ремонтный цех (РЦ)	1,6	12,7	2052,5	3233	26078
РЦ	6,1	12,1	1502,5	9150	18143
РЦ	12,7	11,4	1141,3	14500	13062
РЦ	20,3	11,0	1160,2	23512	12792
РЦ	1,5	7,4	702,9	1033	5166
РЦ	5,0	7,4	448,1	2258	3293
РЦ	8,6	7,4	1173,5	10104	8625
Цех покраски	15,1	8,1	21,2	321	172
Насосная, 10 кВ	22,9	8,0	1303,2	29829	10399
Испытательный цех	3,6	2,7	1614,7	5764	4408
Цех наладки	8,6	2,0	266,0	2290	531
Хранилище	11,8	2,7	14,7	173	40
Мастерская	15,2	2,7	242,3	3689	661
РЦ	19,0	2,7	310,2	5896	847
РЦ	19,0	1,1	294,5	5597	309
РЦ	13,8	1,1	768,0	10563	806
Компрессорная	22,8	2,5	796,0	18137	2006
Итого			13846,4	149548	111276
Координаты ЦЭН	X , см	Y , см	-	-	-
	10,8	8,0	-	-	-

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) представляет собой виртуальную точку, рассчитываемую при разработке проекта энергоснабжения и соответствующую центру сосредоточения электрического потока объекта. Точное расположение этой точки критически важно для рациональной установки трансформаторных подстанций, прокладки трасс кабелей и

формирования оптимальной схемы снабжения электроэнергией. Местоположение ЦЭН определяется характером рассредоточенности потребителей энергии и структурой сетей на предприятии. Основная цель поиска ЦЭН – минимизировать совокупные расходы на транспортировку электричества и потери мощности в электрической сети.

Правильный выбор центра электрических нагрузок оказывает непосредственное влияние на эффективность работы предприятия:

- расположив источник питания ближе к центру нагрузок, можно значительно уменьшить длину кабельных трасс и, соответственно, снизить потери на нагрев проводов;
- оптимальное расположение подстанций и трансформаторов позволяет снизить затраты на прокладку кабелей и трансформаторное оборудование;
- близость источника питания к местам потребления позволяет минимизировать задержки в доставке электроэнергии и повысить надежность работы сети.

Например, для ПУ №1, по (6,7):

$$R = \sqrt{\frac{262,3}{0,5 \cdot 3,14}} = 12,92 \text{ м},$$

$$\alpha = 360 \cdot 12,7 / 262,3 = 17,4^\circ.$$

Расчеты сведены в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет картограммы нагрузок

Участки	R, м	α	S _{ос} , кВА
Хозблок	12,92	17,4	12,7

Продолжение таблицы 6

Участки	R, м	α	Soc, кВА
Ремонтный цех (РЦ)	36,16	1,5	8,6
РЦ	30,94	2,1	8,8
РЦ	26,96	6,5	20,5
РЦ	27,18	6,2	20,0
РЦ	21,16	6,0	11,6
РЦ	16,89	13,2	16,4
РЦ	27,34	3,8	12,3
Цех покраски	3,68	296,6	17,5
Насосная, 10 кВ	28,81	1,2	4,2
Испытательный цех	32,07	2,9	12,9
Цех наладки	13,02	26,4	19,5
Хранилище	3,06	87,3	3,6
Мастерская	12,42	18,1	12,2
РЦ	14,06	11,2	9,7
РЦ	13,70	12,5	10,2
РЦ	22,12	10,3	22,0
Компрессорная	22,52	0,7	1,6

Согласно результатам расчетов, на генеральный план предприятия наносятся окружности, радиусы которых эквивалентны величинам нагрузок, показывается доля нагрузки освещения (как заштрихованный сектор окружностей).

Картограмма нагрузок – на рисунке 2.

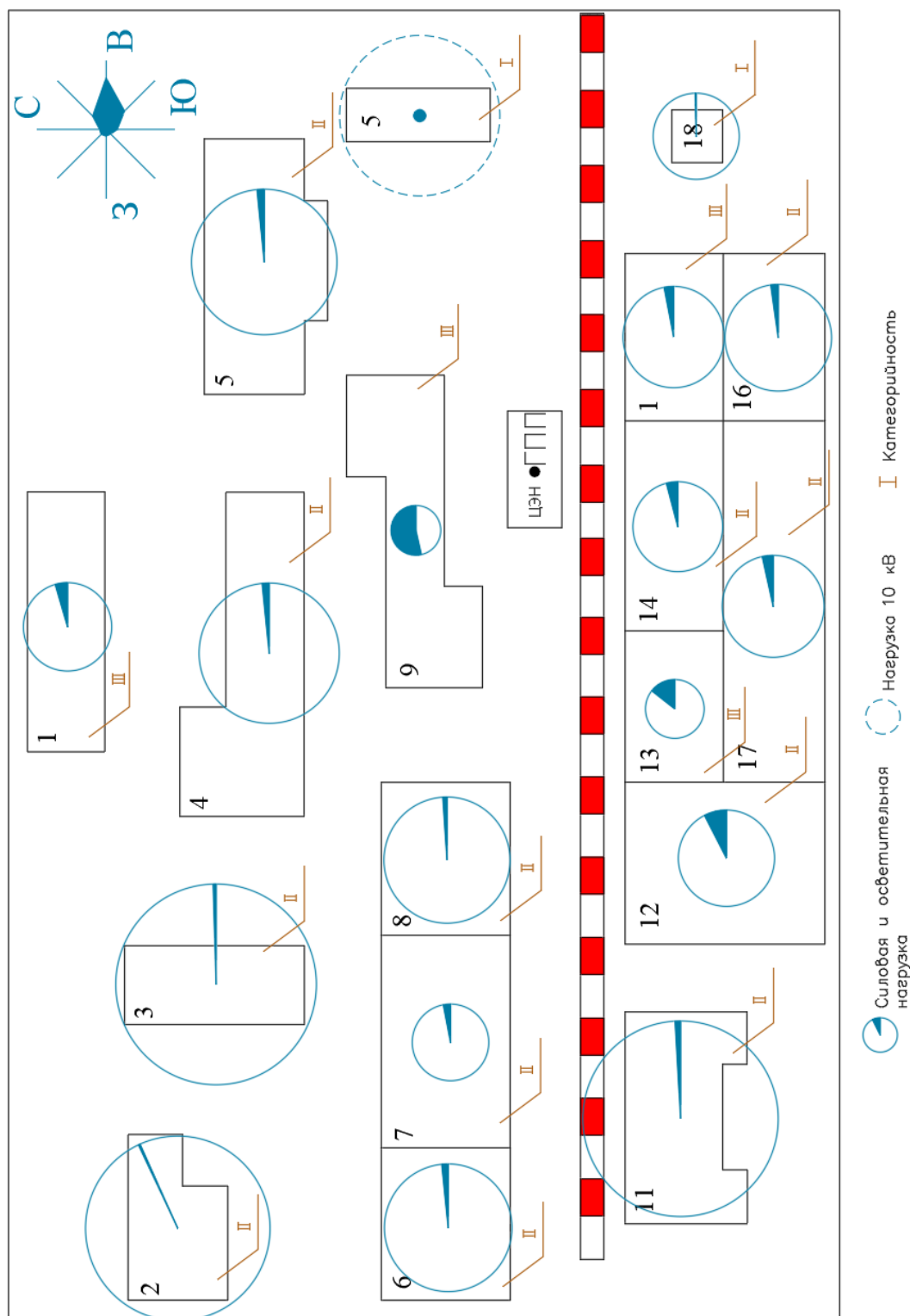


Рисунок 2 – Картограмма нагрузок

ГПП располагается в центре электрических нагрузок, что обеспечит максимальную энергоэффективность внутренней распределительной сети предприятия и минимальную общую длину кабельных линий.

2.3 Выбор трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ производственных участков

Выбор трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ – это важнейший этап проектирования системы электроснабжения предприятия, от которого зависит надежность, безопасность и экономичность эксплуатации оборудования [15]. Выбор трансформаторов подстанций 10/0,4 кВ включает решение следующих задач:

- определение нужной мощности трансформатора, исходя из потребляемой предприятием электроэнергии;
- выбор количества трансформаторов, решение о том, сколько трансформаторов потребуется для обеспечения надежности и бесперебойности электроснабжения;
- учёт особенностей нагрузки, учет характера нагрузки (преимущественно индуктивная, активная или смешанная), режима работы и перспектив развития предприятия.

При подборе трансформаторов важно учитывать такие параметры:

- основным фактором считается мощность устройства, которая должна соответствовать суммарной нагрузке предприятия;
- количество обмоток – чаще всего используются двухобмоточные трансформаторы для подстанций 10/0,4 кВ (первичная обмотка – 10 кВ, вторичная – 0,4 кВ);
- метод охлаждения трансформатора выбирается исходя из конкретных условий работы (воздушный естественный, воздушный принудительный, масляный либо сухой тип охлаждения);
- тип системы защиты – наличие предохранителей и устройств релейной защиты повышает надежность оборудования.

Желательно предусмотреть небольшой резерв мощности, чтобы обеспечить возможность дальнейшего роста нагрузок [5].

«Нагрузки производственных участков группируются по ТП 10/0,4 кВ с целью оптимального выбора трансформаторов по мощности, а также обеспечения минимальной суммарной длины линий распределительной сети. Если расчетная нагрузка участка составила менее 250 кВА, то целесообразно установить РП 0,4 кВ (одно- или двухсекционный), который будет питать от ближайшей ТП другого участка. Если в состав нагрузки ТП входят потребители 1 и 2 категорий надежности электроснабжения, то на ТП устанавливается два силовых трансформатора (как два источника питания).

Оптимальная мощность трансформаторов:

$$S_o = \frac{\sum S_p}{\beta \cdot N}, \quad (9)$$

где $\sum S_p$ – нагрузка, кВА;

β – нормативный коэффициент загрузки;

N – число трансформаторов, шт.

Допустимая к передаче в сеть 0,4 кВ реактивная мощность (РМ):

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot \beta \cdot S_{н.т.})^2 - P_p^2}, \quad (10)$$

где $S_{н.т.}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

P_p – активная нагрузка, кВт.

Требуемая для компенсации со стороны 0,4 кВ РМ:

$$Q_{0,4} = Q_p - Q_1, \quad (11)$$

где Q_p – нагрузка, квар.

При полученном отрицательном значении $Q_{0.4}$, либо менее 50 квар, компенсация не требуется. Далее рассчитывается остаточное значение РМ» [8]:

$$Q_{HH} = Q_p - Q_{БК} \quad (12)$$

Для ТП-1 (зона охвата нагрузок – участок №1, освещение территории), по (9):

$$S_o = \frac{289,8}{0,93 \cdot 1} = 312 \text{ кВА}.$$

«Устанавливается один энергоэффективный трансформатор ТМГ12-400/10» [2].

Энергосберегающие силовые трансформаторы – это оборудование, предназначенное для передачи электрической энергии с минимальным уровнем потерь [18]. Эти устройства становятся всё популярнее благодаря существенной экономии энергоресурсов и уменьшению эксплуатационных расходов. Их отличает высокий коэффициент полезного действия (КПД), низкие тепловые потери и минимальные затраты на магнитный гистерезис. Производство энергосберегающих трансформаторов осуществляется с применением передовых материалов и инновационных методов, что способствует значительному снижению энергопотребления и повышению общей эффективности работы оборудования. Энергосберегающие силовые трансформаторы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными трансформаторами:

- потери на нагрев и гистерезис сведены к минимуму, что позволяет экономить электроэнергию;
- современные материалы и конструкции обеспечивают длительный срок службы и устойчивость к внешним воздействиям;

- снижение потерь энергии приводит к уменьшению выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ;
- энергосберегающие трансформаторы позволяют существенно снизить затраты на электроэнергию и обслуживание;
- отсутствие масла и других вредных веществ делает такие трансформаторы безопасными и экологически чистыми.

Внешний вид ТМГ12 показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Трансформатор ТМГ12

Выбор трансформаторов сведен в таблице 7.

Таблица 7 – Выбор трансформаторов ТП 10/0,4 кВ

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-1	1, освещ. терр.	312	400
ТП-2	2	1466	1600
ТП-3	3	1073	1250

Продолжение таблицы 7

Подстанции	Зона охвата, № цехов	So, кВА	St, кВА (ТМГ12)
ТП-4	4,9	830	1000
ТП-5	5, освещ. 10	832	1000
ТП-6	6	502	630
ТП-7	7	320	400
ТП-8	8	838	1000
ТП-11	11	1153	1250
ТП-12	12,13	200	250
ТП-15	15	334	400
ТП-16	16,14	383	400
ТП-17	17	549	630
ТП-18	18	569	630

Расчет КРМ на ТП-1, по (10,11):

$$Q_1 = \sqrt{(1 \cdot 0,7 \cdot 400)^2 - 222,65^2} = 298,01 \text{ квар},$$

$$Q_{0,4} = 185,5 - 298,01 = -113 \text{ квар}.$$

«КРМ не требуется. Наибольший коэффициент загрузки трансформатора:

$$K_n = \frac{S_{p.ком.}}{S_{н.т.}}, \quad (13)$$

$$K_n = \frac{289,80}{400} = 0,72 \leq 1,0.$$

Перегрузки не будет.

Расчет КРМ на ТП и проверка трансформаторов по перегрузке приведены в таблице 8» [12].

Таблица 8 – Расчет КРМ и проверка трансформаторов по перегрузке

Подстанции	$Q_{0,4}$, квар	K_{Π}
ТП-1	-113	-
ТП-2	-283	1,28
ТП-3	-323	1,20
ТП-4	-316	1,16
ТП-5	-318	1,16
ТП-6	-238	1,12
ТП-7	-150	1,12
ТП-8	-326	1,17
ТП-11	-221	1,29
ТП-12	-97	1,12
ТП-15	-84	-
ТП-16	-39	1,34
ТП-17	-159	1,22
ТП-18	-126	1,26

Будут установлены подстанции 2КТПН-10/0,4.

«Комплектные трансформаторные подстанции (КТП) – это унифицированные устройства, предназначенные для преобразования, распределения и учета электроэнергии в сетях среднего и низкого напряжения» [13]. Они получили широкое распространение благодаря своей простоте, надежности и доступности. Комплектные трансформаторные подстанции характеризуются значительными преимуществами, обеспечивающими их востребованность во многих сферах деятельности:

- подстанции поступают уже собранными и подготовленными к работе, что существенно ускоряет процесс запуска и уменьшает расходы на установку;
- компактные габариты позволяют устанавливать их даже на небольших участках, что особенно актуально в условиях городской тесной застройки;

- стоимость комплектных решений гораздо ниже стоимости индивидуальных проектировок, делая их экономически выгодными практически для любых объектов;
- конструкция обеспечивает свободный доступ ко всем компонентам оборудования, облегчая проведение технического обслуживания и ремонтных работ;
- быстрое подсоединение и запуск благодаря стандартизированному исполнению и готовым техническим решениям.

Благодаря своим преимуществам, КТП давно зарекомендовали себя как надежный и доступный вариант для большинства проектов в различных отраслях. Выбранные КТПН штатно укомплектованы оборудованием АСТУЭ производства АО «Концерн Энергомера».

2.4 Выбор силовых трансформаторов ГПП, компенсация реактивной мощности

«Установки КРМ будут смонтированы на шинах 10 кВ ГПП [6].

Для расчета нагрузки ГПП необходимо учесть потери в ТП 10/0,4 кВ. Потери активной и реактивной мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_m = \frac{\Delta P_\kappa}{n} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + n \cdot \Delta P_{xx}, \quad (14)$$

где ΔP_κ – потери КЗ, кВт;

n – число трансформаторов, шт;

S_n – номинальная мощность, кВА;

ΔP_{xx} – потери ХХ, кВт.

$$\Delta Q_m = \frac{U_\kappa}{n \cdot 100} \cdot \frac{P_p^2 + Q_p^2}{S_n^2} + \frac{n \cdot I_{xx}}{100} \cdot S_n, \quad (15)$$

где U_{κ} – напряжение КЗ, %;

I_{xx} – ток XX, %.

Для ТП-1, по (14,15):

$$\Delta P_m = \frac{4,6}{1} \cdot \frac{222,65^2 + 185,5^2}{400^2} + 1 \cdot 0,63 = 3,04 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_m = \frac{4,5}{1 \cdot 100} \cdot \frac{222,65^2 + 185,5^2}{400^2} + \frac{2 \cdot 0,8}{100} \cdot 400 = 12,65 \text{ квар}.$$

Нагрузка ГПП с учетом потерь рассчитана в таблице 9» [6].

Таблица 9 – Нагрузка ТП с учетом потерь

Подстанции	ΔP , кВт	ΔQ , квар	$P_p + \Delta P$, кВт	$Q_p + \Delta Q$, квар
ТП-1	3,04	12,65	225,69	198,15
ТП-2	16,57	94,99	1619,04	1377,57
ТП-3	12,45	66,68	1051,57	1151,96
ТП-4	9,28	49,11	843,48	857,47
ТП-5	9,32	49,29	863,96	840,16
ТП-6	5,80	30,38	521,53	507,93
ТП-7	4,15	17,69	334,95	319,94
ТП-8	9,43	49,87	926,87	781,58
ТП-11	13,96	75,07	1339,68	996,85
ТП-12	2,90	11,59	221,07	188,05
ТП-15	3,40	14,03	232,04	223,70
ТП-16	5,40	22,59	444,42	331,06
ТП-17	6,61	34,56	579,64	545,84
ТП-18	6,99	36,48	620,23	544,01
РУ-1	-	-	1300,00	0,00
Итого	109,30	564,99	11124,18	8955,10

«Итоговая реактивная нагрузка ГПП:

$$Q_{10} = \sum Q_{HH} + \sum \Delta Q_m, \quad (16)$$

где $\sum Q_{HH}$ – нагрузка ТП, квар;

$\sum \Delta Q_m$ – потери в трансформаторах, квар.

Итоговая активная нагрузка ГПП:

$$P_{сумм} = \sum P_p + \sum \Delta P_m, \quad (17)$$

где $\sum P_p$ – нагрузка ТП, кВт;

$\sum \Delta P_m$ – потери в трансформаторах, кВт» [6].

$$Q_{10} = 8390,11 + 564,99 = 8955,1 \text{ квар},$$

$$P_{сумм} = 11014,88 + 109,3 = 11124,18 \text{ кВт}.$$

«Требуемая для компенсации на каждой шине 10 кВ РМ:

$$Q_{ку} / 2 = \frac{Q_{10} + \Delta Q_m - Q_{сист} - Q_c}{2}, \quad (18)$$

где $Q_{сист}$, Q_c – РМ из энергосистемы и от СД, квар;

ΔQ_m – предварительные потери РМ в трансформаторах ГПП, квар.

$$Q_{сист} = \alpha \cdot \sum P_p, \quad (19)$$

где α – эквивалент нормативного $\text{tg}\varphi=0,33$.

$$Q_c = \frac{\alpha_m \cdot P_n \cdot \text{tg}\varphi_n}{\eta_n}, \quad (20)$$

где α_m – допустимая перегрузка СД;

P_n – номинальная активная мощность СД, кВт;

$\text{tg}\varphi_n$ – коэффициент РМ, по номинальному $\cos\varphi$;

η_n – КПД двигателя, о.е.

$$\Delta Q_m = \frac{10,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{11124,18^2 + 8955,1^2}{10000^2} + \frac{2 \cdot 0,7}{100} \cdot 10000 = 1412,42 \text{ квар},$$

$$Q_c = \frac{0,92 \cdot 2000 \cdot 0,75}{0,95} = 1452,63 \text{ квар},$$

$$Q_{\text{кв}} / 2 = \frac{8955,1 + 1412,42 - 0,33 \cdot 11014,88 - 1452,63}{2} = 2639,99 \text{ квар}.$$

Устанавливается две конденсаторные батареи УККРМ-10,5-2700 по 2700 квар» [6].

«Автоматическая компенсация реактивной мощности (АКРМ) представляет собой современную технологию, направленную на повышение эффективности и надежности работы электрических сетей путем поддержания оптимального соотношения между активной и реактивной мощностью» [4]. Применение данной системы решает целый ряд ключевых задач, включая сокращение энергетических потерь и поддержание стабильного уровня напряжения. Основные достоинства АКРМ заключаются в следующем:

- устранение избыточных токов, вызванных реактивной нагрузкой, уменьшает энергопотери и повышает энергоэффективность сети;
- улучшение качества электропитания достигается за счет выравнивания активного и реактивного компонентов мощности, что обеспечивает стабильность напряжения, критически важную для чувствительных устройств;
- увеличение надёжности эксплуатации электрооборудования происходит благодаря снижению нагрузок, уменьшению риска повреждений и увеличению срока службы техники [11].

Основной принцип работы АКРМ заключается в следующем:

- система непрерывно отслеживает уровень реактивной мощности в сети;
- при обнаружении несоответствия между активной и реактивной мощностью АКРМ автоматически корректирует ситуацию, добавляя или компенсируя недостающую реактивную мощность;
- вся операция проводится автоматически, без вмешательства оператора, что обеспечивает быструю реакцию на изменения в сети.

«Принимается к установке два силовых трансформатора ТДН-10000/110, внешний вид показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Трансформатор ТМН-6300/110

Нагрузки после КРМ:

$$Q_{pk} = 8955,1 - 2 \cdot 2700 = 3555,1 \text{ квар,}$$

$$P_{pk} = P_{сумм} = 11124,18 \text{ кВт.}$$

Полная нагрузка ГПП:

$$S_p = \sqrt{(k_{pma} \cdot P_{pk})^2 + (k_{pmp} \cdot Q_{pk})^2}, \quad (21)$$

где k_{pma} и k_{pmp} – коэффициенты разновременности нагрузок.

$$S_p = \sqrt{(0,95 \cdot 11124,18)^2 + (0,95 \cdot 3555,1)^2} = 11094,52 \text{ кВА}$$

Послеаварийная перегрузка, по (13):

$$K_n = \frac{11094,52}{10000} = 1,11 < 1,4$$

Перегрузка будет в пределах допустимой» [7].

2.5 Выбор схемы внутренней сети предприятия, выбор кабелей

«Для распределительной сети выбирается смешанная схема, как обеспечивающая наилучшие технико-эксплуатационные показатели при минимальных капиталовложениях. Кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв. Кабели прокладываются в траншеях под землей» [2]. План прокладки кабельных линий показан на листе 2 графической части.

Выбираются кабели внутренней сети предприятия.

Расчет для КЛ до ТП-4.

«Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (22)$$

где S_p – нагрузка участка, кВА;

n – число цепей, шт.

Экономическое сечение жил:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (23)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм².

$$I_p = \frac{4888,3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 141,1 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = \frac{4888,3}{\sqrt{3} \cdot 10} = 282,2 \text{ А},$$

$$F_{\text{эк}} = \frac{141,1}{1,4} = 101 \text{ мм}^2.$$

С поправкой на аварийный ток выбирается кабель АПвП 3×240 мм², с учетом групповой прокладки $I_{\text{дон}} = 302 \text{ А}$ [6].

Кабели марки АПвП зарекомендовали себя как надежное решение для передачи электрической энергии. Кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках. «Они способны работать на номинальное напряжение 6, 10, 20 и 35 кВ при частоте 50 Гц. Эти кабели универсальны в применении и могут использоваться как в сетях с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Конструкция кабеля АПвП продумана до мелочей. Алюминиевая многопроволочная уплотненная жила обеспечивает высокую проводимость. Изоляция выполнена из сшитого полиэтилена, что гарантирует долговечность и устойчивость к механическим воздействиям» [7].

Особое значение имеет защита от электромагнитных воздействий: проводящая жила и изоляция покрыты материалами, обладающими электропроводящими свойствами. Кабель отличается высокими техническими характеристиками, обеспечивающими надежность эксплуатации. Диапазон рабочих температур простирается от минус 60 до

плюс 50 градусов Цельсия, благодаря чему кабель пригоден для работы во всех климатических зонах. Монтаж допускается проводить при температуре воздуха вплоть до минус 20 градусов без дополнительного прогрева. Радиус минимального изгиба при укладке равен всего лишь пятнадцати внешним диаметрам самого кабеля, что существенно упрощает монтажные работы [9].

«Потери напряжения в линии:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_{\text{н}}} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (24)$$

где I_p – расчетный ток линии, А;

L – длина линии, км;

r_0 и x_0 – удельные сопротивления кабелей, Ом/км;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки.

Согласно ПУЭ, потери напряжения не должны превышать 5 %.

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 282,2 \cdot 0,151 \cdot 100}{10000} (0,129 \cdot 0,751 + 0,08 \cdot 0,66) = 0,03 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей сведен в таблице 10» [6].

Таблица 10 – Выбор кабелей 10 кВ

Участок	I_p , А	$I_{\text{ав}}$, А	АПВП, сечение жил, мм ²	$I_{\text{доп}}$, А	ΔU , %
ГПП-ТП4	141,1	282,2	240	302	0,03
ТП4-ТП3	106,4	212,8	150	234	0,16
ТП3-ТП2	61,4	122,7	70	140	0,15
ГПП-ТП8	69,4	138,8			0,28
ТП8-ТП7	34,4	68,8	25	77	0,17
ТП-7-ТП6	21,0	42,0	16	64	0,22
ГПП-ТП5	43,5	86,9	35	98	0,34
ТП5-ТП1	8,7	8,7	16	64	0,24

Продолжение таблицы 10

Участок	I_p , А	$I_{ав}$, А	АПвП, сечение жил, мм ²	$I_{доп}$, А	ΔU , %
ГПП-ТП12	79,6	159,1	95	174	0,40
ТП12-ТП11	48,2	96,4	50	119	0,18
ТП12-ТП17	23,0	46,0	16	64	0,14
ГПП-ТП18	39,8	79,6	35	98	0,31
ТП18-ТП16	16,0	32,0	16	64	0,09
ГПП-ТП-15	9,3	9,3			
ГПП-РУ-1	46,9	93,8	35	98	0,34

«Выбор кабеля 0,4 кВ до РП9.

Расчётный ток, по (22):

$$I_p = \frac{21,2}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 32,3 \text{ А}$$

Принимается кабель АВБШв 4×4 мм², $I_{доп} = 42 \text{ А}$.

Потери напряжения в КЛ, по (24)» [14]:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 32,3 \cdot 0,031 \cdot 100}{380} (7,49 \cdot 0,714 + 0) = 0,91 \% < 5 \%$$

Кабель марки АВБШв (алюминиевый, с изоляцией из поливинилхлорида, бронированный, шланговый) – это силовой кабель, предназначенный для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках. Кабель марки АВБШв выделяется целым рядом достоинств, обеспечивающих его востребованность среди проектировщиков и строителей:

- наличие стальной ленточной брони существенно повышает устойчивость кабеля к механическим повреждениям – удару, сдавливанию и воздействию абразивных материалов;

- антикоррозионная защита обеспечивается специальной ПВХ-оболочкой, надежно предохраняя изделие от разрушающего влияния окружающей среды и почвенных условий;
- высокий уровень огнестойкости достигается низкими показателями выделения дыма и отсутствием распространения пламени, что гарантирует соответствие актуальным нормам противопожарной защиты;
- повышенная долговечность обусловлена усиленной защитой броней и качественным изоляционным материалом, значительно увеличивающим эксплуатационный ресурс кабеля относительно небронированных аналогов;
- удобство монтажа, компактность и гибкость кабеля позволяют легко прокладывать его в траншеях, коллекторах и туннелях;
- экономичность, использование алюминиевых жил и бронированной конструкции делает кабель экономически выгодным решением для крупных проектов.

«Кабель АВБШв – это надежное и экономичное решение для передачи и распределения электроэнергии» [7].

Выбор кабелей 0,4 кВ сведен в таблице 11.

Таблица 11 – Выбор кабелей 0,4 кВ

КЛ	Ip, А	АВБШв, сечение жил, мм ²	Idоп, А	ΔU, %
ТП4-РП9	32,3	4	42	0,91
ТП5-РП10	6,4			0,11
ТП12-РП13	22,3			0,15
ТП16-РП14	361,7	185	380	0,57

«Электрооборудование главной понизительной подстанции будет выбираться с учетом токов КЗ» [6].

2.6 Определение токов короткого замыкания

«Расчёт токов КЗ в сети предприятия играет важную роль в обеспечении безопасности и надёжности работы электрической системы, он проводится с целью подбора аппаратуры, проверки электрической установки на термическую и электродинамическую устойчивость.

Схема замещения приведена на рисунке 5.

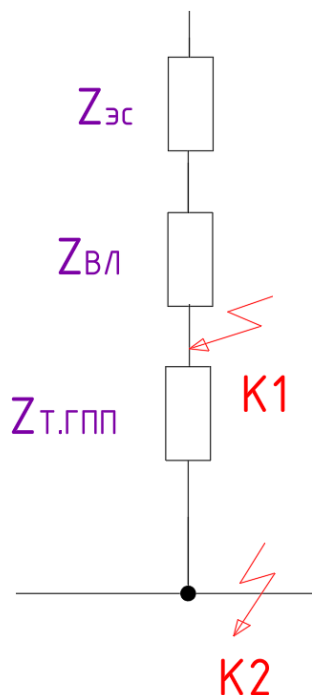


Рисунок 5 – Схема замещения сети

На схеме замещения обозначены: точка K1 – КЗ на ОРУ 110 кВ, точка K2 – КЗ на шинах 10 кВ» [6].

«Полное сопротивление цепи КЗ:

$$z = \sqrt{\left(\sum r^{\circ}\right)^2 + \left(\sum x^{\circ}\right)^2}, \quad (25)$$

где $\sum r^{\circ}$, $\sum x^{\circ}$ – активное и индуктивное сопротивления цепи, Ом.

Сопротивления трансформаторов:

$$R_m = \Delta P_{\kappa} \cdot U_{н.в.}^2 / (S_{н.}^2 \cdot 1000), \quad (26)$$

где ΔP_{κ} – потери КЗ, кВт;

$U_{н.в.}$ – напряжение ВН, кВ;

$S_{н.}$ – номинальная мощность, кВА.

$$Z_m = \Delta U_{\kappa} / 100 \cdot 10^2 / S_{н.}, \quad (27)$$

где ΔU_{κ} – потери напряжения КЗ, %» [6].

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} \quad (28)$$

«Токи трехфазного и двухфазного КЗ:

$$I_{\kappa 3}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot Z}, \quad (29)$$

$$I_{\kappa 3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\kappa 3}^{(3)}. \quad (30)$$

Ударный ток КЗ:

$$I_y = I_{\kappa 3}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 1)^2}, \quad (31)$$

где κ_y – ударный коэффициент.

$$\kappa_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (32)$$

где T_a – постоянная апериодической слагающей, с» [6].

$$T_a = \sum X / 314 \sum R \quad (33)$$

«Пример расчета токов КЗ на стороне 10 кВ ГПП (точка К2).

Сопротивление энергосистемы:

$$X_c = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.эс}}}, \quad (34)$$

где $I_{\text{к.эс}}$ – трехфазный ток КЗ в начале ВЛ 110 кВ, кА.

$$X_c = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 8,155} = 8142 \text{ мОм.}$$

Сопротивления трансформаторов ГПП:

$$R_m = \frac{60000 \cdot 115^2}{10000^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 60 \text{ мОм,}$$

$$Z_m = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 10^2} \cdot (10,5 / 115)^2 = 1050 \text{ мОм,}$$

$$X_m = \sqrt{1050^2 - 60^2} = 1048 \text{ мОм.}$$

Сопротивления ВЛ 110 кВ:

$$R_{\text{вл}} = 0,429 \cdot 11 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 19,5 \text{ мОм,}$$

$$X_{\text{вл}} = 0,444 \cdot 11 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 20,18 \text{ мОм.}$$

Эквивалентные сопротивления цепи:

$$\Sigma r = R_{БЛ} + R_{м.ЛПШ}, \quad (35)$$

$$\Sigma r = 19,5 + 60 = 79,5 \text{ мОм},$$

$$\Sigma x = X_C + X_{БЛ} + X_{м.ЛПШ}, \quad (36)$$

$$\Sigma x = 8142 + 20,2 + 1048 = 9210 \text{ мОм},$$

$$z = \sqrt{79,5^2 + 9210^2} = 9211 \text{ мОм}.$$

По формулам (29–33):

$$I'' = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 9211} = 7,209 \text{ кА},$$

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 7,209 = 6,243 \text{ кА},$$

$$T_a = 9210 / (314 \cdot 79,5) = 0,369,$$

$$\kappa_y = 1 + e^{\frac{0,01}{0,369}} = 1,973,$$

$$I_y = 7,209 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,973 - 1)^2} = 12,264 \text{ кА}.$$

Для точки К1 расчет аналогичен. Результаты расчетов сведены в таблице 12» [6].

Таблица 12 – Результаты расчетов токов КЗ

Место КЗ	$I_{к}^{(3)}, \text{ кА}$	$I_y, \text{ кА}$	$I_{к}^{(2)}, \text{ кА}$
Точка К2	7,209	12,264	6,243
Точка К1	7,781	13,410	6,738

«Электрооборудование главной понизительной подстанции будет выбираться с учетом токов КЗ» [6].

2.7 Выбор и проверка электрооборудования ГПП

«Высоковольтные выключатели (ВВ) – это устройства, служащие для автоматического включения и отключения высоковольтных электрических цепей в штатных и аварийных режимах. Они критически важны для защиты и обеспечения бесперебойной работы энергетических систем, предупреждая их повреждения» [20]. Высоковольтные выключатели классифицируются по различным признакам, среди которых среда, используемая для тушения электрической дуги, и конструкционные характеристики:

- маслонаполненные аппараты применяют масло для подавления дугового разряда, маломасляные устройства содержат минимальное количество масла, которое служит лишь для гашения дуги;
- воздушные выключатели устраняют электрическую дугу посредством струи сжатого воздуха, их отличительными чертами являются быстрое время срабатывания и устойчивость к частым коммутационным операциям;
- вакуумные аппараты осуществляют гашение дуги внутри герметичной камеры с глубоким вакуумом, что делает их надежными и долговечными благодаря эффективному предотвращению повторного образования дуги;
- элегазовые устройства задействуют элегаз (шестифтористая сера SF_6), обладающий высокими изолирующими свойствами, для быстрого и эффективного устранения дуги.

«Условия выбора выключателей:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{раб}}, \text{ кВ}, \quad (37)$$

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{раб}}, \text{ кВ}, \quad (38)$$

$$I_{\text{ном.откл}} \geq I_{\text{к}}, \text{ кА}, \quad (39)$$

где $I_{\text{ном.откл}}$ – ток отключения, кА;

I_{κ} – ток трехфазного КЗ, кА.

$$i_{np.c} \geq i_y, \text{ кА}, \quad (40)$$

где $i_{np.c}$ – сквозной ток КЗ, кА;

i_y – ударный ток КЗ, кА.

$$I_m^2 \cdot t_m \geq B_{\kappa}, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}, \quad (41)$$

где I_m – ток термической стойкости, кА;

t_m – время протекания тока, с;

B_{κ} – тепловой импульс, кА²·с.

Условия выбора разъединителей:

$$U_{н.анп.} \geq U_{н.уст.}, \quad (42)$$

$$I_{н.анп.} \geq I_{раб.макс.}, \quad (43)$$

$$I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_{\kappa}, \quad (44)$$

$$i_{дин} \geq i_y. \quad (45)$$

Выбор выключателей и разъединителей сведен в таблице 13» [20].

Таблица 13 – Выбор выключателей и разъединителей

Параметры	ОРУ			ЗРУ	
	По расчету	ВБП-110/2000	РНДЗ-110/1000	По расчету	ВВ/TEL-10/630
$U_{ном}, \text{ кВ}$	110	110	110	10	10
$I_{ном}, \text{ А}$	61,3	2000	1000	640,6	630
$I_{н.откл.}, \text{ кА}$	7,781	31,5	20	7,209	20
$B_{\kappa}, \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	7,57	3600	1200	5,72	1200
$i_{дин}, \text{ кА}$	13,41	40	40	12,264	20

«Для защиты оборудования со стороны 110 кВ устанавливаются ОПН-110/88/10/450, со стороны 10 кВ устанавливаются ОПН-10/11,5-10/400.

Выбор трансформаторов тока и напряжения.

Согласно напряжениям в местах установки и полученным расчетным токам выбираются трансформаторы тока (ТТ): на фидерах 10 кВ: ТПЛК-10-10..300/5; на вводах ЗРУ 10 кВ: ТПЛК10-800/5; на ОРУ 110 кВ: ТФНД-110-75/5.

Проверка ТТ в режиме КЗ:

– в ЗРУ 10 кВ:

По динамической стойкости: $i_{дин} = 74,5 \text{ кА} \geq i_{уд} = 12,3 \text{ кА}$.

По термической стойкости: $I_m^2 \cdot t_m = 2900 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 5,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

– на ОРУ 110 кВ:

$$i_{дин} = 42 \text{ кА} \geq i_{уд} = 13,4 \text{ кА},$$

$$I_m^2 \cdot t_m = 3600 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq B_k = 7,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Условия выбора трансформаторов напряжения (ТН):

$$U_{ном} \geq U_{уст}, \quad (46)$$

$$S_{ном} \geq S_{2\Sigma}. \quad (47)$$

Принимаются ТН марки НАМИ-10-200.

$$U_{н.ант.} = 10 \text{ кВ} \geq U_{н.уст.} = 10 \text{ кВ},$$

$$S_{ном} = 200 \text{ ВА} \geq S_{2\Sigma} = 51 \text{ ВА}.$$

ТТ и ТН проходят проверку» [20].

«Комплектные распределительные устройства (КРУ) – это специализированные системы, предназначенные для приема, распределения и управления электрической энергией в сетях среднего и высокого напряжения» [13]. Эти устройства активно используют во многих сферах промышленности, жилищно-коммунального хозяйства и строительства, обеспечивая стабильную и безопасную подачу электроэнергии на объекты. Комплектные распределительные устройства включают несколько важных элементов:

- высоковольтные коммутационные аппараты – служат для быстрого подключения и отключения электроцепей;
- разъединяющие и заземляющие устройства – необходимы для безопасного разъединения и заземления оборудования;
- измерительные преобразователи – позволяют контролировать напряжение и силу тока;
- системы автоматического управления и защиты – следят за работой устройства и защищают аппаратуру от перегрузок и аварийных ситуаций (например, короткого замыкания);
- корпус или шкаф, где размещаются вышеперечисленные компоненты.

Использование комплектных распределительных устройств дает ряд важных преимуществ:

- герметичный корпус и современные системы защиты снижают риски аварий и обеспечивают стабильную работу;
- «применение КРУ позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию распределительных подстанций;
- компактная конструкция и готовность к эксплуатации упрощают установку и техническое обслуживание» [13].

Принимаются КРУ К-132/630 А, внешний вид – на рисунке 6.



Рисунок 6 – Ячейки КРУ К-132

«Силовые трансформаторы ГПП будут защищены микропроцессорной релейной защитой (РЗ) на терминалах Сириус-Т, фидеры 10 кВ будут защищены РЗ на терминалах Сириус-2Л-02» [3]. Внешний вид терминалов приведен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Внешний вид терминалов релейной защиты

Вывод по разделу.

Рассчитаны электрические нагрузки цехов и других зданий, а также по предприятию в целом. Рассчитаны режимы работы сети, выбрано современное оборудование СЭС отечественного производства.

Заключение

Филиал ПАО в г. Байконур испытывает нарастающую потребность в неотложном ремонте и наладке различного технологического и производственного оборудования. Будет построена ремонтная база, для технологических процессов которой требуется ее надежное питание электрической энергией, реализация качественного и надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию и обеспечит внутренние нужды предприятия по неотложному ремонту оборудования и техники. Реализация качественного и надежного электроснабжения на объекте обеспечит его эффективную эксплуатацию и обеспечит внутренние нужды предприятия по неотложному ремонту оборудования и техники. Всего на территории предприятия будет размещаться 18 производственных участков, в основном, это ремонтные цеха, специализирующиеся на ремонте и наладке оборудования. Вместе со вспомогательными производственными участками, основные цеха образуют цельное крупное предприятие – ремонтную базу. Данное предприятие представляет собой огороженную железобетонным забором территорию, на которой расположены все производственные участки. Ремонтная база относится к первой категории надежности электроснабжения, что обусловлено остановкой основного технологического процесса, массовым браком сырья и продукции в случае перерывов ЭСН.

Рассчитаны электрические нагрузки цехов и других зданий, а также по предприятию в целом. Рассчитаны режимы работы сети, выбрано современное оборудование СЭС отечественного производства. Для электроснабжения цехов приняты к установке КТПН с энергоэффективными силовыми трансформаторами ТМГ12. Кабельные линии на 10 кВ выполняются кабелем АПвП и на 0,4 кВ кабелем АВБШв.

Будет обеспечиваться надежное электроснабжение ремонтной базы, проект СЭС предлагается к реализации.

Список используемой литературы и источников

1. Бондаренко С.И., Петрова А.Н. Электрическое освещение : учебное пособие. Иркутск : ИРНИТУ, 2022. 318 с.
2. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
3. Бирюлин В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
4. Голов Р.С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
5. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
6. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.
7. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
8. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
9. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. СПб. : Лань, 2023. 396 с.
10. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
11. Сибикин Ю.Д. Технология энергосбережения : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 336 с.
12. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение : учебное пособие. – 2-е изд., стер. М. : ИНФРА-М, 2023. 328 с.
13. Сибикин Ю.Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 417 с.

14. Фризен В.Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий : учебное пособие. – 2-е изд., испр. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2021. 194 с.
15. Хорольский В.Я. Эксплуатация систем электроснабжения : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2021. 288 с.
16. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования : учебное пособие. – 3-е изд., испр. М. : ИНФРА-М, 2023. 214 с.
17. Шеховцов В.П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.
18. Шеховцов В.П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.
19. Щербаков Е.Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 495 с.
20. Щербаков Е.Ф. Электрические аппараты : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 303 с.