

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Реконструкция системы электроснабжения производственного корпуса НПО
им. С.А. Лавочкина

Обучающийся

А.С. Худяков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

С.В. Шлыков

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

Тольятти 2024

Аннотация

Выпускная квалификационная работа включает 50 страниц, 7 рисунков, 7 таблиц, 20 источников.

Ключевые слова: производственный корпус, потребитель, электроприемник, нагрузка, электроснабжение, реконструкция, надежность, безопасность.

Выполнен анализ действующей системы электроснабжения, выявлены ключевые недостатки, согласно которым предложены мероприятия по реконструкции. Производственный корпус обеспечивается питанием электроэнергией от системы электроснабжения с устаревшим и изношенным оборудованием. Регулярные выходы из строя и неправильная работа отдельных единиц оборудования приводят к нарушениям питания отдельных единиц производственного оборудования и технологических линий, сбоям в общем технологическом процессе, массовому браку продукции, а также другим материальным и репутационным издержкам. Также, согласно техническим характеристикам действующего электрооборудования, невозможно подключение дополнительного энергоемкого производственного оборудования, которое планируется постепенно устанавливать для увеличения объемов выпускаемой продукции. Отмечается нарастание случаев электротравматизма среди работников. Выполнена разработка энергоэффективной системы освещения, проведен расчет актуальных электрических нагрузок. По результатам расчетов рабочих и аварийных режимов выбрано новое оборудование системы электроснабжения отечественного производства. Выполнен расчет заземляющего устройства и молниезащиты производственного корпуса.

Содержание

Введение	4
1 Характеристика предприятия, исходные данные на проектирование.....	7
1.1 Краткая характеристика предприятия	7
1.2 Анализ действующей системы электроснабжения, обоснование реконструкции	8
1.3 Исходные данные на проектирование.....	9
2 Разработка мероприятий по реконструкции системы электроснабжения ...	11
2.1 Расчет силовых нагрузок	11
2.2 Разработка энергоэффективной системы освещения, расчет итоговых электрических нагрузок	15
2.3 Компенсация реактивной мощности	18
2.4 Выбор силовых трансформаторов и марки подстанции	20
2.5 Расчет питающей высоковольтной линии, выбор кабелей	22
2.6 Расчет распределительной сети, выбор кабелей.....	25
2.7 Определение токов короткого замыкания	28
2.8 Выбор аппаратов защиты линий, расчет уставок релейной защиты и автоматики	34
2.9 Расчет заземляющего устройства и молниезащиты	42
Заключение	47
Список используемых источников.....	49

Введение

Электроснабжение промышленных предприятий (ПП) – это совокупность устройств, предназначенных для передачи и распределения электроэнергии между потребителями. Оно играет важную роль в обеспечении непрерывного технологического процесса, где идет большое потребление электрической энергии. Основными источниками электрической энергии (ЭЭ) являются тепловые и гидроэлектростанции, вырабатывающие ее при помощи синхронных трёхфазных генераторов. Затем электроэнергия передаётся на распределительные подстанции и поступает в распределительные пункты каждого цеха. «При создании системы электроснабжения (СЭС) учитываются такие показатели, как надежность электроприемников, тип используемого тока, режимы работы, мощность и напряжение. В системе промышленного электроснабжения основным током является переменный трехфазный ток с частотой 50 Гц. Однако для некоторых приёмников с повышенной или высокой частотой используются специальные установки» [12].

Эксплуатация электрооборудования (ЭО) неизбежно приводит к его физическому износу. Отмечается нарастающее снижение эксплуатационных характеристик, надежности и безопасности. Каждая марка ЭО имеет паспортный гарантийный срок работы, указываемый производителем, в рамках которого обеспечиваются штатные параметры работы оборудования. Однако часто ЭО остается в эксплуатации и по истечении паспортного срока, при этом значительно возрастают риски аварий и выходы из строя элементов ЭО, обесточивания линий питания потребителей, также недопустимо и резко возрастают профессиональные риски для персонала, эксплуатирующего и обслуживающего СЭС. Технологическое устаревание также неизбежно при длительной работе ЭО без замены на более современные аналоги. Научно-технический прогресс и совершенствование методов производства ЭО приводят к постоянному улучшению его технико-эксплуатационных

параметров и повышению общих требований к СЭС по энергоэффективности, надежности, безопасности и эргономике пользования.

Реконструкция систем электроснабжения производственных корпусов (ПК) – это процесс обновления и модернизации существующих систем с целью повышения их эффективности, надёжности и безопасности. Она включает замену устаревшего оборудования, оптимизацию схем распределения электроэнергии и внедрение современных технологий.

Основные задачи:

- обеспечение требуемой мощности и качества электроэнергии для всех потребителей;
- повышение уровня автоматизации и диспетчеризации процессов;
- снижение потерь электроэнергии и улучшение её учёта;
- обеспечение электромагнитной совместимости оборудования и защита от помех;
- соблюдение нормативных требований и стандартов безопасности.

Этапы реконструкции СЭС:

- анализ существующей системы электроснабжения;
- разработка проекта реконструкции;
- реализация проекта: закупка оборудования, монтаж новых элементов системы, демонтаж устаревшего оборудования, проведение пусконаладочных работ;
- проверка соответствия параметров системы проектным значениям, испытания и настройка оборудования, обучение персонала;
- мониторинг работы системы, проведение профилактических мероприятий, устранение неисправностей и аварийных ситуаций.

Реконструкция позволяет повысить эффективность работы СЭС, снизить затраты на электроэнергию и обеспечить надёжное и безопасное функционирование оборудования.

Актуальность темы. Производственный корпус НПО им. С.А. Лавочкина обеспечивается питанием электроэнергией от СЭС с устаревшим и изношенным оборудованием. Регулярные выходы из строя и неправильная работа отдельных единиц оборудования приводят к нарушениям питания отдельных единиц производственного оборудования и технологических линий, сбоям в общем технологическом процессе, массовому браку продукции, а также другим материальным и репутационным издержкам. Также, согласно техническим характеристикам действующего электрооборудования, невозможно подключение дополнительного энергоемкого производственного оборудования, которое планируется постепенно устанавливать для увеличения объемов выпускаемой продукции. Отмечается нарастание случаев электротравматизма среди работников, что вызвано недопустимым снижением сопротивления изоляции кабелей и элементов оборудования. Реконструкция системы электроснабжения производственного корпуса позволит устранить указанные недостатки и проблемы, расширить производство и снизить экономические и трудовые издержки и себестоимость продукции. Уменьшатся организационные, трудовые и материальные затраты на поддержание работоспособности оборудования. Таким образом, тема работы важна и актуальна.

Объект исследования: производственный корпус предприятия НПО им. С.А. Лавочкина.

Предмет исследования: система электроснабжения производственного корпуса.

Цель работы: проведение реконструкции системы электроснабжения для ее дальнейшей эффективной эксплуатации.

Практическая значимость работы заключается в последующей реализации предлагаемых мероприятий, которые обеспечат эффективную и безопасную работу системы электроснабжения и производственного корпуса в целом.

1 Характеристика предприятия, исходные данные на проектирование

1.1 Краткая характеристика предприятия

Научно-производственное объединение (НПО) имени С. А. Лавочкина – это предприятие российской ракетно-космической промышленности, основная продукция объединения – космические аппараты и разгонные блоки. Оно входит в состав госкорпорации «Роскосмос» и расположено в городе Химки Московской области. История предприятия началась с создания авиационного завода № 293 в апреле 1937 года. В 1939 году было организовано ОКБ-301 для разработки скоростного истребителя И-301 (в дальнейшем ЛаГГ-3). В 1965 году предприятие перешло в Министерство общего машиностроения СССР и занялось созданием космических систем связи, спутников и спускаемых аппаратов для исследования планет. Космические аппараты, созданные на НПО им. С. А. Лавочкина, впервые осуществили мягкую посадку на Луну, доставили образцы лунного грунта на Землю и провели длительные походы по поверхности Луны с помощью самоходного аппарата «Луноход-1». В настоящее время предприятие продолжает разрабатывать и запускать различные космические аппараты, включая метеорологические и научные спутники.

Производство предприятия расположено в нескольких отдельных производственных корпусах, по составу производственного оборудования специализирующихся на выпуске различной продукции. В данной работе рассматриваются вопросы реконструкции системы электроснабжения производственного корпуса (ПК) металлоизделий, в котором установлено современное промышленное оборудование, для эффективной, надежной и безопасной работы которого требуется провести мероприятия по реконструкции СЭС производственного корпуса.

1.2 Анализ действующей системы электроснабжения, обоснование реконструкции

Действующая СЭС производственного корпуса эксплуатируется более 37 лет, можно выделить следующие причины необходимости проведения ее реконструкции:

- критический износ электрооборудования, существенно снижена надежность электроснабжения, повышены профессиональные риски для рабочих и увеличены эксплуатационные трудовые и финансовые затраты на ремонт и обслуживание ЭО;
- технологическое устаревание ЭО, включая систему освещения, обуславливающее несоответствие технико-эксплуатационных характеристик актуальным современным требованиям по энергосбережению, надежности, безопасности;
- несоответствие технических параметров действующей СЭС актуальным и перспективным электрическим нагрузкам;
- низкая общая энергоэффективность системы электроснабжения ввиду отсутствия компенсации реактивной мощности, использования устаревших марок электрооборудования (силовых трансформаторов с высокими внутренними потерями мощности и энергии, устаревших светильников с лампами ДРЛ и люминесцентными лампами и т.д.);
- плохая экологичность действующей СЭС ввиду использования устаревших марок оборудования (например, необходимы регулярные слив и замена масла, замена и утилизация ламп с содержанием паров ртути и т.д.), экономические, организационные и трудовые затраты на поддержание охраны окружающей среды повышены.

Реконструкция СЭС производственного корпуса позволит устранить указанные проблемы, ее планируется проводить в ближайшее время.

1.3 Исходные данные на проектирование

Рассматриваемый производственный корпус специализируется на выпуске металлоизделий. Производство металлических изделий (МИ) – это сложный и важный процесс в современной промышленности, включает в себя выбор подходящего материала, создание необходимой формы изделия, обработку материала и изготовление конечных металлических конструкций, деталей и элементов. Основные этапы производства начинаются с выбора материала, который зависит от функциональных требований, структурных характеристик и условий эксплуатации изделия. Затем происходит создание металлической конструкции с использованием методовковки, литья, сварки или гибки и формовки. Обработка материала также играет ключевую роль в производстве, термическая, механическая и химическая обработка металла придают изделиям необходимые свойства, улучшают прочность и повышают долговечность. МИ широко используются в продукции и деятельности предприятия, они являются неотъемлемой частью создания структур и механизмов, обеспечивая прочность, устойчивость и возможность создания разнообразных форм и конфигураций. Современное производство МИ активно использует технологии и инновации, такие как автоматизация и роботизация, комплексные производственные линии, а также новые материалы и сплавы для создания качественных, точных и функциональных продуктов. Электроприемниками (ЭП) производственного корпуса являются линии роботизированной сварки (ЛРС), комплексные автоматизированные производственные линии, станки, покрасочная линия, электроприводы компрессоров, насоса. В состав электрических нагрузок также входят вспомогательные помещения с их электрооборудованием и осветительная нагрузка. ЭП питаются от трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ, расположенной снаружи, с южной стороны здания. ТП питается от главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия по кабельной линии 10 кВ.

Перечень электрических нагрузок приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень электрических нагрузок

Электроприемники	Номер на плане	$P_{ном},$ кВт	$K_{и}$	$\cos\varphi$	Режим ПВ, %
Производственная линия	21,22	55,8	0,29	0,72	-
Производственная линия	23	39	0,19	0,68	-
Производственная линия	24-26	41	0,19	0,69	-
Производственная линия	27	37	0,2	0,72	-
Линия роботизированной сварки (ЛРС)	1, 3-5,7-10, 12-20	31	0,16	0,38	60
Многофункциональный станок	2	28	0,29	0,59	
Шлифовочный станок	6,11	63	0,31	0,64	
Водоподготовка	31	19,2	0,59	0,9	-
Компрессор	28,29	48	0,69	0,78	-
Насос	30	42,5	0,68	0,81	-
Лаборатория	32	7,2	0,3	0,88	-
Бытовка	33,34	5	0,33	0,84	-
Кран мостовой	35	19	0,22	0,58	25
Кран мостовой	36	57	0,22	0,59	
Покрасочная линия	40	252	0,19	0,64	-
Аппарат ручной сварки	37-39	24,5	0,31	0,41	40

В таблице 1 приведены названия электроприемников, номера из обозначения на плане производственного корпуса, коэффициенты использования активной нагрузки и коэффициенты мощности. Некоторые из электроприемников работают в повторно-кратковременном режиме (ПВ), процент использования в режиме ПВ приведен в таблице.

План производственного корпуса с расположением электроприемников приведен на листе 2 графической части.

Выводы по разделу 1.

Приведена краткая характеристика предприятия, выполнен анализ действующей системы электроснабжения производственного корпуса, обосновано проведение реконструкции. Систематизированы необходимые для разработки мероприятий по реконструкции исходные данные.

2 Разработка мероприятий по реконструкции системы электроснабжения

2.1 Расчет силовых нагрузок

«Расчёт электрических нагрузок – один из ключевых этапов проектирования системы электроснабжения, определяет основные параметры и характеристики системы, такие как распределительные сети, питание, электрические подстанции и линии электропередачи» [1]. Существует несколько методов расчёта электрических нагрузок, выбор которых зависит от поставленных задач, требуемой точности и исходных данных. Обычно расчёт начинается с нижних уровней и постепенно переходит к высшим. В некоторых случаях, например при проектировании электроснабжения крупных предприятий, расчёты проводятся от высших уровней к нижним. Расчёт электрических нагрузок имеет большое значение для обеспечения надёжности и эффективности работы системы электроснабжения, а также для оптимизации затрат на электроэнергию и оборудование.

«Для расчета актуальных электрических нагрузок используется метод коэффициента использования активной мощности нагрузок.

Формула для расчета среднесменных активных мощностей по ЭП:

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

где K_u – коэффициент использования активной мощности;

$P_{ном}$ – номинальная активная мощность ЭП, кВт.

Среднесменные реактивные и полные мощности:

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

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

Пример расчета нагрузок (ЭП №1), по (1-3):

$$P_c = 0,16 \cdot 24,03 = 3,844 \text{ кВт},$$

$$Q_c = 3,844 \cdot 2,434 = 9,357 \text{ квар},$$

$$S_c = \sqrt{3,844^2 + 9,357^2} = 10,116 \text{ кВА}.$$

Для узлов нагрузки, распределительных пунктов (РП), расчетные мощности:

$$P_p = P_c \cdot K_p, \quad (4)$$

где K_p – коэффициент расчетной нагрузки.

Групповой коэффициент использования активной мощности:

$$K_u = \frac{\sum P_c}{\sum P_n}; \quad (5)$$

где $\sum P_c$, $\sum P_n$ – суммы среднесменных и номинальных нагрузок, кВт.

Расчетная реактивная мощность:

$$\text{при } n_g \leq 10: Q_p = 1,1 \cdot Q_c, \quad (6)$$

$$\text{при } n_g > 10: Q_p = Q_c, \quad (7)$$

$$n_g = \frac{(\sum P_n)^2}{\sum P_n^2}, \quad (8)$$

где n_g – эффективное число ЭП, шт» [12].

Для РП-1, по (3-7):

$$K_u = \frac{62,737}{285,15} = 0,22,$$

$$P_p = 62,737 \cdot 1,79 = 112,299 \text{ кВт},$$

$$Q_p = 1,1 \cdot 124,317 = 136,749 \text{ квар},$$

$$S_p = \sqrt{112,299^2 + 136,749^2} = 176,95 \text{ кВА}.$$

Результаты расчетов силовых нагрузок – в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов силовых нагрузок

№ ЭП (РП)	Среднесменная нагрузка			n _э	Кр	Расчетная нагрузка		
	Рс, кВт	Qс, квар	Sc, кВА			Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА
РП-1								
1	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-
2	6,293	8,612	10,666	-	-	-	-	-
3	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-
4				-	-	-	-	-
5				-	-	-	-	-
9				-	-	-	-	-
10				-	-	-	-	-
11	15,136	18,172	23,650	-	-	-	-	-
12	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-
37	4,8	10,678	11,707	-	-	-	-	-
38				-	-	-	-	-
39				-	-	-	-	-
∑РП-1	62,737	124,317	140,248	9	1,79	112,299	136,749	176,950
РП-2								
6	15,136	18,172	23,65	-	-	-	-	-
7	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-
8				-	-	-	-	-
13				-	-	-	-	-
14				-	-	-	-	-
15				-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 2

№ ЭП (РП)	Среднесменная нагрузка			n _э	Кр	Расчетная нагрузка			
	P _с , кВт	Q _с , квар	S _с , кВА			P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА	
16	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-	
21	16,182	15,597	22,475	-	-	-	-	-	
22				-	-	-	-	-	-
34	1,65	1,066	1,964	-	-	-	-	-	
35	2,09	2,935	3,603	-	-	-	-	-	
∑РП-2	74,304	109,509	134,862	7	2,01	149,351	120,460	191,875	
РП-3									
17	3,844	9,357	10,116	-	-	-	-	-	
18				-	-	-	-	-	-
19				-	-	-	-	-	-
20				-	-	-	-	-	-
23	7,41	7,99	10,897	-	-	-	-	-	
24	7,79	8,172	11,29	-	-	-	-	-	
25				-	-	-	-	-	
26				-	-	-	-	-	-
27	7,4	7,133	10,278	-	-	-	-	-	
28	33,12	26,572	42,462	-	-	-	-	-	
29				-	-	-	-	-	
36	6,27	8,58	10,627	-	-	-	-	-	
∑РП-3	126,066	138,789	191,058	12	1,6	201,706	152,668	252,968	
РП-4									
30	28,9	20,923	35,679	-	-	-	-	-	
31	11,328	5,486	12,587	-	-	-	-	-	
32	2,16	1,166	2,455	-	-	-	-	-	
33	1,65	1,066	1,964	-	-	-	-	-	
40	47,880	57,484	74,813	-	-	-	-	-	
∑РП-4	91,918	86,125	127,497	3	2,39	219,684	86,125	235,963	
∑						683,039	496,001	844,133	

Осветительная нагрузка также входит в общую нагрузку производственного корпуса.

2.2 Разработка энергоэффективной системы освещения, расчет итоговых электрических нагрузок

«Энергоэффективное светодиодное освещение – это современный и эффективный способ экономии энергии и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Светодиоды обладают рядом преимуществ перед традиционными источниками света, такими как лампы накаливания, галогенные и люминесцентные лампы, они потребляют значительно меньше электроэнергии, имеют увеличенный срок службы и высокую яркость» [6]. Светодиодные светильники также отличаются прочностью, вандалозащищённостью, устойчивостью к помехам и перепадам напряжения, а также меньшим нагревом, это делает их идеальным выбором для различных сфер применения, включая промышленное, производственное, складское, жилое, офисное, учебное и медицинское освещение. Отсутствие ультрафиолетового излучения предотвращает выгорание и выцветание красок. Энергоэффективное светодиодное освещение, или LED, представляет собой одну из наиболее перспективных технологий в области освещения, этот подход не только значительно снижает потребление электроэнергии, но и способствует улучшению экологической ситуации, снижая выбросы углекислого газа и других вредных веществ.

«Нормы освещенности для помещений цеха принимаются согласно СанПиН 2.3.4.050-96» [19].

Расчет освещения участка водоподготовки.

«Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (9)$$

где A , B , h – длина, ширина и высота помещения, м.

$$i = \frac{12,1 \cdot 6,6}{9 \cdot (12,1 + 6,6)} = 0,477.$$

Требуемый суммарный световой поток:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{K_u}, \quad (10)$$

где E – нормируемая освещенность, лм;

S – площадь помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса;

Z – коэффициент минимальной освещенности;

K_u – коэффициент использования светового потока» [19].

$$\Phi = \frac{200 \cdot 81 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,36} = 73652 \text{ лм.}$$

Принимаются к установке светильники NT-PROM 100Л, световой поток 15100 лм, внешний вид – на рисунке 1.



Рисунок 1 – Светильник NT-PROM 100Л

«Требуемое число светильников:

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_c}, \quad (11)$$

где Φ_c – световой поток одного светильника, лм.

$$N = \frac{73652}{15100} \approx 5 \text{ шт.}$$

На основном участке применяются модули по четыре светильника NT-PROM 100Л, расчет освещения сведен в таблице 3.

Таблица 3 – Расчет освещения

Помещение	F, м ²	Число светильников, шт	Фс, лм
Водоподготовка	81	5	15100
Бытовка	58	4	
	81	6	
Мастерская	56	5	
Сварочный участок	135	7	
Склад	270	5	
Основной участок	8412	46	60400

Аварийное освещение принимается равным 5% от рабочего, при этом каждое помещение и проход освещаются отдельными светильниками» [19].

Нагрузки ТП с учетом освещения:

$$P_{po} = 78 \cdot 0,100 + 683,039 = 690,839 \text{ кВт,}$$

$$Q_{po} = 78 \cdot 0,100 \cdot 0,329 + 496,001 = 498,568 \text{ квар,}$$

$$S_{po} = \sqrt{690,839^2 + 498,568^2} = 851,956 \text{ кВА.}$$

План осветительной сети после реконструкции приведен на листе 1 графической части.

2.3 Компенсация реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности является важным аспектом современной электроэнергетической системы, она позволяет поддерживать стабильность напряжения и предотвращать перегрузки в линиях передачи, что особенно важно в условиях роста нагрузки на энергосистему. Реактивная мощность возникает в результате индуктивного и емкостного сопротивления в цепях переменного тока, в отличие от активной мощности, которая преобразуется в полезную работу, реактивная мощность не используется для производства электроэнергии, а лишь потребляется и рассеивается в виде тепла. Это приводит к увеличению потерь в линиях передачи и на трансформаторах, что негативно сказывается на эффективности использования энергетических ресурсов. Одним из ключевых методов КРМ является использование конденсаторных установок, эти устройства могут накапливать и высвобождать энергию в зависимости от потребностей системы. Конденсаторы могут работать как в режиме активного, так и в режиме рекуперации, что позволяет оптимизировать нагрузку на сеть и снизить потери.

«Компенсация реактивной мощности (КРМ) производится до нормативного значения коэффициента мощности $\cos \varphi = 0,95$. Требуемая мощность компенсирующих устройств (КУ):

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot P_p \cdot (tg \varphi - tg \varphi_k), \quad (12)$$

где P_p – активная нагрузка, кВт;

$tg\varphi$ – тангенс угла φ до КРМ;

$tg\varphi_k$ – нормативное значение, эквивалентное $\cos\varphi = 0,95$)» [13] .

$$Q_{к.у.} = 0,9 \cdot 690,839 \cdot (0,722 - 0,33) = 243,53 \text{ квар.}$$

КРМ на шинах 0,4 кВ ТП будет производиться двумя автоматическими установками АУКРМ-0,4-125 максимальной мощностью по 125 квар.

Расчет нагрузок ТП – в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет нагрузок ТП

Показатели	cosφ	tgφ	Pp, кВт	Qp, квар	Sp, кВА
Σ на НН	0,811	0,722	690,839	498,568	851,956
КУ, квар	-	-	-	250	-
Σ на НН с КУ	0,941	0,360	690,839	248,568	734,197
Потери	-	-	14,684	73,420	-
Σ на ВН с КУ	-	-	705,523	321,987	775,525

Приближенные потери мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot S_p, \quad (13)$$

$$\Delta P_m = 0,02 \cdot 734,197 = 14,684 \text{ кВт,}$$

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot S_p, \quad (14)$$

$$\Delta Q_m = 0,1 \cdot 734,197 = 73,42 \text{ квар.}$$

Полная нагрузка с учетом потерь в ТП, по (3):

$$S'_p = \sqrt{(690,839 + 14,684)^2 + (248,568 + 73,42)^2} = 775,525 \text{ кВА.}$$

Автоматическая компенсация реактивной мощности с помощью установок «АУКРМ – это эффективное решение для оптимизации работы электрооборудования и снижения потерь в электрических сетях, АУКРМ автоматически регулируют количество подключённых ступеней в зависимости от нагрузки в сети, обеспечивая стабильную работу оборудования и снижение потребления реактивной мощности. Основное преимущество АУКРМ перед неавтоматическими установками заключается в полной автоматизации процесса компенсации, что минимизирует затраты времени на обслуживание и повышает эффективность работы системы» [5]. Кроме того, АУКРМ самостоятельно восстанавливают свою работу после сбоев в электроснабжении, что исключает необходимость дополнительных вмешательств со стороны персонала. «Применение АУКРМ позволяет решить ряд проблем, связанных с недостаточной мощностью трансформаторов, заниженным напряжением, значительными потерями мощности, перегревом проводов и кабелей, а также высокими счетами за электроэнергию. Обеспечивается повышение уровня напряжения, снижение потерь активной мощности и сокращение счетов за электроэнергию» [5].

2.4 Выбор силовых трансформаторов и марки подстанции

«Если в состав нагрузок ТП входят потребители 1 и/или 2 категорий надежности электроснабжения, устанавливается два силовых трансформатора.

Требуемая мощность трансформаторов с учетом КРМ:

$$S_m \geq K_{з.н.} \cdot S_{р.к.}, \quad (15)$$

где $K_{з.н.}$ – нормативный коэффициент загрузки;

$S_{р.к.}$ – расчетная нагрузка, кВА» [4].

$$S_m \geq 0,7 \cdot 734,197 = 513,94 \text{ кВА.}$$

Выбираются трансформаторы ТМГ12-630.

«Проводится проверка по коэффициенту загрузки в аварийном режиме:

$$K_{з.ав.} = \frac{S_{п.к.}}{S_m}, \quad (16)$$

где S_m – номинальная мощность силового трансформатора, кВА» [10].

$$K_{з.ав.} = \frac{734,197}{630} = 1,17 \leq 1,4.$$

Выбирается ТП марки 2КТПН-630/10/0,4.

«Комплектные трансформаторные подстанции 2КТПН-10/0,4 с коридорами обслуживания, мощностью 100-2500 кВА предназначены для приема электрической энергии трехфазного переменного тока частоты 50 Гц напряжением 6 или 10 кВ, преобразования в электрическую энергию 0,4 кВ и снабжения ею потребителей. Подстанции предназначены для энергоснабжения промышленных объектов, жилых комплексов, общественных зданий, населенных пунктов, сельскохозяйственных предприятий, стройплощадок, кустов скважин газовых и нефтяных месторождений. Все двери подстанции снабжены внутренними реечными замками и петлями под навесной замок. В стандартный комплект ТП входит электрооборудование:

- выключатели нагрузки ВНРп-10;
- трансформаторы тока ТПЛК-10;
- трансформаторы напряжения НАМИ-10;
- ограничители перенапряжения ОПН-10;
- предохранители ПКТ-103;

- автоматические выключатели ВА-52-39;
- трансформаторы тока ТШЛ-0,66» [3].

Подстанции комплектные трансформаторные (КТП) играют ключевую роль в энергоснабжении различных объектов и населенных пунктов, они позволяют эффективно распределять и передавать электрическую энергию, обеспечивая стабильное и надежное электроснабжение. Основные преимущества использования КТП:

- оснащены системами автоматического отключения и защиты, что обеспечивает высокий уровень безопасности при эксплуатации, это особенно важно для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения надежного электроснабжения;
- «могут быть выполнены в различных вариантах исполнения, что позволяет подобрать устройство под конкретные условия эксплуатации, это делает их удобными для использования в различных климатических и географических условиях» [13];
- позволяют значительно снизить эксплуатационные расходы за счет оптимизации потребления электроэнергии и снижения потерь при передаче, это достигается за счет использования современных трансформаторов и систем управления;
- могут быть легко интегрированы в существующие системы энергоснабжения, что позволяет оптимизировать распределение и потребление электроэнергии, а также снизить нагрузку на сети.

2.5 Расчет питающей высоковольтной линии, выбор кабелей

«Рабочий ток КЛ 10 кВ:

$$I_p = \frac{S'_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot n}, \quad (17)$$

где S'_p – расчетная нагрузка на вводе 10 кВ ТП, кВА;

U_n – номинальное напряжение, кВ;

n – число цепей, шт.

$$I_p = \frac{775,5}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 22,4 \text{ А.}$$

Экономическое сечение жилы кабеля:

$$F_{\text{эк}} = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \quad (18)$$

где $j_{\text{эк}}$ – экономическая плотность тока, А/мм² [14].

$$F_{\text{эк}} = \frac{22,4}{1,4} = 16 \text{ мм}^2.$$

Принимаем кабель АПВП-3×16 мм².

«Ток аварийного режима, по (17):

$$I_{\text{ав}} = \frac{775,5}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1} = 44,8 \text{ А.}$$

Допустимый ток кабеля с учетом условий прокладки:

$$I'_{\text{дон}} = I_{\text{дон}} \cdot K_{\text{нов}} \cdot K_{\text{ср}} \cdot K_{\text{пон}}, \quad (19)$$

где $I_{\text{дон}}$ – паспортный допустимый ток, А;

$K_{\text{нов}}$, $K_{\text{ср}}$, $K_{\text{пон}}$ – коэффициенты, учитывающие недогруженность

КЛ, среду и групповую прокладку.

$$I'_{дон} = 75 \cdot 1,25 \cdot 1,08 \cdot 0,93 = 94,163 \text{ А} > I_{ав}.$$

Потери напряжения в КЛ:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot 100}{U_n} (r_0 \cdot \cos \varphi + x_0 \cdot \sin \varphi), \quad (20)$$

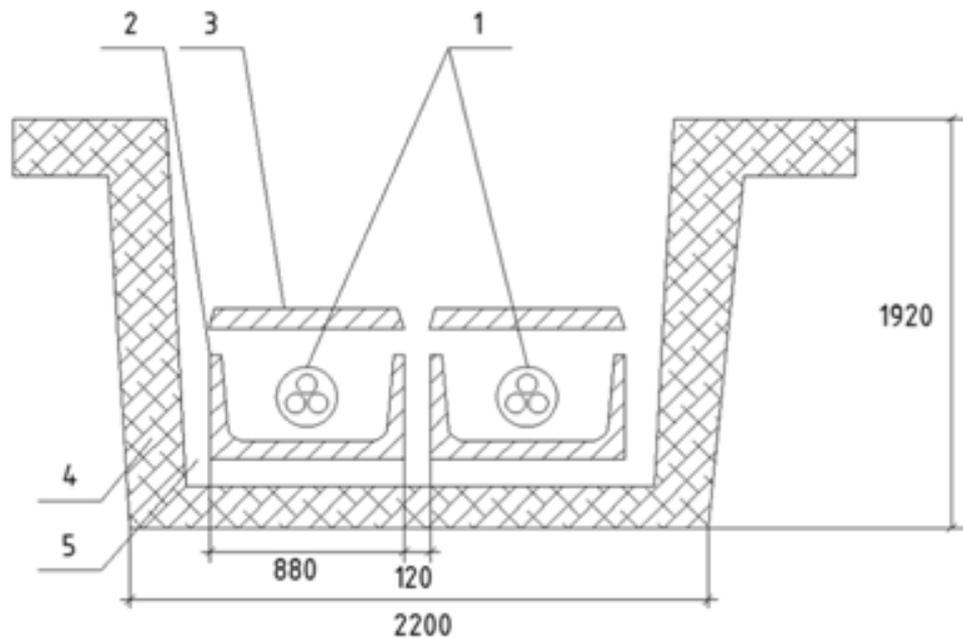
где I_p – максимальный расчетный ток КЛ, А;

L – длина КЛ, км;

r_0, x_0 – удельные сопротивления кабеля, Ом/км» [9].

$$\Delta U_{л} = \frac{\sqrt{3} \cdot 44,8 \cdot 0,8 \cdot 100}{10} (1,94 \cdot 0,91 + 0,102 \cdot 0,415) = 0,28 \% < 5 \%$$

Схема прокладки КЛ 10 кВ показана на рисунке 2.



1 – силовой кабель; 2 – лоток железобетонный; 3 – плита железобетонная;
4 – песчано-гравийная смесь; 5 – песчаная подготовка

Рисунок 2 – Схема прокладки КЛ 10 кВ

Выбранные кабели со СПЭ-изоляцией (с полиэтиленовой изоляцией) обладают рядом значительных преимуществ перед традиционными кабелями с бумажной изоляцией. Одним из основных преимуществ является высокая механическая прочность и устойчивость к внешним воздействиям, что делает их «идеальными для прокладки в сложных условиях, таких как высокая влажность, химически агрессивные среды и механические нагрузки. СПЭ-изоляция также обладает высокой термической стабильностью, что позволяет кабелю сохранять свои изоляционные свойства при высоких температурах и предотвращает возгорание при коротком замыкании» [20]. Ещё одним преимуществом является долговечность кабелей со СПЭ-изоляцией, которые рассчитаны на более длительный срок службы по сравнению с традиционными аналогами [17]. Также важным аспектом является экологическая безопасность данных кабелей, использование полиэтилена в изоляции снижает риск загрязнения окружающей среды, что особенно важно в условиях растущей озабоченности по поводу воздействия на экосистемы. Наконец, современные технологии производства СПЭ-кабелей позволяют создавать изделия с минимальными издержками, что способствует снижению затрат на эксплуатацию и обслуживание.

2.6 Расчет распределительной сети, выбор кабелей

Действующая распределительная сеть по своей структуре (радиальная, с индивидуальным питанием ЭП и РП) отвечает всем технико-эксплуатационным потребностям, обеспечивая надежность питания и возможность индивидуального отключения всех ЭП и РП. Таким образом, структура распределительной сети не будет меняться, что также упростит проведение реконструкции. Новые современные кабели, с соответствующими актуальным нагрузкам сечениям жил, будут проложены по существующим трассам вместо устаревших и изношенных действующих кабелей.

«Кабельные линии на 0,4 кВ и 0,23 кВ выполняются кабелями АВВГнг-LS и КГ (подвижные краны). Кабели прокладываются в коробах в полу помещений и в защитной гофре» [8]. План силовой распределительной сети – на листе 2 графической части.

Расчет для КЛ до ЭП №1. «Наибольший ток линии:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (21)$$

где S_p – расчетная мощность ЭП, кВА;

U_n – напряжение линии, кВ.

$$I_p = \frac{63,24}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 91,3 \text{ А}$$

Выбирается кабель АВВГнг-LS-3×25+1×16, допустимый ток 98 А, с учетом групповой прокладки кабелей.

При расчете потерь напряжения в сети до 1 кВ индуктивным сопротивлением проводов можно пренебречь» [18]. Потери напряжения в КЛ, по (20):

$$\Delta U_n = \frac{\sqrt{3} \cdot 91,3 \cdot 11,49 \cdot 100}{0,38} (0,00124 \cdot 0,38 + 0 \cdot 0,705) = 0,23 \% < 5 \%$$

Выбор кабелей сведен в таблице 6.

Таблица 5 – Выбор кабелей распределительной сети

Участок, № ЭП/ПП	I_p , А	Кабель	$I_{доп}$, А	ΔU , %
1	91,3	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,23
2	53,1	АВВГнг-LS-4×10	55	0,83

Продолжение таблицы 5

Участок, № ЭП/РП	Ip, А	Кабель	Идоп, А	ΔU , %
3	91,3	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,52
4				0,68
5				0,83
9				0,62
10				0,51
11	110,1	АВВГнг-LS-3×35+1×25	115	0,52
12	91,3	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,66
37	54,5	АВВГнг-LS-4×10	55	0,14
38				0,32
39				0,47
ввод РП-1	965,5	4×АВВГнг-LS-3×185+1×95	1191	0,31
6	110,1	АВВГнг-LS-3×35+1×25	115	0,10
7	91,3	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,29
8				0,40
13				0,64
14				0,52
15				0,40
16				0,20
21	111,9	АВВГнг-LS-3×35+1×25	115	1,16
22				0,83
34	8,6	ВВГнг-LS-5×2,5	25	1,46
35	23,6	КГ-4×2,5	26	2,96
ввод РП-2	913,6	4×АВВГнг-LS-3×185+1×95	1191	0,20
17	91,3	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,87
18				0,72
19				0,64
20				0,76
23	82,8	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	0,62
24	85,8			0,85
25				1,18
26				1,47
27	74,2	АВВГнг-LS-4×16	77	2,40
28	88,8	АВВГнг-LS-3×25+1×16	98	1,23
29				0,98
36	69,7	КГ-4×10	71	2,65
ввод РП-3	1026,6	4×АВВГнг-LS-3×185+1×95	1191	0,55
30	75,7	АВВГнг-LS-4×16	77	0,37
31	30,8	ВВГнг-LS-5×4	38	1,19
32	11,8	ВВГнг-LS-5×2,5	25	0,49
33	8,6			0,87
40	568,3	2×АВВГнг-LS-3×185+1×95	596	0,22
ввод РП-4	695,3	2×АВВГнг-LS-3×240+1×120	751	1,15

Новые кабели обеспечат надежное электроснабжение потребителей.

2.7 Определение токов короткого замыкания

Расчетные схемы – на рисунке 3.

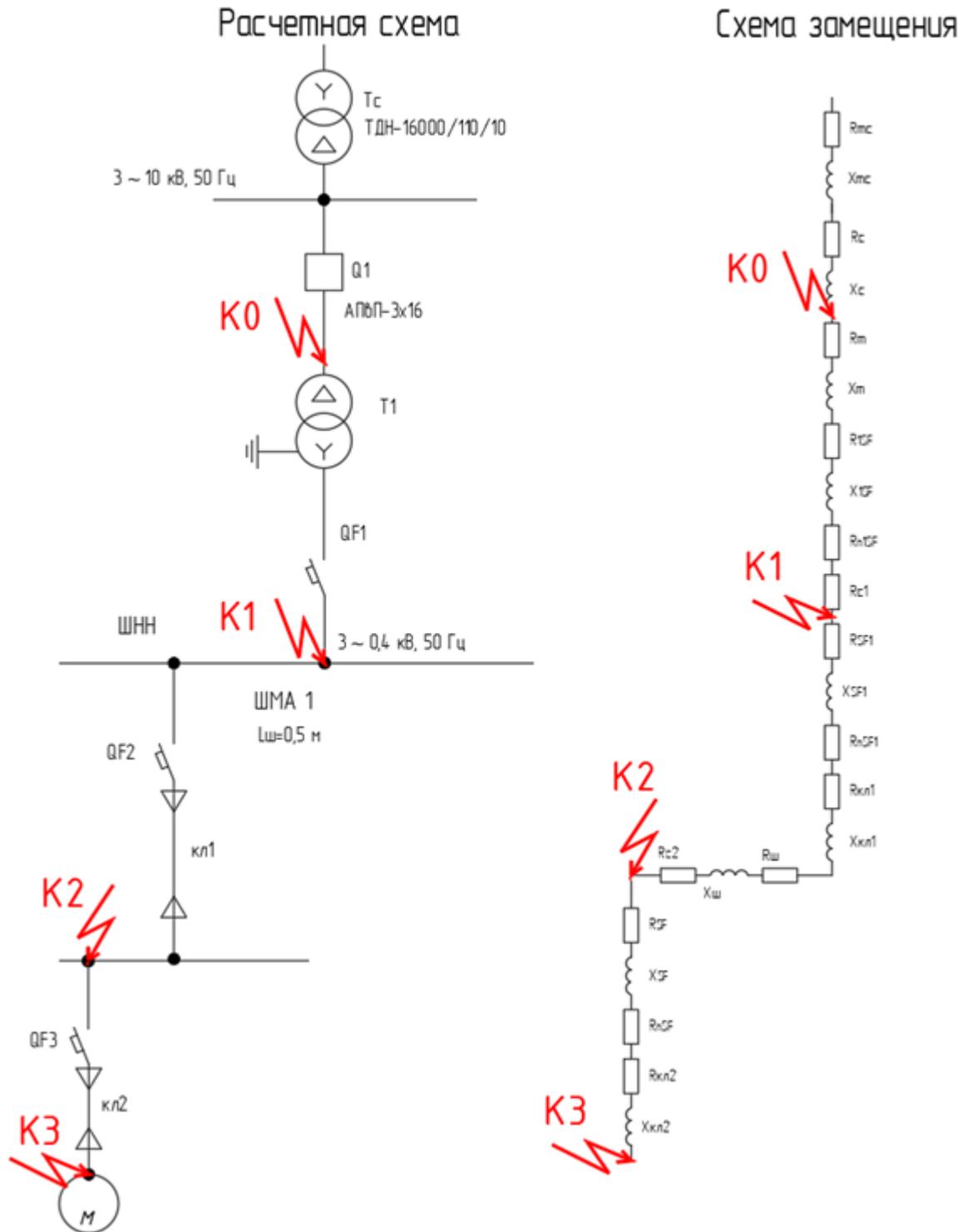


Рисунок 3 – Расчетные схемы для определения токов КЗ

Расчет токов КЗ для точки КЗ (ввод ЭП №1).

«Полное сопротивление трансформатора ГПП:

$$Z'_{mc} = \frac{u_k \cdot U_{вн}^2}{100 \cdot S_n}, \quad (22)$$

где u_k – напряжение КЗ, %;

$U_{вн}$ – напряжение обмотки ВН, кВ;

S_n – номинальная мощность, МВА.

$$Z'_{mc} = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 16} = 79,4 \text{ Ом.}$$

Активное и индуктивное сопротивления трансформатора ГПП:

$$R'_{mc} = \frac{P_k \cdot U_{вн}^2}{S_n^2}, \quad (23)$$

где P_k – потери КЗ, Вт» [12].

$$R'_{mc} = \frac{85000 \cdot 110^2}{16000^2} = 4,018 \text{ Ом.}$$

$$X'_{mc} = \sqrt{Z_{mc}^2 - R_{mc}^2}, \quad (24)$$

$$X'_{mc} = \sqrt{79,4^2 - 4,018^2} = 79,29 \text{ Ом.}$$

«Приведенные сопротивления КЛ 10 кВ и трансформатора ГПП:

$$X'_c = x_0 \cdot L_c, \quad (25)$$

где L_c – длина КЛ, км.

$$X'_c = 0,102 \cdot 0,8 = 0,082 \text{ Ом.}$$

$$R'_c = r_0 \cdot L_c, \quad (26)$$

$$R'_c = 1,94 \cdot 0,8 = 1,552 \text{ Ом.}$$

$$R_{mc} = R'_{mc} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{U_{\text{вн}}^2}, \quad (27)$$

$$R_{mc} = 4,018 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 6,429 \text{ мОм;}$$

$$X_{mc} = X'_{mc} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{U_{\text{вн}}^2}, \quad (28)$$

$$X_{mc} = 79,29 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 126,864 \text{ мОм;}$$

$$R_c = R'_c \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{U_{\text{вн}}^2}, \quad (29)$$

$$R_c = 1,552 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 2,48 \text{ мОм;}$$

$$X_c = X'_c \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{U_{\text{вн}}^2}, \quad (30)$$

$$X_c = 0,082 \cdot \frac{0,4^2}{10^2} = 0,131 \text{ мОм.}$$

Сопротивления трансформатора ТП, автоматов и шинпровода принимаются по справочным данным.

Сопротивления КЛ до РП» [12]:

$$R_{\text{кл1}} = r_0 \cdot L_{\text{кл1}}, \quad (31)$$

$$R_{\text{кл1}} = 0,109 \cdot 56,28 = 6,124 \text{ мОм.}$$

$$X_{\text{кл1}} = x_0 \cdot L_{\text{кл1}}, \quad (32)$$

$$X_{\text{кл1}} = 0,0413 \cdot 56,28 = 2,326 \text{ мОм.}$$

Сопровитвления КЛ до ЭП №1, по (34,35):

$$R_{кл2} = 8,65 \cdot 4,63 = 40,0545 \text{ мОм};$$

$$X_{кл2} = 0,637 \cdot 4,63 = 2,95 \text{ мОм}.$$

«Сопровитвления шинопровода ШРА 630 по справочным данным:
 $r_0 = 0,1 \text{ мОм/м}$; $x_0 = 0,13 \text{ мОм/м}$. Удельные сопротивление петли фаза-ноль:
 $r_{0п} = 0,2 \text{ мОм/м}$; $x_{0п} = 0,26 \text{ мОм/м}$.

$$R_{ш} = r_0 \cdot L_{ш}, \quad (33)$$

$$R_{ш} = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05 \text{ мОм};$$

$$X_{ш} = x_0 \cdot L_{ш}, \quad (34)$$

$$R_{ш} = 0,13 \cdot 0,5 = 0,065 \text{ мОм}.$$

Для ступеней распределения, переходные сопротивление:
 $R_{с1} = 15 \text{ мОм}$; $R_{с2} = 20 \text{ мОм}$ » [12].

«Сопровитвления цепи на участках между точками КЗ:

$$R_{\text{э}0} = R_{mc} + R_c, \quad (35)$$

$$R_{\text{э}0} = 6,429 + 2,48 = 8,91 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}0} = X_{mc} + X_c, \quad (36)$$

$$X_{\text{э}0} = 126,864 + 0,131 = 126,995 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{э}1} = R_m + R_{QF1} + R_{nQF1} + R_{с1}, \quad (37)$$

$$R_{\text{э}1} = 9,4 + 0,06 + 0,07 + 15 = 24,53 \text{ мОм};$$

$$X_{\text{э}1} = X_m + X_{QF1}, \quad (38)$$

$$X_{\text{э}1} = 27,2 + 0,07 = 27,27 \text{ мОм};$$

$$R_{\text{э}2} = R_{QF2} + R_{nQF2} + R_{кл1} + R_{ш} + R_{с2}, \quad (39)$$

$$R_{\text{э}2} = 0,112 + 0,25 + 6,124 + 0,05 + 20 = 26,536 \text{ мОм};$$

$$X_{\vartheta 2} = X_{QF2} + X_{\kappa 1} + X_u, \quad (40)$$

$$X_{\vartheta 2} = 0,13 + 2,326 + 0,065 = 2,521 \text{ мОм};$$

$$R_{\vartheta 3} = R_{QF3} + R_{nQF3} + R_{\kappa 2}, \quad (41)$$

$$R_{\vartheta 3} = 1,3 + 0,75 + 40,0545 = 42,1045 \text{ мОм};$$

$$X_{\vartheta 3} = X_{QF3} + X_{\kappa 2}, \quad (42)$$

$$X_{\vartheta 3} = 1,2 + 2,95 = 4,15 \text{ мОм}.$$

Сопротивления до точек КЗ:

$$R_{\kappa 0} = R_{\vartheta 0} = 8,91 \text{ мОм};$$

$$X_{\kappa 0} = X_{\vartheta 0} = 126,995 \text{ мОм};$$

$$Z_{\kappa 0} = \sqrt{R_{\kappa 0}^2 + X_{\kappa 0}^2}, \quad (43)$$

$$Z_{\kappa 0} = \sqrt{8,91^2 + 126,995^2} = 127,307 \text{ мОм};$$

$$R_{\kappa 1} = R_{\vartheta 0} + R_{\vartheta 1}, \quad (44)$$

$$R_{\kappa 1} = 8,91 + 24,53 = 33,44 \text{ мОм};$$

$$X_{\kappa 1} = X_{\vartheta 0} + X_{\vartheta 1}, \quad (45)$$

$$X_{\kappa 1} = 126,995 + 27,27 = 154,265 \text{ мОм};$$

$$Z_{\kappa 1} = \sqrt{33,44^2 + 154,265^2} = 157,848 \text{ мОм};$$

$$R_{\kappa 2} = R_{\vartheta 0} + R_{\vartheta 1} + R_{\vartheta 2}, \quad (46)$$

$$R_{\kappa 2} = 8,91 + 24,53 + 26,536 = 59,98 \text{ мОм};$$

$$X_{\kappa 2} = X_{\vartheta 0} + X_{\vartheta 1} + X_{\vartheta 2}, \quad (47)$$

$$X_{\kappa 2} = 126,995 + 27,27 + 2,521 = 156,785 \text{ мОм};$$

$$Z_{\kappa 2} = \sqrt{59,98^2 + 156,785^2} = 167,87 \text{ мОм};$$

$$R_{\kappa 3} = R_{\kappa 2} + R_{\vartheta 3}, \quad (48)$$

$$R_{\kappa 3} = 59,98 + 42,1045 = 102,082 \text{ мОм};$$

$$X_{\kappa 3} = X_{\kappa 2} + X_{\vartheta 3}, \quad (49)$$

$$X_{к3} = 156,785 + 4,15 = 160,935 \text{ мОм};$$

$$Z_{к3} = \sqrt{102,082^2 + 160,935^2} = 190,58 \text{ мОм}.$$

Определяются токи КЗ:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\kappa}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\kappa}}, \quad (50)$$

где U_{κ} – напряжение КЗ, кВ;

Z_{κ} – сопротивление цепи до точки КЗ, мОм.

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (51)$$

где K_y – ударный коэффициент» [12].

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (52)$$

$$I_{\kappa}^{(1)} = 0,55 \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (53)$$

В точке К0, по (50-52):

$$I_{\kappa 0}^{(3)} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 127,307} = 1,81 \text{ кА}.$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 1,81 = 4,62 \text{ кА}.$$

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,81 = 1,57 \text{ кА}.$$

Результаты расчетов – в таблице 6.

Таблица 6 – Токи КЗ, результаты расчетов

Точка КЗ	$I_{к^{(3)}}$, кА	i_y , кА	$I_{к^{(2)}}$, кА	$I_{к^{(1)}}$, кА
К0	1,81	4,62	1,57	-
К1	1,46	2,69	1,27	0,80
К2	1,31	2,40	1,13	0,72
К3	1,15	2,12	1,0	0,63

Далее требуется выбрать аппараты для защиты линий.

2.8 Выбор аппаратов защиты линий, расчет уставок релейной защиты и автоматики

«Автоматические выключатели (АВ) играют ключевую роль в защите электрических сетей и оборудования от перегрузок и коротких замыканий» [18]. Эти устройства широко применяются в различных сферах: от жилых домов до крупных промышленных предприятий. Они обеспечивают безопасность и надежность работы электрических систем, что особенно важно в условиях быстрого роста энергопотребления и необходимости модернизации инфраструктуры. Современные АВ оснащены сложными электронными системами, которые могут мгновенно реагировать на изменения в сети и принимать автоматические решения для предотвращения аварий. Одним из ключевых преимуществ автоматических выключателей является их способность к самовосстановлению. В случае короткого замыкания или перегрузки, АВ автоматически отключает питание, предотвращая возможное повреждение оборудования и возникновение пожара. Это особенно важно на промышленных предприятиях, где риск возникновения крупных аварий может быть значительным. Обеспечение защиты низковольтных сетей с помощью АВ регламентировано ПУЭ [16].

«Выбор автоматических выключателей для защиты КЛ 0,4 кВ производится по условиям:

– по напряжению:

$$U_{ном} > U_c, \quad (54)$$

– по току теплового расцепителя (ТР)» [18]:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot I_p, \quad (55)$$

Пример выбора АВ для защиты КЛ к ЭП №1:

$$I_{т.р.} > 1,1 \cdot 91,3 = 100,4 \text{ А.}$$

Выбирается ВА-51-35/125 А. Выбор АВ сведен в таблице 7.

Таблица 7 – Выбор автоматических выключателей

Участок, № ЭП/РП	$1,1 \cdot I_p, \text{А}$	Выключатель	$I_{ном}, \text{А}$
1	100,4	ВА-51-35	125
2	58,4		63
3	100,4		125
4	100,4		125
5	100,4		125
9	100,4		125
10	100,4		125
11	121,1	ВА-51-39	125
12	100,4	ВА-51-35	125
37	60,0	ВА-51-25	63
38	60,0		63
39	60,0		63
ввод РП-1	1062,1	ВА-52-39	1250
6	121,1		125

Продолжение таблицы 7

Участок, № ЭП/РП	1,1·I _p ,А	Выключатель	I _{ном} , А
7	100,4	ВА-51-35	125
8	100,4		125
13	100,4		125
14	100,4		125
15	100,4		125
16	100,4		125
21	123,0		125
22	123,0		125
34	9,5	ВА-51-25	10
35	26,0		32
ввод РП-2	1005,0	ВА-52-39	1250
17	100,4	ВА-51-35	125
18	100,4		125
19	100,4		125
20	100,4		125
23	91,1		100
24	94,3		100
25	94,3		100
26	94,3		100
27	81,6		100
28	97,7		100
29	97,7	100	
36	76,7	80	
ввод РП-3	1129,3	ВА-52-39	1250
30	83,3	ВА-51-35	100
31	33,9	ВА-51-25	40
32	13,0		13
33	9,5		10
40	625,2	ВА-52-39	630
ввод РП-4	764,8		1000

Микропроцессорная релейная защита (МПРЗ) представляет собой современный и высокотехнологичный метод контроля и управления электрическими сетями, основная цель реализации МПРЗ заключается в обеспечении надежной и точной защиты энергосистемы от различных

аварийных ситуаций, таких как короткое замыкание, перегрузка, грозовые разряды и другие [2]. В отличие от традиционных релейных защит, основанных на механических реле и переключателях, микропроцессорные защиты используют микропроцессоры для анализа и принятия решений в реальном времени. МПРЗ включает в себя несколько ключевых компонентов: микропроцессорные устройства защиты (МУЗ), интеллектуальные реле, а также системы сбора и обработки данных. МУЗ оснащены микропроцессорами, которые обрабатывают сигналы от различных датчиков и устройств, таких как трансформаторы тока и напряжения, линии передачи, а также другие компоненты сети, эти данные затем анализируются с помощью сложных алгоритмов, которые позволяют быстро и точно определить место и характер повреждения.

«Линия 10 кВ и силовые трансформаторы ТП будут защищаться терминалами БМРЗ-101-Д-КЛ-01, внешний вид терминала – на рисунке 4.



Рисунок 4 – Терминал БМРЗ-101

Токовая отсечка (ТО):

$$I_{C3} \geq K_{отс} \cdot I_{НОМ.Т} , \quad (56)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки.

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,0224 = 0,112 \text{ кА}$$

МТЗ:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{C3}}{K_B} \cdot I_{p.макс} , \quad (57)$$

где $I_{p.макс}$ – расчетный ток КЛ, А.

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 44,8 = 1,388 \cdot 44,8 = 62,19 \text{ А}$$

Ток срабатывания реле:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T} , \quad (58)$$

где $k_{cx} = 1$ – коэффициент схемы подключения ТТ;

n_T – коэффициент трансформации ТТ.

$$I_{CP} = 62,19 \cdot \frac{1}{50/5} = 6,22 \text{ А}$$

Чувствительность защиты:

$$k_q = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}} , \quad (59)$$

$$k_q = \frac{1570}{62,19} = 25,2 \geq 1,5$$

Защита от замыканий на землю.

Ток срабатывания:

$$I_{C.з.} \geq k_{отс} \cdot k_B \cdot I_C, \quad (60)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки;

k_B – коэффициент броска ёмкостного тока;

I_C – ёмкостный ток присоединения, А.

$$I_C = I_{CO} \cdot L, \quad (61)$$

где I_{CO} – удельный ёмкостный ток кабеля, А/км;

L – длина линии, км» [11].

$$I_C = 0,55 \cdot 0,8 = 0,44 \text{ А},$$

$$I_{C.з.} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 0,44 = 1,32 \text{ А}.$$

«Автоматический ввод резерва (АВР) 0,4 кВ.

АВР предназначен для автоматического переключения питания ответственных потребителей на резервный источник при пропадании либо несоответствии норме показателей качества питания с основного источника.

Упрощенная схема АВР 0,4 кВ – на рисунке 5.

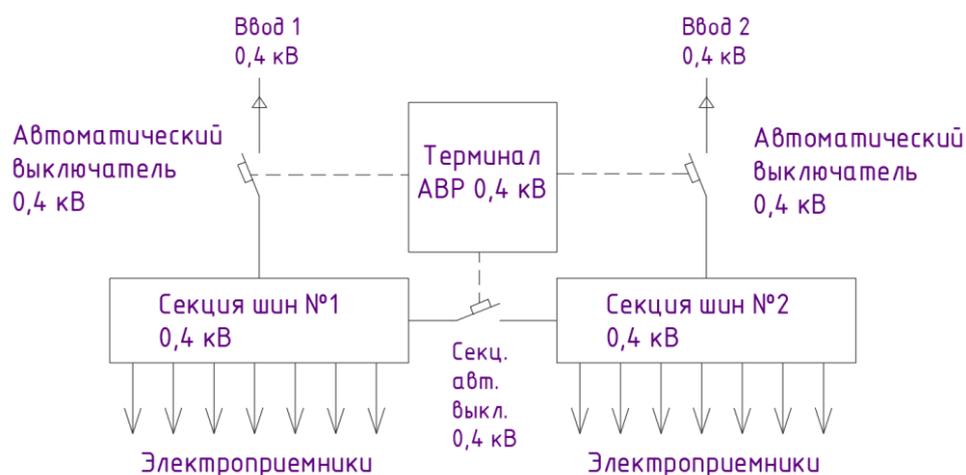


Рисунок 5 – Упрощенная схема АВР 0,4 кВ

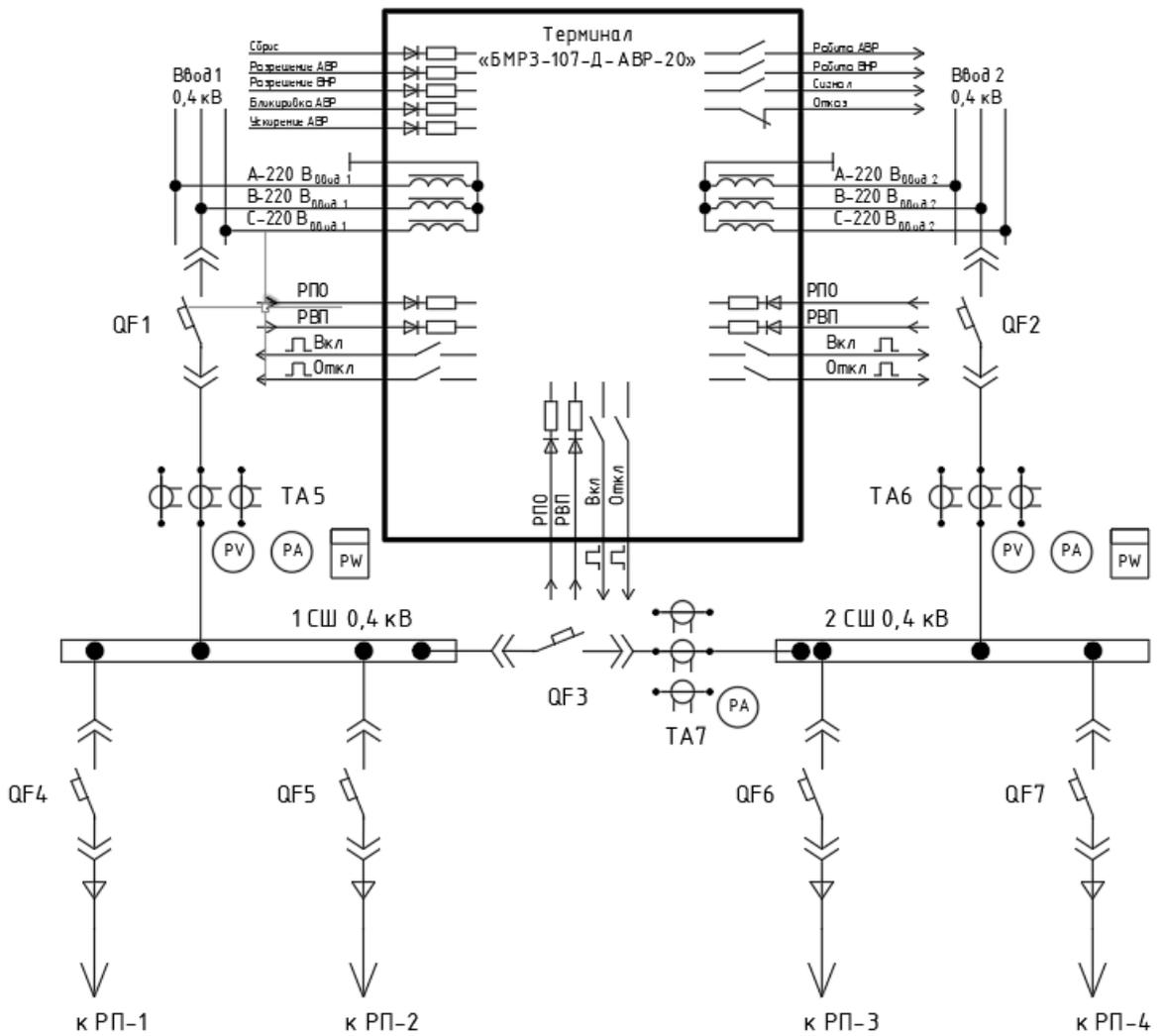
Внешний вид терминала АВР – на рисунке 6.



Рисунок 6 – Терминал BMP3-107-Д-AVR-20

Для обеспечения дистанционного управления и контроля состояния, вводные и секционный автоматические выключатели на вводе 0,4 кВ и секционной перемычке выбираются с электромагнитным приводом. Терминал Сириус-AVR обеспечивает автоматический ввод резервного источника при пропадании напряжения на одном из питающих вводов и автоматическое восстановление схемы нормального режима питания. В нормальном режиме работы питание подается на оба ввода 0,4 кВ, секционный выключатель отключен. При пропадании напряжения на одном из вводов, АВР отключает выключатель этого ввода (QF1 или QF2) и включает секционный выключатель (QF3). После проведения необходимых ремонтно-восстановительных работ и появлении питания на втором вводе 0,4 кВ, терминал АВР автоматически восстанавливает схему нормального режима питания, включая выключатель ввода (QF1 или QF2) и отключая секционный выключатель (QF3)» [7].

Схема АВР 0,4 кВ – на рисунке 7.



Зона	Поз. обозн.	Обозначение	Кол.	Примечание
		Автоматические выключатели		
	QF1..QF3	Электрон 325	3	
	QF4..QF6	ВА-52-39/1250	3	
	QF7	ВА-52-39/1000	1	
		Трансформаторы тока		
	TA5..TA7	ТШЛ-0,66-У3	9	

Рисунок 7 – Схема АВР 0,4 кВ

«Уставка пускового органа минимального напряжения:

$$U_{C.P} = 0,7 \cdot U_{НОМ}, \quad (62)$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение сети, В.

$$U_{C.P0,4} = 0,7 \cdot 380 = 266 \text{ В.}$$

Уставка реле напряжения, контролирующего наличие напряжения на другой секции:

$$U_{C.P} = (0,6 \div 0,65) \cdot U_{НОМ}, \quad (63)$$
$$U_{C.P0,4} = (0,6 \div 0,65) \cdot 380 = 228 \div 247 \text{ В.}$$

Уставка срабатывания реле времени:

$$t_{C.P.ABP} = t_1 + \Delta t, \quad (64)$$

где t_1 – время срабатывания автоматических выключателей, с;

Δt – ступень селективности, с» [7].

$$t_{C.P.ABP} = 0,05 + 0,5 = 0,55 \text{ с.}$$

Одним из ключевых преимуществ МПРЗ является высокая степень автоматизации и интеграции с другими системами управления сетью. Например, МУЗ могут взаимодействовать с системами управления распределением электроэнергии, что позволяет оперативно перенаправлять потоки энергии и минимизировать время отключения потребителей. Кроме того, МПРЗ обладают возможностью самодиагностики и самовосстановления, что значительно снижает риск возникновения неисправностей и повышает надежность сети.

2.9 Расчет заземляющего устройства и молниезащиты

Действующие заземляющее устройство и система молниезащиты критично повреждены коррозией, что ухудшает их эксплуатационные характеристики и создает профессиональные риски для персонала и угрозы

аварийных ситуаций. Поэтому будут смонтированы новые заземляющее устройство и система молниезащиты.

«Расчет заземляющего устройства (ЗУ).

Удельное сопротивление грунта для электродов:

$$\rho_p = \rho \cdot K_c, \quad (65)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом · м;

K_c – коэффициент сезонности.

$$\rho_{pe} = 2000 \cdot 1,1 = 2200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\rho_{pe} = 2000 \cdot 1,4 = 2800 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Для вертикальных электродов (ВЭ) используется угловая сталь 50×50 мм, для горизонтального электрода (ГЭ) используется полосовая сталь 50×5 мм.

Сопротивление растеканию для одного ВЭ:

$$R_{овэ} = \frac{\rho_{pe}}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) \right] \quad (66)$$

где l – длина ВЭ, м;

d – приведенный диаметр ВЭ, м;

t – расстояние от поверхности до центра ВЭ, м.

$$d = 0,95 \cdot b, \quad (67)$$

где b – ширина уголка, м» [15].

$$d = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475 \text{ м}$$

$$t = 3 / 2 + 0,8 = 2,3 \text{ м}$$

$$R_{\text{овэ}} = \frac{2200}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0475} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,3 + 3}{4 \cdot 2,3 - 3} \right) \right] = 60,962 \text{ Ом}$$

«Расчетное число ВЭ:

$$n' = R_{\text{овэ}} / R_n \quad (68)$$

где R_n – максимально допустимое сопротивление ЗУ, Ом.

$$n' = 60,962 / 4 = 15,2 \approx 16 \text{ шт}$$

Длина ГЭ:

$$l_2 = 1,05 \cdot a \cdot n' \quad (69)$$

где a – расстояние между ВЭ, м.

$$a = l_{\text{пер}} / n' \quad (70)$$

где $l_{\text{пер}}$ – периметр здания, м» [15].

$$l_{\text{пер}} = 2 \cdot (144 + 66) = 420 \text{ м}$$

$$a = 420 / 16 = 26,25 \text{ м}$$

$$l_2 = 1,05 \cdot 26,25 \cdot 16 = 441 \text{ м}$$

«Сопротивление растеканию ГЭ:

$$R_{23} = \frac{\rho_{\text{pz}}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{l^2}{d \cdot t} \right) \quad (71)$$

где l – длина ГЭ, м;

d – расчетный диаметр ГЭ, м;

t – расстояние от поверхности до центра ГЭ, м.

$$d = 0,5 \cdot b, \quad (72)$$

где b – ширина полосы, м.

$$d = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ м}$$

$$t = 0,05 / 2 + 0,8 = 0,825 \text{ м}$$

$$R_{23} = \frac{2800}{2 \cdot 3,14 \cdot 441} \cdot \ln \left(\frac{441^2}{0,025 \cdot 0,825} \right) = 2,757 \text{ Ом}$$

Сопротивление ЗУ:

$$R_{zp} = \frac{R_{063} \cdot R_{23}}{R_{063} \cdot \eta_6 \cdot n + R_{23} \cdot \eta_2} \quad (73)$$

где η_6 – коэффициент использования ВЭ;

η_2 – коэффициент использования ГЭ» [15].

$$R_{zp} = \frac{60,962 \cdot 2,757}{60,962 \cdot 0,51 \cdot 16 + 2,757 \cdot 0,3} = 3,792 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

«Расчет молниезащиты.

Исходя из большой относительной длины здания, принимаем тип молниезащиты: двойной тросовой молниеотвод (МО) на крыше. Разделив площадь защиты на 4 части по ширине и на 8 частей по длине, принимаем к установке 14 стержневых МО.

Так как стержневые МО будут установлены на крыше здания, то в данном случае достаточно рассчитать зону защиты на уровне крыши. Рассчитаем защитную зону на крыше, высота несущих опор $h=16,5$ м при

расстоянии между опорами $a=18$ м (по длине здания), $b=16,5$ м (по ширине здания). Радиус конуса защиты для одного МО:

$$r_0 = 1,5 \cdot h \quad (74)$$

где h – высота стержневого МО, м.

Высоту стержневого МО подбираем эмпирически, так, чтобы обеспечивалась защищенность объекта:

$$\sqrt{(A/4)^2 + (B/8)^2} < r_0 \quad (75)$$

где A, B – длина и ширина здания, м.

Радиус конуса защиты для одного МО, по (74):

$$\begin{aligned} r_0 &= 1,5 \cdot 16,5 = 24,75 \text{ м} \\ \sqrt{(144/8)^2 + (66/4)^2} &< 24,75 \\ \sqrt{(18)^2 + (16,5)^2} &< 24,75 \\ 24,42 \text{ м} &< 24,75 \text{ м} \end{aligned}$$

Покрытие защитной зоны выполняется, защита обеспечивается» [15].

План заземляющего устройства и молниезащиты после реконструкции показан на листе 6 графической части.

Выводы по разделу 2.

Проведена разработка мероприятий по реконструкции системы электроснабжения производственного корпуса. Рассчитаны рабочие и аварийные режимы СЭС, выбрано и проверено современное электрооборудование отечественного производства. Проведен расчет нового заземляющего устройства и системы молниезащиты.

Заключение

В настоящее время производственный корпус обеспечивается питанием электроэнергией от СЭС с устаревшим и изношенным оборудованием. Регулярные выходы из строя и неправильная работа отдельных единиц оборудования приводят к нарушениям питания отдельных единиц производственного оборудования и технологических линий, сбоям в общем технологическом процессе, массовому браку продукции, а также другим материальным и репутационным издержкам. Также, согласно техническим характеристикам действующего электрооборудования, невозможно подключение дополнительного энергоемкого производственного оборудования, которое планируется постепенно устанавливать для увеличения объемов выпускаемой продукции. Отмечается нарастание случаев электротравматизма среди работников, что вызвано недопустимым снижением сопротивления изоляции кабелей и элементов оборудования. Реконструкция системы электроснабжения производственного корпуса позволит устранить указанные недостатки и проблемы, расширить производство и снизить экономические и трудовые издержки и себестоимость продукции. Уменьшатся организационные, трудовые и материальные затраты на поддержание работоспособности оборудования.

Приведена краткая характеристика предприятия, выполнен анализ действующей СЭС производственного корпуса, обосновано проведение реконструкции. Систематизированы необходимые для разработки мероприятий по реконструкции исходные данные. Проведена разработка мероприятий по реконструкции СЭС. В системе освещения принимаются к установке энергоэффективные светодиодные светильники NT-PROM 100Л. КРМ на шинах 0,4 кВ ТП будет производиться двумя установками АУКРМ-0,4-125. Для ТП выбраны энергоэффективные силовые трансформаторы ТМГ12-630, выбрана комплектная ТП марки 2КТПН-630/10/0,4. Рассчитаны рабочие и аварийные режимы СЭС, выбрано и

проверено современное электрооборудование отечественного производства. Действующая распределительная сеть по своей структуре (радиальная, с индивидуальным питанием ЭП и РП) отвечает всем технико-эксплуатационным потребностям, обеспечивая надежность питания и возможность индивидуального отключения всех ЭП и РП. Таким образом, структура распределительной сети не будет меняться, что также упростит проведение реконструкции. Новые современные кабели марок АВВГнг-LS, ВВГнг-LS и КГ, с соответствующими актуальным нагрузкам сечениям жил, будут проложены по существующим трассам вместо устаревших и изношенных действующих кабелей.

Выбраны современные терминалы микропроцессорной релейной защиты серии БМРЗ. Одним из ключевых преимуществ МПРЗ является высокая степень автоматизации и интеграции с другими системами управления сетью. Например, терминалы РЗА будут взаимодействовать с системами управления распределением электроэнергии, что позволит оперативно перенаправлять потоки энергии и минимизировать время отключения потребителей. Кроме того, терминалы РЗА обладают возможностью самодиагностики и самовосстановления, что значительно снижает риск возникновения неисправностей и повышает надежность сети.

Проведен расчет нового заземляющего устройства и системы молниезащиты. Действующее заземляющее устройство и система молниезащиты критично повреждены коррозией, что ухудшает их эксплуатационные характеристики и создает профессиональные риски для персонала и угрозы аварийных ситуаций. Поэтому будут смонтированы новые заземляющее устройство и система молниезащиты.

Реализация предлагаемых мероприятий по реконструкции обеспечит эффективную и безопасную работу системы электроснабжения и производственного корпуса в целом.

Список используемых источников

1. Анчарова Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. 415 с.
2. Бирюлин В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
3. Бирюлин В.И. Электроснабжение промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 204 с.
4. Галишников Ю. П. Трансформаторы и электрические машины : курс лекций. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 216 с.
5. Голов Р. С. Управление энергосбережением на промышленном предприятии : монография. М. : Дашков и К, 2023. 458 с.
6. Головатый С. Е. Охрана окружающей среды и энергосбережение : учебное пособие. Минск : РИПО, 2021. 304 с.
7. Горемыкин С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 191 с.
8. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 271 с.
9. Дубинский Г.Н. Наладка устройств электроснабжения напряжением выше 1000 В : учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. М. : СОЛОН-Пресс, 2020. 538 с.
10. Иванов С.Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2022. 164 с.
11. Куксин А. В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
12. Куксин А.В. Электроснабжение промышленных предприятий : учебное пособие. М. : Инфра-Инженерия, 2021. 156 с.

13. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебное пособие. М. : Форум, 2022. 416 с.
14. Петухов Р.А. Электроснабжение : учебное пособие. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. 328 с.
15. Полуянович Н.К. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт систем электроснабжения промышленных предприятий. СПб. : Лань, 2023. 396 с.
16. Правила устройства электроустановок: действующие разделы 6-го и 7-го изданий. М. : ИНФРА-М, 2023. 832 с.
17. Сибикин М. Ю. Справочник электрика по ремонту электрооборудования промышленных предприятий. – 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 262 с.
18. 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.
19. Шеховцов В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов : учебное пособие. М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. 158 с.
20. Шеховцов В. П. Справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению : учебное пособие. – 3-е изд. М. : ИНФРА-М, 2023. 136 с.