

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

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

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

Электроснабжение
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Модернизация системы электроснабжения испытательного полигона
АО «АВТОВАЗ»

Студент

Ш.Р. Гумяров
(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., В.С. Романов

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

Консультант

к.п.н., доцент, А.В. Кириллова

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

Аннотация

Бакалаврская работа выполнена на тему: «Модернизация системы электроснабжения испытательного полигона АО «АВТОВАЗ»».

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы произведены расчеты для определения электрических нагрузок испытательного полигона по методу расчетного коэффициента (коэффициента максимума). Для выбора типов и мощностей трансформаторов, планируемых к установке на предприятии для питания электроприемников, произведен ряд расчетов, опираясь на которые выбраны силовые трансформаторы и установки для компенсации реактивной мощности. Рассчитаны токи короткого замыкания (КЗ), в нескольких точках сети электроснабжения полигона, на сторонах 10 и 0,4 кВ. Опираясь на расчетные значения, выбрано электрооборудование системы электроснабжения предприятия. Выбор производился с учетом термической, электродинамической стойкости.

Выпускная квалификационная работа выполнена объемом 59 страниц, содержит 9 таблиц и 3 рисунка. В качестве дополнения к пояснительной записке, выполнена графическая часть, которая содержит шесть чертежей, выполненных на листах формата А1.

Abstract

The title of the graduation work is Modernization of the power supply system at the test site of Stock Company "AVTOVAZ".

The senior paper consists of an introduction, seven parts, a conclusion, tables, list of references including foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The key issue of the thesis is the modernization of the power supply system at the test site in Sosnovka, Stavropol district, Samara region. We touch upon the problem of improving the quality of power supply at the industrial enterprise.

The aim of the work is to give some information about the development of design and survey works to provide high-quality and uninterrupted electrical supply of the test site for testing cars.

The thesis may be divided into the following logically interrelated parts: analysis of the existing power supply system; justification of the need to modernize the facility; calculation of loads; selection of equipment and electrical equipment.

In conclusion we'd like to stress this work is relevant in solving the problem of modernization of the landfill power supply system. Besides similar technological and constructive solutions can be used for reconstruction of other enterprises throughout the Russian Federation.

Содержание

Введение.....	5
1 Описание проектируемого объекта	7
2 Расчет электрических нагрузок	13
3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций. Выбор компенсирующих установок	19
4 Расчет и выбор кабельных линий 0,4 кВ	33
5 Расчет токов КЗ	38
6 Выбор и проверка электрооборудования системы электроснабжения полигона	43
6.1 Выбор высоковольтного выключателя	43
6.2 Выбор трансформатора напряжения	46
6.3 Выбор трансформатора тока	47
6.4 Выбор автоматических выключателей 0,4 кВ на комплектно трансформаторной подстанции	48
7 Проверка кабелей на термическую стойкость и на невозгорание	51
8 Расчет контура заземления для комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ	53
Заключение.....	56
Список используемых источников.....	57

Введение

Волжский автомобильный завод является одним из крупнейших заводов легкового автомобилестроения в России, который базируется в городе Тольятти. На заводе осуществлен полный цикл производства - от металлургической промышленности, до конечной сборки и отправки готового автомобиля. По последним подсчетам территория АО «АВТОВАЗ» составляет около 610 гектаров. В 2016 году автозавод стал совместным производством с альянсом зарубежной компании RENAULTNISSAN Group.

Для сохранения и увеличения качества выпускаемой продукции, а также для сохранения лидирующих позиций по продаже автомобилей на российском и мировом рынках, автозавод усовершенствует, существующие автомобили и разрабатывает новый модельный ряд. Для разработанных моделей используется модернизированное оборудование и комплектующие, которые соответствуют общепринятым мировым нормам качества в автомобилестроении. Именно поэтому АО «АВТОВАЗ» занимает лидирующие позиции по объему реализации автомобилей не только в России, но также за рубежом.

Безусловно, современные технологии при производстве новых автомобилей требуют использования более сложного оборудования, которое позволяет добиться повышения качества готовых изделий и оптимизации производственного процесса в целом.

Важнейшим этапом контроля качества автомобиля является его испытание на полигонах для выявления возможных дефектов, допущенных при производстве, а также проверки технического состояния под воздействием различных внешних механических и климатических факторов. Для реализации описанных задач на полигоне АО «АВТОВАЗ» установлено высокотехнологичное оборудование, которое в свою очередь требует применения современного, энергоэффективного электрооборудования для качественного и надежного электроснабжения всех объектов предприятия.

Целью ВКР является – модернизация системы электроснабжения полигона для испытания автомобилей АО «АВТОВАЗ».

Для реализации поставленной цели предусмотрено решение следующих задач:

- произвести анализ текущего состояния системы электроснабжения испытательного полигона;
- выполнить расчеты и произвести выбор силовых трансформаторов и сопутствующего электрооборудования питающего нагрузку 0,4 кВ;
- рассчитать контур заземления комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ.

При выполнении выпускной квалификационной работы необходимо использовать современные методики проектирования, принимать к установке только современные виды оборудования. При выборе оборудования основываться на нормативные документы ПАО «Россети». Учитывать климатическое исполнение оборудования и вопросы перспективного развития питаемого объекта. Так же принимать во внимание категории надежности электроснабжения отдельных потребителей.

1 Описание производственного объекта

Испытательный автополигон завода АО «АВТОВАЗ» является одним из востребованных и значимых объектов. Испытательный комплекс располагается в Ставропольском районе вблизи села Сосновка. На данном объекте практически круглосуточно испытываются автомобили не только марки LADA, но так же Datsun, Renault, Nissan. В 2020 году суммарный пробег по автодорогам испытательного комплекса был равен 600 000 километров.

В данный момент автополигон продолжает свое развитие и модернизацию. На сегодняшний день функционируют: кольцевая дорога, трасса для спортивного синхронного вождения, трасса для испытания колес и шин, подвески, трасса для испытания автомобилей по бездорожью, ряд служебных дорог, столовая, производственная база, здание дорожно-ремонтного пункта (ДРП) и другие. Примерная суммарная площадь волжского автополигона составляет 400 гектаров, при этом общая длина дорожного покрытия равна 45 километров.

В настоящее время планируется установка современного оборудования для испытания автомобилей на устойчивость к коррозии, к внешним водным факторам, к низкой и высокой температуре, к воздействию химических реагентов.

Кратко рассмотрим оборудование, которое планируется устанавливать на испытательный полигон.

- климатические камеры для испытания автомобилей на долговечность в определенных условиях (Климатическая камера 1). Камера климатическая предназначена для проведения форсированных ресурсных испытаний автомобиля и обеспечивает климатическое воздействие на автомобиль для ускорения процесса коррозии и выявления долговечности при различных условиях окружающей среды;

- климатическая камера для испытания автомобиля в условиях высоких и низких температур (Климатическая камера 2). Камера климатическая предназначена для проведения форсированных ресурсных испытаний автомобиля и обеспечивает температурное воздействие на автомобиль, а так же иные условия эксплуатации для ускорения процесса коррозии;
- климатическая камера для испытания автомобиля в условиях дождя. Камера дождевая предназначена для испытаний собранного и готового к продаже транспортного средства на устойчивость к протеканию уплотнительных элементов автомобиля, в условиях дождя;
- камера для испытания автомобиля с применением солей (химических реагентов). Солевая камера предназначена для испытания транспортного средства в условиях воздействия на него химических реагентов для ускорения процесса коррозии, а также для проверки долговечности кузова автомобиля при заданных условиях;
- технический комплекс для выявления и ремонта неисправностей шасси;
- так же планируется к установке различная вспомогательная аппаратура, предназначенная для нормального функционирования всех вышеперечисленных объектов.

В таблице 1 представлены основные параметры оборудования, планируемого для установки на испытательном полигоне вблизи села Сосновка.

Таблица 1 – Технические характеристики оборудования, планируемого к установке

№	Наименование объекта	ΣP_n , кВт	$n_{\text{Э}}$, шт.	f , Гц	U_n , кВ
1	Климатическая камера 1	650	85	50	0,4
2	Климатическая камера 2	740	102	50	0,4
3	Дождевальная камера	100	24	50	0,4
4	Солевая камера	135	35	50	0,4
5	Комплекс ремонта шасси	537	78	50	0,4

Основными требованиями, предъявляемыми к системе электроснабжения предприятия, являются: обеспечение необходимого уровня аппаратной и схемной надежности, бесперебойность электроснабжения, а также соблюдение всех показателей качества электрической энергии, определенных нормативно-технической документацией и государственными стандартами.

Испытательный комплекс АО «АВТОВАЗ» является потребителем 3 категории надежности, это означает что, перерыв в электроснабжении данного объекта не может привести к гибели людей, значительному недоотпуску производимых услуг и продукции, угрозе безопасности Российской Федерации, а также не нанесет значительного материального ущерба.

На испытательном полигоне применена схема электрического снабжения, которая построена по принципу одиночной магистрали с двухсторонним питанием (рисунок 1).

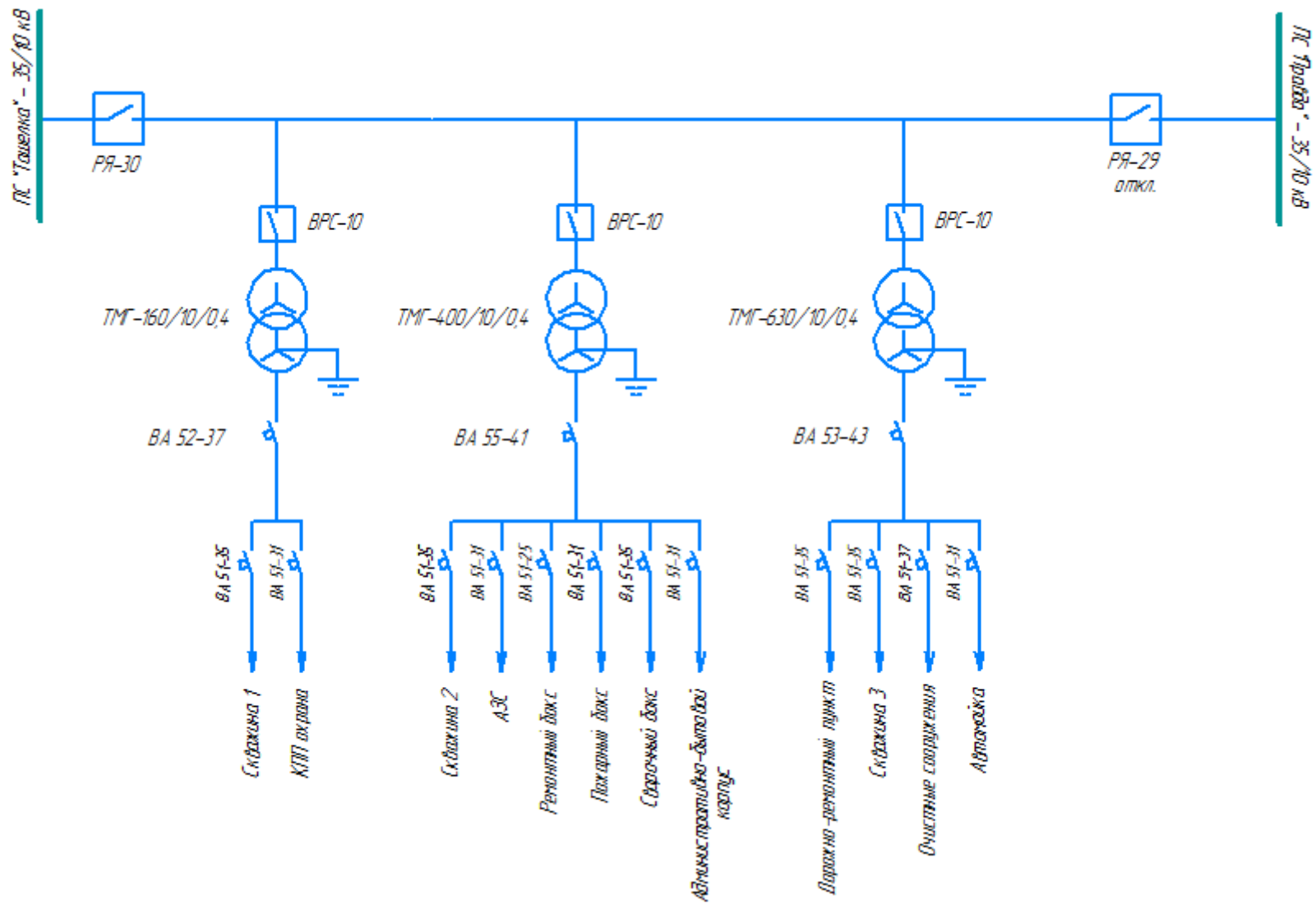


Рисунок 1 – Схема электроснабжения испытательного полигона

Все объекты автополигона, получают питание от собственных комплектных трансформаторных подстанций (КТП), которые в свою очередь, подключены к главным понизительным подстанциям (ГПП) полигона. ГПП полигона являются подстанция «Правда» 35/10 кВ и подстанция «Ташелка» 35/10 кВ. На полигоне ведется круглосуточная работа, то есть, установлен 3-х сменный рабочий график.

Так как автополигон является потребителем 3 категории надежности, все цеха имеют КТП с одним трансформатором.

ГПП, питающие полигон, соединены с КТП при помощи воздушных линий 10 кВ (ВЛ 10 кВ).

На испытательном полигоне в Сосновке установлены три комплектно-трансформаторных подстанции. Внутри КТП установлены масляные трансформаторы ТМГ 10/0,4 мощностью 160, 400 и 630 кВА соответственно. На стороне высокого напряжения обмотки трансформаторов соединены в звезду, обмотки низкого напряжения соединены в звезду с заземленной нейтралью. Так же на стороне 0,4 кВ установлены автоматические выключатели, для коммутации цепи и ее отключении в случаях перегрузки или короткого замыкания (КЗ).

Так как оборудование, установленное на полигоне, является потребителем 3 категории надежности, коэффициент загрузки цеховых трансформаторных подстанций, существующей энергосистемы автополигона, равен 0,8. По данным производственной службы АО «АВТОВАЗ» подключение нового оборудования приведет к увеличению коэффициента загрузки до значения, близкого к 1. Это означает что действующая, в настоящий момент, система электроснабжения автополигона не способна обеспечить потребляемую мощность оборудования. Следовательно, для обеспечения надежности системы электроснабжения рассматриваемого объекта необходимо произвести замену существующего трансформатора на более мощный. Для этого требуется произвести ряд расчетов.

Поэтому в проекте модернизации испытательного полигона необходимо рассмотреть возможность замены силовых трансформаторов, которая повлечет за собой замену коммутационной аппаратуры, измерительных трансформаторов и т.д.

Выводы по первому разделу.

В данном разделе произведен анализ системы электроснабжения автополигона. Рассмотрена схема электроснабжения полигона, трансформаторы, питающие промышленные объекты, коммутационная аппаратура и технические характеристики оборудования, планируемого к установке.

При анализе системы электроснабжения выявлено, что подключение нового оборудования приведет к увеличению коэффициента загрузки до значения, близкого к 1. Следовательно, для обеспечения надежности системы электроснабжения рассматриваемого объекта необходимо произвести замену существующего трансформатора на более мощный.

2 Расчет электрических нагрузок

Правильный и точный расчет нагрузок электрических потребителей является важнейшим этапом при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия.

В первую очередь, определяются среднесменные расчетные нагрузки электроприемников, установленных на промышленных объектах по их суммарной мощности и расчетному коэффициенту (коэффициенту максимума). Данный метод является достаточно точным, его применяют для определения расчетной нагрузки на различных уровнях системы электрического снабжения отдельных цехов и всего промышленного предприятия в целом.

В первую очередь, рассчитываются нагрузки электрических приемников, получающих питание от сети 0,4 кВ.

По предполагаемому к установке электрическому оборудованию цехов промышленного предприятия по данным из справочной литературы определяются коэффициенты мощности и использования, для групп электрических приемников цеха промышленного предприятия [1]. Если в справочной литературе нет достоверной информации по искомому производственному цеху промышленного предприятия, то принимаются данные по схожему цеху. Если схожего цехового производства найти не удастся, то данные коэффициенты принимаются из диапазонов 1 и 2 исходя из предполагаемого к установке электрического оборудования, а так же режима его работы:

$$K_{\text{и}} = 0,2 \dots 0,9, \quad (1)$$

$$\cos \varphi = 0,5 \dots 0,9. \quad (2)$$

Для всех цехов промышленного объекта или предприятия рассчитываются активные и реактивные электронагрузки за смену, которая имеет наибольшую загрузку по формулам 3 и 4:

$$P_C = K_{И} \cdot P_{Н}, \quad (3)$$

$$Q_C = K_{И} \cdot P_{Н} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

«Далее из справочной литературы находится расчетный коэффициент [2]. Для его определения следует знать количество эффективных электрических приемников и коэффициент использования (формула 5)» [2]:

$$K_P = f(K_{И}; n_{Э}). \quad (5)$$

«По количеству эффективных электрических приемников и коэффициенту использования определяем расчетные активные и реактивные мощности по формулам 6,7 и 8» [1]:

$$P_P = K_P \cdot P_C, \quad (6)$$

$$Q_P = 1,1 \cdot Q_C \text{ при } n_{Э} \leq 10, \quad (7)$$

$$Q_P = Q_C \text{ при } n_{Э} > 10. \quad (8)$$

«По формуле 9 найдем полную расчетную мощность» [3]:

$$S_P = \sqrt{P_P^2 + Q_P^2}. \quad (9)$$

Затем рассчитываются итоговые нагрузки 0,4 кВ. Определяется сумма электрических приемников, установленных на промышленном предприятии, их номинальные активные мощности, средние и расчетные реактивные и активные мощности.

«По суммарному значению определяются $\text{tg } \varphi$ и коэффициент использования для всей нагрузки 0,4 кВ по формулам 10 и 11» [5]:

$$K_{\text{И}} = \frac{\sum P_{\text{С}}}{\sum P_{\text{Н}}}, \quad (10)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sum Q_{\text{С}}}{\sum P_{\text{С}}}. \quad (11)$$

«По формуле 12 рассчитывается суммарная полная мощность» [1]:

$$\sum S_{\text{P}} = \sqrt{\sum P_{\text{P}}^2 + \sum Q_{\text{P}}^2}. \quad (12)$$

Результаты расчетов сводятся в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета электрических нагрузок по промышленному предприятию

№	Название цеха	ΣP_H , кВт	K_H	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_C , кВт	Q_C , кВАр	K_P / K_O	P_P , кВт	Q_P , кВАр	S_P , кВА
Нагрузка 0,4 кВ											
1	Климатическая камера 1	650	0,7	0,8	0,75	455	341,25	0,8	364	341,25	498,95
2	Климатическая камера 2	740	0,7	0,8	0,75	518	388,50	0,8	414,4	388,5	568,03
3	Дождевальная камера	100	0,6	0,7	1,02	60	61,2	0,85	51	61,2	79,66
4	Солевая камера	135	0,6	0,8	0,75	81	60,75	0,85	68,85	60,75	91,82
5	Комплекс ремонта шасси	537	0,7	0,85	0,62	375,9	233,06	0,8	300,72	233,06	380,46
6	АЗС	50	0,4	0,65	1,17	20	23,4	0,75	15	23,4	27,79
7	Ремонтный бокс	150	0,06	0,65	1,17	9	10,53	0,85	7,65	10,53	13,02
8	Сварочный бокс	150	0,25	0,35	2,67	37,5	100,13	0,75	28,125	100,13	104
9	Скважина 1	150	0,65	0,8	0,75	97,5	73,13	0,85	82,88	73,13	110,52
10	Скважина 2	160	0,65	0,8	0,75	104	78	0,85	88,4	78	117,89
11	Скважина 3	140	0,65	0,8	0,75	91	68,25	0,85	77,35	68,25	103,16
12	Пожарный бокс	60	0,65	0,8	0,75	39	29,25	0,85	33,15	29,25	44,21
13	Административно-бытовой корпус	70	0,65	0,7	1,02	45,5	46,41	0,8	36,4	46,41	58,98
14	Очистные сооружения	180	0,75	0,8	0,75	135	101,25	0,85	114,75	101,25	153,03
15	Дорожно-ремонтный пункт	170	0,5	0,7	1,02	85	86,7	0,75	63,75	86,7	107,61

Продолжение таблицы 2

№	Название цеха	$\sum P_H$, кВт	K_H	$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	P_C , кВт	Q_C , кВАр	K_P / K_O	P_P , кВт	Q_P , кВАр	S_P , кВА
16	КПП охрана	60	0,5	0,6	1,33	30	39,9	0,85	25,5	39,9	47,35
17	Автомойка	100	0,7	0,7	1,02	70	71,4	0,9	63	71,4	95,22
ИТОГО		3602	0,63	-	0,80	2253,4	1813,1	-	1834,92	1813,1	2579,58

Выводы по второму разделу.

В данном разделе произведен расчет электрических нагрузок испытательного автополигона по суммарной мощности и расчетному коэффициенту. Данный метод является достаточно точным, его применяют для определения расчетной нагрузки на различных уровнях системы электрического снабжения отдельных цехов и всего промышленного предприятия в целом.

По данным из справочной литературы определены коэффициенты мощности и использования, для групп электроприемников цеха промышленного предприятия. Определены среднесменные активные и реактивные нагрузки, расчетные активные, реактивные и полные мощности каждого промышленного объекта.

Суммарные расчетные активная, реактивная и полная мощности для всего полигона в целом составили $P_p = 1834,92$ кВт, $Q_p = 1813,1$ кВАр, $S_p = 2579,58$ кВА.

3 Выбор типа, числа и мощности трансформаторов цеховых подстанций. Выбор компенсирующих установок

«Количество трансформаторов и линий, питающих электроприемники, принимаются в зависимости от категории надежности электроснабжения потребителей. Для потребителей II и III категории надежности при существующем запасе трансформаторов на складах следует устанавливать подстанции с одним трансформатором» [4].

«Два трансформатора устанавливается на подстанции при преобладании потребителей I и II категории.

При расчете номинальной мощности трансформаторов учитываются следующие факторы:

- расчетная нагрузка;
- число часов использования максимума нагрузки;
- перспективы развития предприятия» [9].

Прежде чем начинать расчет для определения мощности силовых трансформаторов, следует произвести расчеты для установок компенсации реактивной мощности.

В первую очередь, следует проанализировать план рассматриваемого объекта или предприятия. Объекты или цеха с малой нагрузкой кооперируются для питания от единой трансформаторной подстанции.

Проанализируем объекты автополигона и сформируем группы для питания от одной комплектной трансформаторной подстанции:

- скважина 1 и КПП охраны являются потребителями 3 категории надежности. Данные объекты находятся неподалеку друг от друга и имеют небольшую мощность, поэтому их следует подключить к одной трансформаторной подстанции;
- климатические камеры 1 и 2, дождевальная и солевая камеры, комплекс ремонта шасси являются потребителями 2 категории надежности и находятся неподалеку друг от друга, из этого следует,

что данные объекты следует подключить к одной трансформаторной подстанции. Так же неподалеку находятся еще несколько объектов такие как: автозаправочная станция, ремонтный, пожарный и сварочный боксы, скважина 2, административно-бытовой комплекс. Данные объекты имеют небольшую мощность, поэтому они будут питаться от одной КТП;

– скважина 3, очистные сооружения, дорожно-ремонтный пункт и автомойка находятся недалеко друг от друга и имеют не большую нагрузку. Данные потребители являются потребителями 3 категории надежности, следовательно, эти объекты выгодно подключить от одной трансформаторной подстанции;

Теперь перейдем к расчетам.

В первую очередь определяется мощность компенсирующих устройств по формуле 15:

$$Q_{к.р} = \alpha \cdot P_p \cdot (tg \varphi - tg \varphi_{к.р}), \quad (15)$$

где $Q_{к.р}$ - мощность компенсирующих устройств, определяющихся при расчете, кВАр;

α - коэффициент, который учитывает возрастание $\cos\varphi$, данный коэффициент обычно принимается $\alpha = 0,9$;

P_p - активная мощность цеха, определенная расчетным способом, кВт;

$tg\varphi$, $tg\varphi_{к.р}$ - коэффициенты реактивной мощности до и после компенсации.

На практике компенсацию производят до значения коэффициента реактивной мощности равной $tg \varphi_k = 0,34 \dots 0,47$.

Далее производится пересчет полной расчетной мощности S_p с учетом компенсации по формуле 16:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{к.р})^2}. \quad (16)$$

После определяется мощность трансформаторов планируемых к установке на цеховых ПС по формуле 17:

$$S_T \geq \frac{S_p}{K_3 \cdot N_T}, \quad (17)$$

«где S_T – полная мощность одного трансформатора, кВА;

S_p – полная мощность, определенная расчетным способом, по цеху или цехам с учетом компенсации реактивной мощности, кВА;

K_3 – коэффициент загрузки трансформатора;

N_T – количество трансформаторов в цеховой ПС».

«Из методического пособия [1] определяется коэффициент загрузки и число трансформаторов. Эти величины выбираются исходя из категории надежности энергоснабжения электрических приемников» [6].

Расчетная мощность трансформатора округляется до ближайшей стандартной мощности по шкале: ГОСТ 11920 – 85, ГОСТ 12965 – 85.

Производится расчет для первой группы промышленных объектов. Это скважина 1 и КПП охраны. Данные промышленные объекты являются потребителями 3 категории надежности электроснабжения.

«Поскольку производится расчет нескольких промышленных объектов, то определяется суммарная расчетная активная и реактивная мощности (формулы 18-19)» [1]:

$$\sum P_p = P_{p9} + P_{p16}, \quad (18)$$

$$\sum P_p = 82,88 + 25,5 = 108,38 \text{ кВт.}$$

$$\sum Q_P = Q_{P9} + Q_{P16}, \quad (19)$$

$$\sum Q_P = 73,13 + 39,9 = 113,03 \text{ кВАр.}$$

Далее рассчитывается суммарный $\text{tg } \varphi$ для всех промышленных объектов входящих в данную группу. Для этого используются мощности, которые рассчитаны для наиболее загруженной смены. Расчеты производятся по формуле 20:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sum Q_C}{\sum P_C}, \quad (20)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{113,03}{127,5} = 0,89.$$

По формуле 15 определяется мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 108,38 \cdot (0,89 - 0,4) = 47,45 \text{ кВАр}$$

$Q_{к.р}$ округляется до ближайшего номинального значения мощности компенсирующего устройства [7]. Поскольку промышленные объекты, входящие в данную группу, являются потребителями 3-й категории надежности, то следует установить один трансформатор и одно устройство компенсации. То есть выбираем одно устройство компенсации: АУКРМ-45-0,4.

Пересчет полной мощности группы промышленного объекта, определяемой расчетным способом, с учетом компенсации реактивной мощности производится по формуле 16:

$$S_P = \sqrt{89,25^2 + (113,03 - 45)^2} = 127,96 \text{ кВА}$$

Затем рассчитывается мощность трансформаторов, которые будут установлены на КТП по формуле 17:

$$S_T \geq \frac{127,96}{0,9} = 142,17 \text{ кВА}$$

«Произведем выбор числа и мощности цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности» [22].

Вариант № 1

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 160-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{xx} = 0,41 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 2,9 \text{ кВт}; S_H = 160 \text{ кВА}; K_3 = 0,9.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 160-10/0,4 по формулам 21-25:

$$\alpha = 36 \frac{\text{руб}}{\text{кВт}}; \beta = 0,9 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}; T_M = 4758 \text{ ч}; T_p = 8760 \text{ ч}; E = 0,223.$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right)^2 \cdot T_p, \quad (21)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4758}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 3151,5 \text{ ч.}$$

$$C_{кз} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot \tau. \quad (22)$$

$$C_{кз} = \left(\frac{633,8 \cdot 12}{4758} + 0,9 \right) \cdot 3151,5 = 7,874 \text{ тыс. руб./кВт.}$$

$$C_{xx} = \left(\frac{\alpha \cdot 12}{T_M} + \beta \right) \cdot T_p, \quad (23)$$

$$C_{xx} = \left(\frac{633,8 \cdot 12}{4758} + 0,9 \right) \cdot 8760 = 21,887 \text{ тыс. руб./кВт.}$$

$$C \cdot \Delta P_T = C_{xx} \cdot \Delta P_{xx} + C_{кз} \cdot K_3^2 \cdot \Delta P_{кз}, \quad (24)$$

$$C \cdot \Delta P_T = 21,887 \cdot 0,41 + 7,874 \cdot 0,9^2 \cdot 2,9 = 27,470 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{\text{КТП}} = E \cdot K_{\text{ТП}} \cdot N_{\text{Т}} + C \cdot \Delta P_{\text{Т}}, \quad (25)$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 164 \cdot 1 + 27,470 = 64,042 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант № 2

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 250-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{\text{ХХ}} = 0,58 \text{ кВт}; \Delta P_{\text{кз}} = 4,2 \text{ кВт}; S_{\text{Н}} = 250 \text{ кВА}; K_{\text{з}} = 0,9.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 250-10/0,4 по формулам 24-25:

$$C \cdot \Delta P_{\text{Т}} = 21,887 \cdot 0,58 + 7,874 \cdot 0,9^2 \cdot 4,2 = 39,481 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{\text{КТП}} = 0,223 \cdot 198 \cdot 1 + 39,481 = 83,635 \text{ тыс. руб.}$$

Исходя из расчетов приведенных затрат, к установке на комплектно трансформаторную подстанцию принимается силовой трансформатор ТМГ-160/10/0,4.

Далее производится расчет для второй группы промышленных объектов. Это климатические камеры 1 и 2, дождевальная и солевая камеры, комплекс ремонта шасси автозаправочная станция, ремонтный, пожарный и сварочный боксы, скважина 2, административно-бытовой комплекс. Данные промышленные объекты являются потребителями 2 и 3 категории надежности электроснабжения.

«Поскольку производится расчет нескольких промышленных объектов, то определяется суммарная расчетная активная и реактивная мощности (формулы 26-27)» [21]:

$$\sum P_{\text{P}} = P_{\text{P1}} + P_{\text{P2}} + P_{\text{P3}} + P_{\text{P4}} + P_{\text{P5}} + P_{\text{P6}} + P_{\text{P7}} + P_{\text{P8}} + \quad (26)$$

$$+ P_{\text{P10}} + P_{\text{P12}} + P_{\text{P13}}.$$

$$\sum P_{\text{P}} = 364 + 414,4 + 51 + 68,85 + 300,72 + 15 + 7,65 + 28,13 +$$

$$+88,4 + 33,15 + 36,4 = 1407,7 \text{ кВт.}$$

$$\sum Q_P = Q_{P1} + Q_{P2} + Q_{P3} + Q_{P4} + Q_{P5} + Q_{P6} + Q_{P7} + Q_{P8} + \quad (27)$$

$$+ Q_{P10} + Q_{P12} + Q_{P13}.$$

$$\sum Q_P = 341,25 + 388,5 + 61,2 + 60,75 + 233,06 + 23,4 + 10,53 + 100,13 +$$

$$+ 78 + 29,25 + 46,41 = 1372,47 \text{ кВАр.}$$

Далее рассчитывается суммарный $\text{tg } \varphi$ для всех промышленных объектов входящих в данную группу. Для этого используются мощности, которые рассчитаны для наиболее загруженной смены. Расчеты производятся по формуле 20:

$$\text{tg } \varphi = \frac{1485,5}{1744,9} = 0,79.$$

По формуле 15 определяется мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{к.р} = 0,9 \cdot 1407,7 \cdot (0,79 - 0,4) = 489,75 \text{ кВАр.}$$

$Q_{к.р}$ округляется до ближайшего номинального значения мощности компенсирующего устройства [22]. Поскольку промышленные объекты, входящие в данную группу, является потребителями 2-й и 3-й категории надежности, то следует установить два трансформатора и 2 устройства компенсации. То есть выбираем 2 устройства компенсации: АУКРМ-240-0,4.

Пересчет полной мощности группы промышленного объекта, определяемой расчетным способом, с учетом компенсации реактивной мощности производится по формуле 16:

$$S_p = \sqrt{1407,7^2 + (1372,47 - 480)^2} = 1666,77 \text{ кВА.}$$

Затем рассчитывается мощность трансформаторов, которые будут установлены на КТП по формуле 17:

$$S_T \geq \frac{1666,77}{0,7 \cdot 2} = 1190,55 \text{ кВА.}$$

«Произведем выбор числа и мощности цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности» [22].

Вариант № 1

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 1250-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{xx} = 1,96 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 14,35 \text{ кВт}; S_H = 1250 \text{ кВА}; K_3 = 0,7.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 1250-10/0,4 по формулам 24-25:

$$C \cdot \Delta P_T = 21,887 \cdot 1,96 + 7,874 \cdot 0,7^2 \cdot 14,35 = 98,265 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot 576 \cdot 2 + 98,265 = 355,161 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант № 2

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 1600-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{xx} = 2,28 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 18 \text{ кВт}; S_H = 1600 \text{ кВА}; K_3 = 0,7.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 1600-10/0,4 по формулам 24-25:

$$C \cdot \Delta P_T = 21,887 \cdot 2,28 + 7,874 \cdot 0,7^2 \cdot 18 = 119,351 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot 864 \cdot 2 + 119,351 = 504,695 \text{ тыс. руб.}$$

Исходя из расчетов приведенных затрат, к установке на комплектно трансформаторную подстанцию принимается силовой трансформатор ТМГ-1250/10/0,4.

Далее производится расчет для первой группы промышленных объектов. Это скважина 3, очистные сооружения, дорожно-ремонтный пункт и автомойка. Данные промышленные объекты являются потребителями 3 категории надежности электроснабжения.

«Поскольку производится расчет нескольких промышленных объектов, то определяется суммарная расчетная активная и реактивная мощности (формулы 28-29)» [22]:

$$\sum P_P = P_{P11} + P_{P14} + P_{P15} + P_{P17}. \quad (28)$$

$$\sum P_P = 77,35 + 114,75 + 63,75 + 63 = 318,85 \text{ кВт.}$$

$$\sum Q_P = Q_{P11} + Q_{P14} + Q_{P15} + Q_{P17}. \quad (29)$$

$$\sum Q_P = 68,25 + 101,25 + 86,7 + 71,4 = 327,6 \text{ кВАр.}$$

Далее рассчитывается суммарный $\text{tg } \varphi$ для всех промышленных объектов входящих в данную группу. Для этого используются мощности, которые рассчитаны для наиболее загруженной смены. Расчеты производятся по формуле 20:

$$\text{tg } \varphi = \frac{327,6}{381} = 0,86.$$

По формуле 15 определяется мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{К.Р} = 0,9 \cdot 318,85 \cdot (0,86 - 0,4) = 131,96 \text{ кВАр}$$

$Q_{к.р}$ округляется до ближайшего номинального значения мощности компенсирующего устройства [21]. Поскольку промышленные объекты, входящие в данную группу, являются потребителями 3-й категории надежности, то следует установить один трансформатор и одно устройство компенсации. То есть выбираем одно устройство компенсации: АУКРМ-125-0,4.

Пересчет полной мощности группы промышленного объекта, определяемой расчетным способом, с учетом компенсации реактивной мощности производится по формуле 16:

$$S_p = \sqrt{318,85^2 + (327,6 - 125)^2} = 377,77 \text{ кВА}$$

Затем рассчитывается мощность трансформаторов, которые будут установлены на КТП по формуле 17:

$$S_T \geq \frac{377,77}{0,9} = 419,74 \text{ кВА}$$

«Произведем выбор числа и мощности цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности» [22].

Вариант № 1

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 630-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{xx} = 1,16 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 7,6 \text{ кВт}; S_H = 630 \text{ кВА}; K_3 = 0,9.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 630-10/0,4 по формулам 24-25:

$$C \cdot \Delta P_T = 21,887 \cdot 1,16 + 7,874 \cdot 0,9^2 \cdot 7,6 = 73,862 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot 318 \cdot 1 + 73,862 = 144,776 \text{ тыс. руб.}$$

Вариант № 2

Рассмотрим вариант с трансформатором типа ТМГ 1000-10/0,4 кВА.

Паспортные данные трансформатора:

$$\Delta P_{xx} = 1,6 \text{ кВт}; \Delta P_{кз} = 10,8 \text{ кВт}; S_H = 1000 \text{ кВА}; K_3 = 0,9.$$

Рассчитаем затраты на установку КТП с трансформаторами ТМГ 1000-10/0,4 по формулам 24-25:

$$C \cdot \Delta P_T = 21,887 \cdot 1,6 + 7,874 \cdot 0,9^2 \cdot 10,8 = 103,901 \text{ тыс. руб.}$$

$$Z_{КТП} = 0,223 \cdot 464 \cdot 2 + 103,901 = 310,845 \text{ тыс. руб.}$$

Исходя из расчетов приведенных затрат, к установке на комплектно трансформаторную подстанцию принимается силовой трансформатор ТМГ-630/10/0,4.

Результаты сводятся в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов выбора цеховых трансформаторов и компенсирующих устройств

№	Наименование цехов промышленного предприятия	Категория надежности электроснабжения	P_p , кВт	$Q_{к.р.}$, кВАр	Q_p , кВАр	S_p , кВА	Принято к установке									
							Устройства компенсации	$S_{н.т.}$, кВА	$n_T / n_{ку}$							
1	Климатическая камера 1	2	1407,7	489,75	892,47	1666,77	2хАУКРМ-240-0,4	1250	2							
2	Климатическая камера 2	2														
3	Дождевальная камера	2														
4	Солевая камера	2														
5	Комплекс ремонта шасси	2														
6	АЗС	3														
7	Ремонтный бокс	3														
8	Сварочный бокс	3														
10	Скважина 2	3														
12	Пожарный бокс	3														
13	Административно-бытовой корпус	3														
9	Скважина 1	3								108,38	47,45	68,03	127,96	АУКРМ-45-0,4	160	1
16	КПП охрана	3														

Продолжение таблицы 3

№	Наименование цехов промышленного предприятия	Категория надежности электроснабжения	P_p , кВт	$Q_{к.р.}$, кВАр	Q_p , кВАр	S_p , кВА	Принято к установке		
							Устройства компенсации	$S_{н.т.}$, кВА	$n_T / n_{ку}$
11	Скважина 3	3	318,85	131,96	202,6	377,77	АУКРМ-125-0,4	630	1
14	Очистные сооружения	3							
15	Дорожно-ремонтный пункт	3							
17	Автомойка	3							
Суммарная полная мощность цехов промышленного предприятия, $\sum S_p$, кВА:						2172,495			

Выводы по третьему разделу.

В данном разделе проанализирован план испытательного автополигона. Промышленные объекты расположенные неподалеку друг от друга и имеющие малую нагрузку скооперированы для питания от единой трансформаторной подстанции.

Произведены расчеты для выбора установок компенсации реактивной мощности и силовых трансформаторов. Для каждой комплектной трансформаторной подстанции рассмотрено два варианта силовых трансформатора. Выбор трансформаторов производился по наименьшему капиталовложению. На основании выполненных расчетов к установке были приняты силовые масляные трансформаторы типа ТМГ, мощность которых составляет 160, 1250, 630 кВА, и устройства компенсации реактивной мощности типа АУКРМ, мощностью 45, 125 и 240 кВАр.

4 Расчет и выбор кабельных линий 0,4 кВ

Для производства выбора аппарата защиты нужно знать, где он установлен, тип его и число фаз.

Токи в кабельной линии, находящейся сразу после силового трансформатора, определяются по формуле 30:

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{н.т}}, \quad (30)$$

где $U_{н.т}$ – номинальное напряжение силового трансформатора, кВ, принимается равным $U_{н.т} = 0,4$ кВ.

Токи в кабельной линии (КЛ), питающие распределительные устройства или пункты определяются по формуле 31:

$$I_{пу} = \frac{S_{мпу}}{\sqrt{3} \cdot U_{н.т}}, \quad (31)$$

где $U_{н.т}$ – номинальное напряжение силового трансформатора, кВ, принимается равным $U_{н.т} = 0,38$ кВ.

Для выбора сечения проводника по условиям нагрева токами нагрузки сравниваются расчетный ток I_p и допустимый $I_{доп}$ для провода с учетом способа его прокладки. При этом должно соблюдаться следующее соотношение (формула 32):

$$I_{доп} \geq \frac{I_p}{K_{п}}. \quad (32)$$

Произведем расчеты номинальных токов отходящих линий КЛ 1-3 от комплектно трансформаторных подстанций по формулам 30-32.

$$I_{T1} = \frac{160}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 231,21 \text{ А.}$$

$$I_{\text{доп1}} \geq \frac{231,21}{1,22} = 189,52 \text{ А.}$$

Для данного участка выбираем медный кабель сечением $s=50 \text{ мм}^2$, у которого $I_{\text{доп}}=215 \text{ А}$.

$$I_{T2} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 1806,36 \text{ А.}$$

$$I_{\text{доп2}} \geq \frac{1806,36}{1,22} = 1480,62 \text{ А.}$$

Для данного участка выбираем 3 медных кабеля сечением $s=185 \text{ мм}^2$, у которого $I_{\text{доп}}=1530 \text{ А}$.

$$I_{T3} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 910,4 \text{ А.}$$

$$I_{\text{доп3}} \geq \frac{910,4}{1,22} = 746,23 \text{ А.}$$

Для данного участка выбираем 2 медных кабеля сечением $s=120 \text{ мм}^2$, у которого $I_{\text{доп}}=770 \text{ А}$.

Далее произведем расчет номинальных рабочих токов и выберем сечения для кабельных линий КЛ4 и КЛ5 по формулам 31 и 32.

$$I_{\text{КЛ4}} = \frac{110,52}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 168,12 \text{ А.}$$

$$I_{\text{доп4}} \geq \frac{168,12}{1,22} = 137,8 \text{ А.}$$

Для данного участка выбираем медный кабель сечением $s=25 \text{ мм}^2$, у которого $I_{\text{доп}}=140 \text{ А}$.

$$I_{\text{КЛ4}} = \frac{47,35}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 72,03 \text{ А.}$$

$$I_{\text{доп4}} \geq \frac{72,03}{1,22} = 59,04 \text{ А.}$$

Для данного участка выбираем медный кабель сечением $s=8 \text{ мм}^2$, у которого $I_{\text{доп}}=62 \text{ А}$.

Расчеты для кабельных линий КЛ 6-20 производятся аналогично.

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета токов и выбора сечения кабелей

№ кабельной линии	Sp, кВА	I_p , А	I доп расч., А	I доп.н, А	s, мм ²
1	160	231,21	189,52	215	50
2	1250	1806,36	1480,62	1530	3x185
3	630	910,4	746,23	770	2x120
4	110,52	167,97	137,68	140	25
5	47,35	71,96	58,99	62	8
6	498,95	758,28	621,54	645	3x50
7	568,03	863,27	707,6	810	3x70
8	79,66	121,07	99,24	100	16
9	91,82	139,54	114,38	140	25
10	380,46	578,20	473,94	510	3x35
11	117,89	179,17	146,86	170	35
12	27,79	42,24	34,62	41	4
13	13,02	19,78	16,21	23	1,5
14	44,21	67,19	55,07	62	8
15	104,0	158,05	129,55	140	25
16	58,98	89,64	73,47	80	10

Продолжение таблицы 4

№ кабельной линии	Sp, кВА	I _p , А	I доп расч., А	I доп.н, А	s, мм ²
17	107,61	163,55	134,06	140	25
18	103,16	156,77	128,5	140	25
19	153,03	232,57	190,63	215	50
20	95,22	144,71	118,62	140	25

Выводы по четвертому разделу.

В данном разделе производился расчет для определения сечения проводника кабельных линий. Выбор производился по условию нагрева токами нагрузки. Для этого сравнивались расчетный ток I_p и допустимый I_{доп} для провода с учетом способа его прокладки. Для расчетов принимались данные для кабелей с медными жилами, так как медь по электропроводности превосходит алюминий приблизительно в полтора раза. Следовательно, при питании одной и той же нагрузки провод с медными жилами будет иметь меньшее сечение, чем алюминиевый. Выбранные сечения кабельных линий удовлетворяют данному условию.

5 Расчет токов короткого замыкания

«В этом разделе определяется ток трехфазного короткого замыкания на стороне высокого и низкого напряжения трансформаторов» [19].

На рисунке 3 отображена схема для расчета токов КЗ. На рисунке 2 изображена схема замещения.

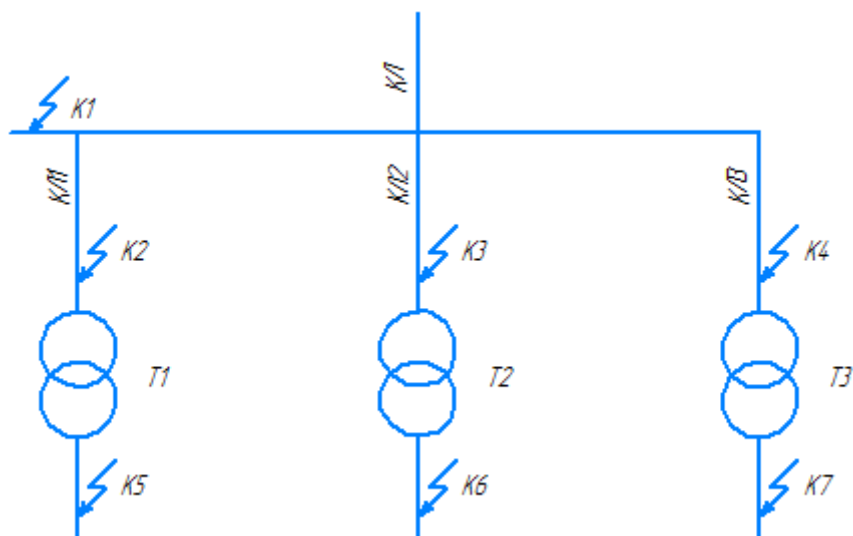


Рисунок 2 – Схема для расчета токов короткого замыкания

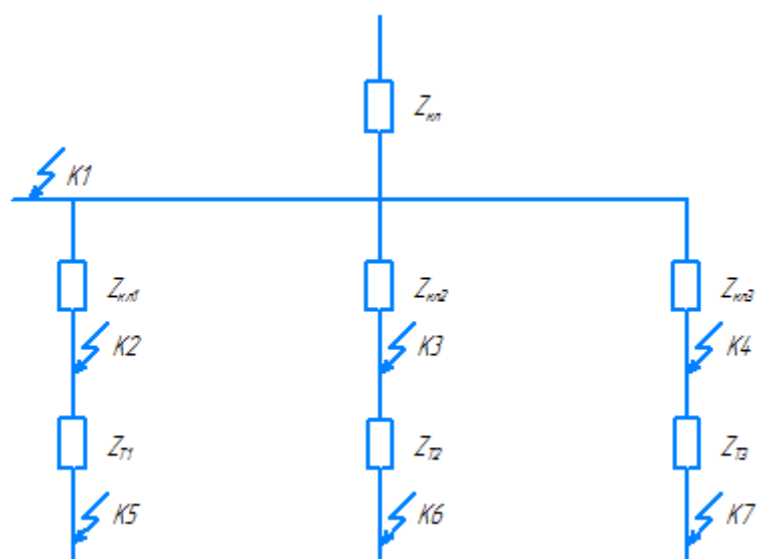


Рисунок 3 – Схема замещения

«Паспортные данные силовых трансформаторов 10/0,4 кВ занесены в таблицу 5» [16].

Таблица 5 – Паспортные данные трансформатора

Тип	S _н , МВА	Каталожные данные				
		U _{ном} , кВ		U _к , %	P _к , кВт	P _х , кВт
		ВН	НН			
ТМГ – 160/10	0,16	10,5	0,4	4,7	2,9	0,41
ТМГ – 1250/10	1,25	10,5	0,4	6,0	14,35	1,96
ТМГ – 630/10	0,63	10,5	0,4	5,5	7,6	1,16

Ниже отражены данные внешней ЭЭС используемые для расчета токов короткого замыкания:

$$S_6 = 100 \text{ МВА}; U_{61} = 10,5 \text{ кВ}; U_{62} = 0,4 \text{ кВ}; I_{\text{кз.ш.}}^{(3)} = 6,5 \text{ кА.}$$

По формуле 33 определяется базисный ток:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} \tag{33}$$

$$I_{61} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,51 \text{ кА.}$$

$$I_{62} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,51 \text{ кА.}$$

По формуле 34 определяется сопротивление системы:

$$x_{*C(6)} = \frac{I_{61}}{I_{\text{кз.ш.}}^{(3)}} \tag{34}$$

$$x_{*C(6)} = \frac{5,51}{6,5} = 0,85 \text{ о. е.}$$

По формуле 35-36 находятся активное и реактивное сопротивления линии 10 кВ питающей комплектно трансформаторные подстанции:

$$r_{*ВЛ(б)} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2}. \quad (35)$$

$$r_{*ВЛ(б)} = 0,11 \cdot 10 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,998 \text{ о. е.}$$

$$x_{*ВЛ(б)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_б^2}. \quad (36)$$

$$x_{*ВЛ(б)} = 0,08 \cdot 10 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,73 \text{ о. е.}$$

«По формулам 35 и 36 определяются активное и реактивное сопротивления кабельной линии 10 кВ от распределительного устройства до комплектно трансформаторной подстанции №1» [8]:

$$r_{*КЛ1(б)} = 0,31 \cdot 1,2 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,34 \text{ о. е.}$$

$$x_{*КЛ1(б)} = 0,08 \cdot 1,2 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,09 \text{ о. е.}$$

По формуле 37 производится расчет активного сопротивления трансформатора, установленного на комплектно трансформаторной подстанции №1:

$$r_{*Т1(б)} = \frac{\Delta P_K \cdot S_б}{S_H^2}. \quad (37)$$

$$r_{*Т1(б)} = \frac{2,9 \cdot 100 \cdot 10^3}{160^2} = 11,33 \text{ о. е.}$$

По формуле 38 производится расчет полного сопротивления трансформатора, установленного на комплектно трансформаторной подстанции №1:

$$z_{*T1(6)} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} \quad (38)$$

$$z_{*T1(6)} = \frac{4,7}{100} \cdot \frac{100 \cdot 10^3}{160} = 29,38 \text{ о. е.}$$

По формуле 39 производится расчет реактивного сопротивления трансформатора, установленного на комплектно трансформаторной подстанции №1:

$$x_{*T1(6)} = \sqrt{z_{*T1(6)}^2 - r_{*T1(6)}^2} \quad (39)$$

$$x_{*T1(6)} = \sqrt{29,38^2 - 11,33^2} = 27,1 \text{ о. е.}$$

По формуле 40 производится расчет суммарного полного сопротивления для каждой точки короткого замыкания:

$$z_{*\Sigma(6)} = \sqrt{(\Sigma r_{*(6)})^2 + (\Sigma x_{*(6)})^2} \quad (40)$$

Определяется значения суммарного полного сопротивления для точки короткого замыкания К1, К2 и К3.

$$z_{*\Sigma K1(6)} = \sqrt{(0,998)^2 + (0,85 + 0,73)^2} = 1,87 \text{ о. е.}$$

$$z_{*\Sigma K2(6)} = \sqrt{(0,998+0,34)^2 + (0,85 + 0,73 + 0,09)^2} = 2,14 \text{ о. е.}$$

$$z_{*\Sigma K5(6)} = \sqrt{(0,998+0,34 + 27,1)^2 + (0,85 + 1,09 + 0,09 + 11,33)^2} =$$

$$= 31,79 \text{ о. е.}$$

По формуле 41 производится расчет значение периодической составляющей тока короткого замыкания в точках К1-К3:

$$I_k = \frac{I_6}{Z_{*\Sigma(6)}} \quad (41)$$

$$I_{k1} = \frac{5,51}{1,87} = 2,95 \text{ кА.}$$

$$I_{k2} = \frac{5,51}{2,14} = 2,57 \text{ кА.}$$

$$I_{k5} = \frac{144,51}{31,79} = 4,55 \text{ кА}$$

По формуле 42 определяется ударный ток:

$$i_{уд.} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot k_{уд.} \quad (42)$$

$$i_{уд.К1} = \sqrt{2} \cdot 2,95 \cdot 1,62 = 6,76 \text{ кА.}$$

$$i_{уд.К2} = \sqrt{2} \cdot 2,57 \cdot 1,59 = 5,89 \text{ кА.}$$

$$i_{уд.К5} = \sqrt{2} \cdot 4,55 \cdot 1,57 = 10,42 \text{ кА.}$$

Расчеты для остальных точек производятся аналогично. Результаты сведем в таблицу 6 и 7.

Таблица 6 - Расчетные данные токов короткого замыкания на стороне 10 кВ

Точка	$i_{уд.}$, кА	I_k , кА	U_6 , кВ
К1	6,76	2,95	10,5
К2	5,89	2,57	10,5
К3	6,25	2,73	10,5
К4	5,12	2,23	10,5

Таблица 7 - Расчетные данные токов короткого замыкания на стороне 0,4 кВ

Точка	$i_{уд.}, \text{кА}$	$I_{к}, \text{кА}$	$U_{б}, \text{кВ}$
К5	10,42	4,55	0,4
К6	49,42	21,57	0,4
К7	30,38	13,26	0,4

Выводы по пятому разделу.

В данном разделе производился расчет токов короткого замыкания на сторонах высокого и низкого напряжения трансформаторов. Для этого построены схема замещения и расчетная схема. Определены активные, реактивные и полные сопротивления всех элементов схемы, рассчитаны базисные токи. Расчеты производились для точек К1-К7. Для всех точек определены ударные токи и периодические составляющие тока короткого замыкания. Расчеты производились в относительных единицах.

6 Выбор и проверка электрооборудования системы электроснабжения

«Электрические аппараты работают в условиях эксплуатации в трех основных режимах: в длительном режиме, в режиме перегрузки и в режиме короткого замыкания.

Аппараты и проводники первичных цепей должны удовлетворять следующим требованиям:

- соответствию окружающей среды и роду установки;
- необходимой прочности изоляции для надежной работы в длительном режиме и при кратковременных перенапряжениях;
- допустимому нагреву токами длительных режимов;
- стойкости в режиме короткого замыкания;
- технико-экономической целесообразности;
- достаточной механической прочности;
- допустимым потерям напряжения в нормальном и послеаварийном режимах» [14].

6.1 Выбор высоковольтного выключателя

На комплектно трансформаторную подстанцию №2 на стороне 10 кВ устанавливается высоковольтный выключатель на вакуумной основе ВВУ-СЭЩ-П-10-20/1000 [12].

Произведем проверку выключателя по следующим критериям:

1. По формуле 43 проверяется номинальное напряжение:

$$U_{\text{сет.ном}} \leq U_{\text{ном}} \quad (43)$$
$$10\text{кВ} = 10\text{кВ}.$$

2. По формулам 44 и 45 производится проверку максимального тока:

$$I_{max} = \frac{1,4 \cdot S_T}{\sqrt{3} \cdot U_H} \quad (44)$$

$$I_{max} \leq I_{ном} \quad (45)$$

$$I_{max} = \frac{1,4 \cdot 1250}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 96,34 \text{ A.}$$

$$96,34 \text{ A} \leq 1000 \text{ A.}$$

3. Проверка по отключающей способности:

По формуле 46 проверяется симметричный ток:

$$I_{п,\tau} \leq I_{откл.ном} \quad (46)$$

$$I_{п,\tau} = I_{кз} = 2,73 \text{ кА.}$$

$$2,73 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА.}$$

По формулам 47-50 производится расчет для проверки апериодическая составляющая тока:

$$\tau = t_{рз} + t_{с.в.} \quad (47)$$

$$\tau = 0,01 + 0,03 = 0,04 \text{ с.}$$

$$I_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{п,\tau} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} \quad (48)$$

$$I_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot 2,73 \cdot e^{-\frac{0,04}{0,03}} = 1,03 \text{ кА.}$$

$$I_{a,ном} = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{нор}}{100} \right) \cdot I_{откл.ном} \quad (49)$$

$$I_{a,ном} = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 40}{100} \right) \cdot 20 = 11,31 \text{ кА.}$$

$$I_{a,\tau} \leq I_{a,ном} \quad (50)$$

$$1,03 \text{ кА} \leq 11,31 \text{ кА.}$$

«4. По формулам 51-52 производится проверка включающей способности» [15]:

$$I_{кз} \leq I_{вкл.ном.} \quad (51)$$

$$2,73 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА.}$$

$$i_{уд.кз} \leq i_{вкл.ном.} \quad (52)$$

$$6,25 \text{ кА} \leq 51 \text{ кА.}$$

5. По формулам 53-54 производятся расчеты для проверки электродинамической стойкости:

$$I_{кз} \leq I_{вкл.ном.} \quad (53)$$

$$2,73 \text{ кА} \leq 20 \text{ кА.}$$

$$i_{уд.кз} \leq i_{вкл.ном.} \quad (54)$$

$$6,25 \text{ кА} \leq 51 \text{ кА.}$$

«6. По формулам 55-56 выключатель проверяется по термической стойкости» [17]:

$$t_{откл} = t_{рз} + t_{пв.откл.} \quad (55)$$

$$t_{откл} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с.}$$

$$B_K = I_{п,0.кз}^2 \cdot (t_{откл} + T_a). \quad (56)$$

$$B_K = (2,73 \cdot 10^3)^2 \cdot (0,06 + 0,03) = 0,67 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с.}$$

В связи с тем, что $t_{откл} = 0,06 \text{ с} < t_T = 3 \text{ с}$, поэтому расчет для проверки на термическую стойкость рассчитывается по условию, описанному в формуле 57:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_{откл.} \quad (57)$$

$$I_T^2 \cdot t_{откл} = (20 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 24 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с.}$$

$$0,67 \cdot 10^6 A^2 \cdot c \leq I_T^2 \cdot t_{откл} = 24 \cdot 10^6 A^2 \cdot c.$$

Поскольку данный выключатель соответствует всем условиям, изложенным выше, то его можно установить на комплектно трансформаторную подстанцию №2.

6.2 Выбор трансформатора напряжения

Далее производится проверка трёхфазного трансформатора напряжения - НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225 [13].

1. По формуле 58 ТН проверяется по номинальное напряжение:

$$U_{сет.ном} \leq U_{ном}. \quad (58)$$

$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}.$$

2. Далее трансформатор напряжения проходит проверку по вторичной нагрузке.

По формуле 59 произведем расчет для определения нагрузки всех реле и приборов, предназначенных для измерений, которые присоединяются к ТН:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{\left(\sum S_{приб} \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\sum S_{приб} \cdot \sin \varphi\right)^2}. \quad (59)$$

К вторичной нагрузке трансформатора напряжения относятся счетчики активной и реактивной электрической энергии с общей мощностью 125 ВА.

По формуле 60 производится проверка номинального значения ТН и вторичной нагрузки, подключаемой к трансформатору напряжения:

$$S_{ном.ТН} \geq S_{2\Sigma}. \quad (60)$$

$$225 \text{ ВА} \geq 125 \text{ ВА}.$$

Поскольку данный трансформатор напряжения соответствует всем условиям, изложенным выше, то его можно установить на комплектно трансформаторную подстанцию №2.

6.3 Выбор трансформатора тока

Далее производятся расчеты для проверки трансформатора тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-150/5 [11].

1. По формуле 61 трансформатор тока проверяется по номинальное напряжение:

$$U_{\text{сет.ном}} \leq U_{\text{ном}}. \quad (61)$$
$$10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ}.$$

2. По формуле 62 производится проверка трансформатора тока по максимальному току:

$$I_{\text{max}} \leq I_{1\text{ном}}. \quad (62)$$
$$96,34 \text{ А} \leq 150 \text{ А}.$$

«3. По формуле 63 трансформатор тока проверяется по термической стойкости» [18]:

$$B_K \leq I_T^2 \cdot t_{\text{откл}}. \quad (63)$$
$$I_T^2 \cdot t_{\text{откл}} = (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06 = 96 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$
$$0,67 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с} \leq 96 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Поскольку данный трансформатор тока соответствует всем условиям, изложенным выше, то его можно установить на комплектно трансформаторную подстанцию №2.

6.4 Выбор автоматических выключателей 0,4 кВ на комплектно трансформаторной подстанции

«Производится проверка автоматического выключателя ВА 55-45 по следующим условиям» [10]:

1. По формуле 64 автоматический выключатель проверяется по номинальное напряжение:

$$U_{\text{сет.ном}} \leq U_{\text{ном}} \quad (64)$$
$$0,38 \text{ кВ} = 0,38 \text{ кВ.}$$

2. По формуле 65 производится проверка автоматического выключателя по номинальному току:

$$I_{\text{ном}} \leq I_n \quad (65)$$
$$1806,36 \text{ А} \leq 2500 \text{ А.}$$

3. По формуле 66 производится проверка автоматического выключателя по току расцепителя:

$$1,25 \cdot I_{\text{ном}} \leq I_n \quad (66)$$
$$1,25 \cdot 1806,36 \text{ А} \leq 2500 \text{ А.}$$
$$2257,95 \text{ А} \leq 2500 \text{ А.}$$

4. По формуле 67 производится проверка отключающей способности:

$$I_k \leq I_{\text{откл.ном}} \quad (67)$$
$$2,73 \text{ кА} \leq 50 \text{ кА.}$$

Поскольку данный автоматический выключатель соответствует всем условиям, изложенным выше, то его можно установить на комплектно трансформаторную подстанцию №2.

Все результаты сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Электрооборудование, планируемое к установке на комплектно трансформаторную подстанцию №2

Наименование оборудования	Тип оборудования
Высоковольтный выключатель	ВВУ-СЭЩ-П-10-20/1000
Трансформатор напряжения	НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225
Трансформатор тока	ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-600/5
Автоматический выключатель	ВА 55-45

Выводы по шестому разделу.

В данном разделе производился выбор и проверка электрооборудования системы электроснабжения испытательного полигона. Оборудование проверялось по номинальному напряжению, максимальному току, термической и электродинамической стойкости, включающей и отключающей способности. Выбраны высоковольтный выключатель ВВУ-СЭЩ-П-10-20/1000, трансформатор напряжения НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225, трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-600/5 и автоматический выключатель ВА 55-45. Все электрооборудование соответствует всем условиям и принято к установке на комплектно трансформаторную подстанцию №2.

7 Проверка кабелей на термическую стойкость и на невозгорание

«Проверка кабельных линий на термическую стойкость и на невозгорание при КЗ выполнена в соответствии с нормами технического проектирования и ГОСТ Р 52736-2007 «Короткие замыкания в электроустановках» по методике приведенной ниже» [3].

Произведем расчеты для проверки кабеля отходящего от комплектно трансформаторной подстанции №1 на термическую стойкость.

«Поскольку $t_{откл} > 3 \cdot T_{a.э.}$, то интеграл Джоуля определяется по формуле 68» [3]:

$$B_K = I_{п.о.}^2 \cdot t_{откл} + T_{a.э.} \quad (68)$$
$$B_K = 4,55^2 \cdot 0,18 + 0,03 = 3,76 \text{ кА}^2 \cdot \text{с.}$$

Далее производится проверка кабеля на термическую стойкость в случае короткого замыкания по формуле 69:

$$S \geq \frac{\sqrt{B_K}}{C_m} \quad (69)$$
$$S \geq \frac{\sqrt{3,76}}{120} = 0,016.$$
$$50 > 0,016.$$

По формуле 70 определяется минимальный ток термической стойкости:

$$I_{тер} = \frac{S \cdot C_m}{\sqrt{t_{откл} + T_{a.э.}}} \quad (70)$$
$$I_{тер} = \frac{50 \cdot 120}{\sqrt{0,18 + 0,03}} = 13,04 \text{ кА.}$$

Проверка кабеля на термическую стойкость производится по условию (формула 71):

$$I_{\text{тер}} > I_{\text{п.о.}} \quad (71)$$
$$13,04 \text{ кА} > 4,55 \text{ кА.}$$

Кабель, отходящий от комплектно трансформаторной подстанции №1, удовлетворяет заданным условиям по термической стойкости.

Далее проверим данный кабель на условие невозгорания.

По формуле 72 определяется значение начальной температуры жилы до момента короткого замыкания:

$$Q_{\text{н}} = Q_0 + Q_{\text{д}} - Q_{\text{окр}} \cdot \left(\frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{доп.}} \cdot K_{\text{п}}} \right) \quad (72)$$
$$Q_{\text{н}} = 20 + 80 - 16 \cdot \left(\frac{231,21}{215 \cdot 1,22} \right) = 55,32 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

По формуле 73 определим значение температуры жилы после короткого замыкания:

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{н}} \cdot e^K + a \cdot e^K - 1 \quad (73)$$
$$Q_{\text{к}} = 55,32 \cdot e^{0,068} + 2,28 \cdot e^{0,068} - 1 = 60,63 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

По формуле 74 производится проверка кабеля по условию невозгорания:

$$Q > Q_{\text{к}} \quad (74)$$
$$250 \text{ }^{\circ}\text{C} > 60,63 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Кабель, отходящий от комплектно трансформаторной подстанции №1, удовлетворяет заданным условиям невозгорания. Из этого следует, что данный кабель допущен к прокладке на данном участке.

Остальные расчеты ведутся аналогично. Все результаты сводятся в таблицу 9.

Таблица 9 – Результаты проверки выбранных кабелей на термическую стойкость и на невозгорание

Кабель	КТП №1	КТП№2	КТП№3
$B_K, \text{кА}^2 \cdot \text{с}$	3,76	81,46	31,67
$S, \text{мм}^2$	50	3x185	2x120
$I_{П.О.}, \text{кА}$	4,55	21,57	13,26
$S \geq \frac{\sqrt{B_K}}{C_m}$	$50 > 0,016$	$3x185 > 0,075$	$2x120 > 0,047$
$I_{\text{тер}}, \text{кА}$	13,04	144,78	62,61
$I_{\text{тер}} > I_{П.О.}$	$13,04 > 4,55$	$144,78 > 21,57$	$62,61 > 13,26$
$Q_n, ^\circ\text{C}$	55,32	54,18	54,02
$Q_k, ^\circ\text{C}$	60,63	57,14	57,71
$Q > Q_k$	$250 > 60,63$	$250 > 57,14$	$250 > 57,71$

Выводы к седьмому разделу.

В данном разделе производилась проверка кабелей на термическую стойкость и на невозгорание. Произведены расчеты интеграла Джоуля, минимального термического тока, начальной температуры жилы до момента короткого замыкания, температуры жилы после короткого замыкания. Все кабели удовлетворяют условиям проверки и приняты к установке на испытательный полигон.

8 Расчет контура заземления для комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ

«Чтобы обеспечить безопасность людей, работающих на установках напряжением до 1000 В и выше, необходимо сооружать заземляющие устройства. Так же следует заземлять металлические части электрического оборудования и установок.

Удельное сопротивление грунта в месте устройства заземления составляет $\rho_{и}=110 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [2]. Заземлителями служат стальные стержни диаметром $d=0,014 \text{ м}$, длина одного стержня составляет $l=3 \text{ м}$, глубина заложения 1 м. Для соединения между собой вертикальных заземлителей используется полоса размером 40x40 мм.

По формуле 75 производится расчет сопротивление грунта для заземления, расположенного вертикально:

$$\rho_p = K_c \cdot K_1 \cdot \rho_{и} \quad (75)$$
$$\rho_p = 1,57 \cdot 1 \cdot 110 = 172,7 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

По формуле 76 рассчитывается сопротивление заземляющих устройств:

$$R_B = \frac{0,366 \cdot \rho_p \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \cdot \lg \frac{4 \cdot h_{cp} + l}{4 \cdot h_{cp} - l} \right)}{l} \quad (76)$$
$$R_B = \frac{0,366 \cdot 172,7 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{0,014} + 0,5 \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,5 + 3}{4 \cdot 2,5 - 3} \right)}{3} = 58,25 \text{ Ом}.$$

«Согласно ПУЭ сопротивление повторного заземления устройства не должно превышать 10 Ом, $\rho = 100 \text{ Ом}$ и ниже, если сопротивление выше 10 Ом, то допускается принимать» [1] (формула 77).

$$R_3 = 30 \cdot \frac{\rho_p}{100}. \quad (77)$$

$$R_3 = 30 \cdot \frac{172,7}{100} = 51,81 \text{ Ом.}$$

Поскольку $R_3 < R_B$, то для последующих расчетов принимаем значения сопротивления заземления равное 51,81 Ом.

Определяем общее сопротивление всех повторных заземлений, принимаем количество повторных заземлений $n=6$ (формула 78):

$$r_{\text{ПЗ}} = \frac{R_3}{n}. \quad (78)$$

$$r_{\text{ПЗ}} = \frac{R_3}{n} = \frac{51,81}{6} = 8,64 \text{ Ом.}$$

«Фактическое сопротивление заземляющего устройства определяется по формуле 79» [20]:

$$r_{\text{з.у.}} = \frac{r_3 \cdot r_{\text{ПЗ}}}{r_3 + r_{\text{ПЗ}}}. \quad (79)$$

$$r_{\text{з.у.}} = \frac{4 \cdot 8,64}{4 + 8,64} = 2,73 \text{ Ом.}$$

Сопротивление выбранного заземляющего устройства меньше 4 Ом.

Количество вертикальных заземлителей определяется по формуле 80:

$$n_3 \geq \frac{R_B}{r_d \cdot \eta_B}. \quad (80)$$

$$n_3 \geq \frac{51,81}{4 \cdot 0,85} = 14,91.$$

Принимаем четное число вертикального заземления – 14 шт.

Выводы по восьмому разделу.

В данном разделе производился расчет контура заземления для комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ. Определены удельное сопротивление грунта в месте устройства заземления, диаметр и длина стальных стержней (заземлителей), с глубиной заложения 1 метр. Для соединения между собой вертикальных заземлителей к установке выбрана полоса размером 40х40 мм.

Определены расчетные значения сопротивление грунта для заземления, расположенного вертикально, сопротивление заземляющих устройств, сопротивление повторного заземления, общее сопротивление всех повторных заземлений, фактическое сопротивление заземляющего устройства, количество вертикальных заземлителей.

Расчетное значение вертикальных заземлителей равно $n_3 = 14,91$ шт, поэтому к установке принимается четное число заземлителей $n_3 = 14$ шт.

Заключение

В выпускной квалификационной работе разработан комплекс технических решений для проведения реконструкции системы электроснабжения испытательного полигона АО «АВТОВАЗ». Рассчитаны максимальные ожидаемые расчетные нагрузки всех объектов предприятия, сумма которых составила $P_p=1,834$ МВт, $Q_p=1,813$ МВАр, $S_p=2,58$ МВА. Проанализированы объекты автополигона и сформированы группы для питания от одной комплектной трансформаторной подстанции.

На основании выполненных расчетов произведен выбор силовых трансформаторов и устройств компенсации реактивной мощности. К установке были приняты силовые масляные трансформаторы типа ТМГ, мощность которых составляет 160, 1250, 630 кВА, и устройства компенсации реактивной мощности типа АУКРМ, мощностью 45, 125 и 240 кВАр.

Рассчитаны токи короткого замыкания в нескольких точках системы электроснабжения, питающих испытательный полигон. На основании выполненных расчетов произведен выбор и проверка электрооборудования системы электроснабжения полигона по сторонам 10 и 0,4 кВ.

Опираясь на проделанные расчеты можно сделать вывод, что замена трансформаторов и электрооборудования позволяет спроектировать современную и надежную систему электроснабжения, тем самым обеспечить непрерывную работу испытательного автополигона.

Список используемых источников

1. Вахнина В.В., Горячева В.Л., Степкина Ю.В. Проектирование систем электроснабжения машиностроительных предприятий: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. – Тольятти: ТГУ, 2004. - 92 с.
2. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения // Электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2016. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2976> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения // Электронное учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2015. URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/2943> (дата обращения: 20.01.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: Учебно – методическое пособие для практических занятий и курсового проектирования – Тольятти: ТГУ, 2007. - 54 с.
5. Киреева Э.А., Шерстнев С.Н., под общим ред. Шерстнева С.Н. Полный справочник по электрооборудованию и электротехнике (с примерами расчетов). - Москва, 2013. - 864с.
6. Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети : учебник. М. : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. 363 с.
7. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебное пособие. - Москва, МЭИ, 2009. - 414 с.
8. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. - 382 с.
9. Кузнецов С.М. Проектирование тяговых и трансформаторных подстанций: учебное пособие. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. - 92 с.

10. ОАО «Завод Электроконтактор» [электронный ресурс], URL: <https://www.ekzavod.ru/catalog/vyklyuchateli-va/vyklyuchatel-va-5545-2500a-s-mrt-2-s-ep>, Автоматический выключатель ВА 55-45, (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: <https://electroshield.nt-rt.ru/images/manuals/tol10m.pdf>, Трансформатор тока ТОЛ-СЭЩ-10-0,2S-600/5 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: <https://www.electroshield.ru/catalog/vakuumnie-vykluchateli/vvu-seshch-10-kv/>, Выключатель вакуумный серии ВВУ-СЭЩ-П-10-20/1000 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. ОАО «Самарский завод Электрощит» [электронный ресурс], URL: https://www.electroshield.ru/upload/iblock/1c5/ORT.135.006-TI-_-NALI_SESHCH_6_10_-TEKHNICHESKAYA-INFORMATSIYA.pdf, Трансформатор напряжения НАЛИ-СЭЩ-10-1-0,5-225 (дата обращения: 15.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

14. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов учеб. пособие / Г.Н. Ополева. – М.: Форум; ИНФРА-М, 2018. – 416 с.

15. Правила устройства электроустановок в вопросах и ответах. Раздел 4. Распределительные устройства и подстанции. [Электронный ресурс] URL: <http://etp-perm.ru/el/pue> (дата обращения: 1.02.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

16. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.

17. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей. Централизованное и автономное электроснабжение объектов, цехов, промыслов, предприятий и промышленных комплексов [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Вологда :

"Инфра-Инженерия", 2016. 928 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/95768>,
(дата обращения: 07.03.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения
Методическое пособие для курсового проектирования // Электронное
учебное пособие. Москва: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005.
URL: <https://cloud.mail.ru/stock/dgAkQmzwN5HVgtLiYS5Qz459> (дата
обращения: 20.04.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Front Matter. Electrical Systems and Equipment. Incorporating Modern
Power System Practice, 3rd edition. 1992. – 1018 с.

19. Ismail Kasikci. Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to
IEC 60909, Second edition. 2017. – 298 с.

20. LJ Myatt. Symmetrical Components. Elsevier Ltd, 1968. – 184 с.

21. M. Laughton, D. Warne. Electrical Engineer's Reference Book.
Sixteenth edition. 2003. – 396 с.

22. Philip Kiameh. Power Plant Electrical Equipment and Systems
Handbook. Second edition. 2013. – 583 с.