

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

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

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

Электроснабжение
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Электроснабжение завода по производству изделий из газобетона»

Студент(ка)

Д.О. Мажов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Н. Кузнецов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина _____

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

Темой выпускной квалификационной работы является электроснабжение промышленного предприятия по производству строительных материалов.

В ВКР была проведена разработка системы электроснабжения предприятия по производству газобетонных изделий. Также были проведены: расчет цеховых электрических нагрузок, расчет и выбор внутрицеховых сетей и питающих линий, выбор коммутационно–защитной аппаратуры, выбор релейной защиты питающих элементов, расчет контура защитного заземления, расчет и установка искусственного освещения.

В выпускной квалификационной работе: 55 страниц, 9 рисунков, 17 таблиц и 6 чертежей формата А1.

Содержание

Введение.....	4
1 Характеристика предприятия.....	5
2 Расчет электрических нагрузок предприятия.....	8
2.1 Расчет цеха № 1.....	8
2.2 Результаты расчета электрических нагрузок по цехам.....	11
2.3 Расчет осветительной нагрузки.....	14
3 Распределение электроэнергии.....	16
3.1 Схемы электроснабжения.....	16
3.2 Выбор генераторных установок.....	17
3.3 Выбор трансформатора.....	18
3.4 Выбор сечений кабелей и шинопроводов.....	19
3.5 Выбор аппаратов защиты и коммутации.....	23
4 Выбор основного электрооборудования РУ 0,4 кВ.....	25
4.1 Выбор выключателей.....	25
4.2 Выбор жестких шин.....	26
4.3 Выбор трансформаторов тока.....	27
5 Расчет токов короткого замыкания.....	31
5.1 Расчет тока короткого замыкания в цепи генератора.....	31
5.2 Расчет тока короткого замыкания в цепи трансформатора.....	36
6 Выбор релейной защиты и автоматики.....	41
6.1 Расчет защит силового трансформатора.....	41
6.2 Расчет защит генераторов.....	45
7 Расчет заземления.....	49
Заключение.....	52
Список использованных источников.....	53

Введение

Новейшие промышленные предприятия требуют для своего эффективного функционирования актуального на данный момент времени оборудования, а также технологий и способов его обслуживания. Один из способов повышения надежности электроснабжения - предусмотреть на стадии проектирования наличие независимых источников энергии.

Эффективное использование электрической энергии сократит потери в линиях, а значит, скажется на конечной цене товара и заработной плате сотрудников, так же позволит экономить электроэнергию.

Расчеты производятся на основе последних методик и разработок в системах электроснабжения, что делает данную работу актуальной для новых промышленных предприятий.

Целью ВКР является: качественное электроснабжение данного предприятия с применением автономных источников питания

Задачи ВКР - расчет цеховых электрических нагрузок, расчет и выбор внутрицеховых сетей, а также питающих линий, выбор коммутационно-защитной аппаратуры, выбор релейной защиты питающих элементов, расчет контура защитного заземления, выбор и установка искусственного освещения.

В ВКР была проведена разработка системы электроснабжения предприятия по производству газобетонных изделий, обеспечивающая надёжное питание технологического и вспомогательного оборудования электроэнергией с применением автономных источников – когенерационных генераторных установок.

В ходе выполнения выпускной работы пользовался директивной и другой нормативной документацией, а именно: Правилами устройства электроустановок, инструкциями по проектированию электроснабжения промышленных предприятий, строительными нормами и правилами.

1 Характеристика предприятия

Предприятие будет расположено в промышленном районе г.Ульяновск.

Предприятие будет специализироваться на выпуске изделий из автоклавного ячеистого газобетона, что определяется большим спросом на соответствующую продукцию в данном регионе.

Перечень выпускаемых изделий:

- блоки перемычечные армированные;
- перегородки;
- сухие штукатурные смеси;
- теплоудерживающие плиты;

Газобетон - ячеистый бетон автоклавного твердения, состоит из кварцевого песка, цемента, извести, воды и алюминиевой пудры. Для производства такого материала служат цемент, известь, гипс, а также как сырьё будут использоваться отходы Ульяновской ТЭЦ-2.

Для производства газобетонов на предприятии будет использоваться современная автоматизированная линия от ведущего мирового производителя компании «WERNHANN». Объем выпускаемой продукции 320 тыс. м³ в год. Работа предприятия рассчитана на трехсменную работу, $T_{\max} = 7200$ часов.

В процессе производства серьезные требования предъявляются на стадии дозировки и подготовки сырья. Высокие требования к процессам ферментации и резки готовых блоков. Немецкая линия «WERNHANN» - это линия производства сухих строительных смесей, включающая в себя компьютеризированное, высокопроизводительное оборудование с применением точной автоматики. Данные особенности требуют обеспечить надежное и независимое электроснабжения, для чего предлагаю применить автономное электроснабжение. Перебои в подаче электрической энергии, которые могут привести к нарушению технологического процесса и недоотпуску продукции, приведут к невыполнению обязательств перед заказчиками и невыполнению условного строительства в конкретные сроки. Установка автономных

источников электрической и тепловой энергии – это возможность вырабатывать собственную электрическую и тепловую энергию без затрат лишних топливных ресурсов.

Производство будет размещаться в четырех цехах: цехе приемки и подготовки первичных сырьевых материалов, цехе помола золы, цехе по производству блоков из газобетона, цехе по производству сухих смесей. Суммарная площадь цехов составит 12000 м². Заданная мощность технологического оборудования составит 2540 кВт, рабочее напряжение 380/220 В. Данные об основных электроприемниках (ЭП) приведены в таблице 1.1. Нагрузка задана потребителями I и III категории. К нагрузке I категории относятся потребители главной технологической линии – цеха №: 1, 2, 3, 4. К нагрузке III категории относятся остальные вспомогательные потребители – цеха №: 5, 6.

Таблица 1.1 – Данные об основных электроприемниках

Наименование электроприемника	Установленная мощность P_y , кВт	$k_{и}$	$\cos\phi$
Цех по производству блоков газобетона			
Дозирование и смешивание. Ударопрочная пластина.	205	0,8	0,8
Транспортная тележка.	30	0,5	0,75
Толкатель форм. Машина обработки формы. Машина для смазки форм. Рельсовая тележка.	55	0,6	0,75
Машина для кантования.	40	0,9	0,75
Тележка. Боковой триммер. Машина резки по толщине.	120	0,7	0,75
Подающее устройство автоклавных поддонов.	10	0,6	0,75
Машина поперечной резки	35	0,9	0,75
Погрузочная машина	57	0,8	0,75
Механизм подачи автоклавных тележек. Передаточная вагонетка. Двери автоклава.	140	0,4	0,75
Механизм для удаления нижнего слоя.	42	0,9	0,75
Разделительная машина. Подача автоклавных поддонов.	60	0,8	0,75
Укладочно-сортировочная машина.	57	0,8	0,75
Система транспортировки пакетов. Прессовка пакетов.	50	0,8	0,75
Машина вытяжки.	24	1	0,75
Мастерские	35	0,3	0,75
Паровой котел	80	0,9	0,8
Охладитель	50	0,8	0,8
Насосная технического водопровода	16	0,8	0,75
Вентиляция	72	0,8	0,85
Итого по цеху	1185	-	-
Другие цеха			
Цех приемки и подготовки первичных сырьевых материалов	410	0,66	0,72
Цех помола золы	387	0,6	0,7
Цех по производству сухих строительных смесей	238	0,68	0,8
Склад	22	0,3	0,77
Административно-технический корпус	80	0,7	0,85
Итого по предприятию	2540		

2 Расчет электрических нагрузок предприятия

2.1 Расчет цеха № 1

Цех по производству блоков из газобетона № 1 является подробно рассчитываемым.

Для определения расчетной нагрузки группы трехфазных электроприемников (ЭП) применю метод упорядоченных диаграмм, согласно которому:

$$P_p = K_M \cdot P_{см} = K_M \cdot K_{и} \cdot P_{ном},$$

Реактивная нагрузка для групп ЭП находится при:

$$n_{\text{Э}} \leq 10 - Q_p = 1,1 \cdot Q_{рм} = 1,1 \cdot P_{ном} \cdot K_{и} \cdot \text{tg}\varphi,$$

$$n_{\text{Э}} > 10 - Q_p = Q_{см},$$

здесь $n_{\text{Э}}$ – эффективное число электроприемников, шт;

$Q_{см}$ – средняя реактивная нагрузка за наиболее загруженную смену, вар;

$\text{tg } \varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

Полная расчетная нагрузка группы трехфазных ЭП определится следующим образом:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

Далее произведу подробный расчет цеха № 1.

Значения нагрузок представлены в таблице 2.1. Электроприемники подключаются к силовым распределительным пунктам СП–1, СП–2, СП–3, СП–4.

Для каждой группы ЭП произведу расчёт: $P_{см}$ и $Q_{см}$.

Для ЭП аппарата кантования: $P_{\text{НОМ}} = 38 \text{ кВт}$, $K_{\text{и}} = 0,73$, $\cos\varphi = 0,76$ ($\text{tg}\varphi = 0,89$); тогда получим сменную мощность за самую загруженную смену:

$$P_{\text{см}} = 38 \cdot 0,73 = 28,0 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{см}} = 28 \cdot 0,89 = 24,6 \text{ квар.}$$

Для СП–1 имеется: $n = 20$, $K_{\text{и}} > 0,2$, $m > 3$, получится:

$$n_{\text{э}} = \frac{2 \cdot 465,5}{70} = 13,3 \text{ шт.}$$

Принимаю $n_{\text{э}} = 14$ шт.

Значит, в период максимального потребления электроэнергии работают 14 электроприемников со средним $K_{\text{и}}$ равным:

$$K_{\text{и,сред.}} = \frac{\sum P_{\text{см}}}{\sum P_{\text{НОМ}}};$$

$$K_{\text{и,сред.}} = \frac{329}{466} = 0,71.$$

Таблица 2.1 – Значения нагрузок по цеху № 1

№ п/п	Наименование элекприемников	Кол-во ЭП	Мощность одного ЭП, кВт					Общая установленная мощность, кВт
Силовой пункт 1 (СП-1)								
1	Дозирование и смешивание. Вибрационная пластина.	5	70	62	31	22	20	205
2	Транспортная тележка	1	30					30
3	Толкатель форм. Машина обработки формы. Машина для смазки форм. Рельсовая тележка.	5	18	12	9	8	8	55

Продолжение таблицы 2.1

4	Машина для кантования	2	26	12				38
5	Тележка. Боковой триммер. Машина резки по толщине.	3	48	42	30			120
6	Подающее устройство автоклавных поддонов.	1	10					10
7	Вентиляция и дымоудаление	4	1,5	1,5	1,5	1,0		5,5
Силовой пункт 2 (СП-2)								
8	Машина поперечной резки.	2	25	10				35
9	Погрузочная машин	2	40	17				57
10	Подачи автоклавных тележек. Передаточная вагонетка. Двери автоклава.	3	60	50	30			140
11	Механизм для удаления нижнего слоя	2	30	12				42
12	Вентиляция	4	20	6				66
13	Управление автоклавом	1	2					2
Силовой пункт 3 (СП-3)								
14	Разделительная машина. Подача автоклавных поддонов.	3	35	17	8			60
15	Укладочно-сортировочная машина.	2	45	12				57
16	Система транспортировки пакетов. Прессовка пакетов.	3	30	12	8			50
17	Машина вытяжки	2	21	4				25
18	Вентиляция	1	4,4					4,4
19	Мастерские	8	4	3,2	2	1,6	0,4	35
Силовой пункт 4 (СП-4)								
20	Паровой котел	2	65	15				80
21	Охладитель	2	45	5				50
22	Насосная технического водопровода	2	8	8				16
Всего		52	1 ... 75 кВт				1185 кВт	

Коэффициент максимума получим : $K_M = f(n_{\Sigma}; K_{И}) = 1,13$.

Активная максимальная расчетная мощность для СП-1:

$$P_{p.СП-1} = 1,13 \cdot 329 = 372 \text{ кВт.}$$

Реактивная максимальная расчетная мощность для СП-1 при $n_{\Sigma} > 10$:

$$Q_{p.СП-1} = 267 \text{ квар.}$$

Полная максимальная расчетная мощность для СП-1:

$$S_p = \sqrt{372^2 + 267^2} = 458 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Максимальный расчетный ток нагрузки силового пункта СП-1:

$$I_{p.СП-1} = \frac{S_{p.СП-1}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}};$$

$$I_{p.СП-1} = \frac{458}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 696 \text{ А.}$$

Аналогичные расчеты выполняю для других СП и электроприемников и результаты свожу в таблицу 2.2.

2.2 Результаты расчета электрических нагрузок по цехам

Расчет нагрузок по остальным цехам производится по укрупненным показателям, так как заданы суммарные установленные мощности электроприемников по цехам, но неизвестен их состав. Эффективное число электроприемников определим по формуле:

$$n_{Э} = \frac{P_{уст.}}{P_{ср.э.}},$$

где $P_{ср.э.}$ – средняя мощность одного электроприемника, кВт.

Все расчеты электрических нагрузок по цехам сводятся в таблицу 2.3.

Таблица 2.2 – Сводная информация по цеху производства блоков из газобетона

Наименование групп электроприемников	Кол-во ЭП п, шт.	Установленная мощность, кВт		Модуль силовой сборки m	Коэффициент использования Ки,а	cosφ	tgφ	Средняя мощность за максимально загруженную смену		Эффективное число ЭП пЭ, шт.	Коэффициент максимума Км	Максимальная расчетная мощность			Максимальный расчетный ток Iр,А	
		Одного ЭП Рном,	Общая рабочая					Pсм, кВт	Qсм, квар			Pp, кВт	Qp, квар	Sp, ВА		
																min
СП-1																
Дозирование и смешивание. Вибрационная пластина.	5	9	70	205	47	0,8	0,8	0,75	164	123	-	-	185	123	222	338
Транспортная тележка	1		30	30		0,5	0,75	0,88	15	13,2	-	-	16,9	13,2	21,5	33
Толкатель форм. Машина обработки формы. Машина для смазки форм. Рельсовая тележка.	5	8	18	55		0,5	0,75	0,88	27,5	24,2	-	-	31,08	24,2	39,4	60
Машина для кантования	2	12	28	40		0,7	0,75	0,88	28,0	24,6	-	-	31,6	24,6	40,1	61
Тележка. Боковой триммер. Машина резки по толщине.	3	32	40	120		0,7	0,75	0,88	84,0	73,9	-	-	94,9	73,9	120	183
Подающее устройство автоклавных поддонов.	1		10	10		0,6	0,75	0,88	6	5,28	-	-	6,78	5,3	8,6	13
Вентиляция и дымоудаление	4	1	1,5	5,5		0,8	0,85	0,62	4,4	2,73	-	-	4,97	2,73	5,67	9
Итого по СП-1	21	1	70	465,5	>3	0,71	0,78	0,81	329	267	14	1,13	372	267	458	696
Итого по СП-2	14	5	60	342	>3	0,59	0,75	0,87	200	175	12	1,23	246	175	302	459
Итого по СП-3	19	0,2	45	231	>3	0,69	0,75	0,88	160	140	10	1,16	185	154	241	366
Итого по СП-4	6	5	65	146	>3	0,85	0,8	0,76	117	89	4	1,14	133	98,2	165	251
Итого по цеху	60	1	70	1185		0,72	0,77	0,83	805	671	40	1,09	932	694	1174	1772

Таблица 2.3 – Расчет нагрузок по цехам

Номер цеха	P _{уст} , кВт	K _и	cosφ	tgφ	n _э , шт	K _м	Максимальная расчетная мощность			I _р , А
							P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВ·А	
1	1185	0,72	0,77	0,83	40	1,09	932	711	1174	1772
2	470	0,65	0,7	0,9	9	1,28	391	302	494	751
3	486	0,6	0,75	0,88	6	1,37	399	282	489	743
4	288	0,7	0,8	0,75	14	1,13	228	151	273	415
5	22	0,3	0,8	0,75	4	2,14	14,1	5,4	15,1	23,0
6	80	0,7	0,85	0,62	56	1,09	61,0	34,7	70,2	107
Итого	2531	-	0,77	-	129	-	2025	1486	2515	3630

2.3 Расчет осветительной нагрузки

Расчет освещения произведу в программе «Dialux», ниже укажу результирующую мощность, потребляемую источниками света.

Расчет ведется для системы общего освещения.

Приму к установке светильники: для внутреннего освещения – Lighting technologies - НВТ 400М, для наружного – Lighting technologies - NTV 123 E60.

Нормируемое значение освещенности определим по формуле:

$$E'_H = E_H \cdot k_3,$$

Для цеха № 1 получится освещенность:

$$E'_H = 200 \cdot 1,4 = 280 \text{ лк},$$

Аналогично и для остальных цехов. Результат сведу в таблицу 2.4.

Расчетную нагрузку осветительных установок определю так:

Результаты расчета освещения указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения мощностей осветительной нагрузки

№	Наименование цеха	E'_n , лк	$K_{с.о}$	$\cos\phi$	$P_{н.о.}$, кВт	$F_{ц}$, m^2	$P_{р.о.}$, кВт	$S_{р.о.}$, кВ·А
1	Цех по производству блоков из газобетона	120	0,85	0,95	26,8	8002	21,6	23,7
2	Цех приемки и подготовки сырьевых материалов	120	0,85	0,95	4,80	900	3,67	3,4
3	Цех помола золы	120	0,85	0,95	4,80	880	3,59	3,8
4	Цех производства сухих строительных смесей	120	0,85	0,95	4,80	280	1,14	2,31
5	Склад	120	0,6	0,95	4,10	1500	3,69	4,11
6	Административно–технический корпус	420	0,9	0,95	17,9	350	5,64	5,5
7	Освещение территории	4,5	0,6	0,95	6	-	3,60	3,57

3 Распределение электроэнергии

3.1 Схемы электроснабжения

Схема электроснабжения должна быть простой, удобной для монтажа и эксплуатации, иметь наименьшее число узлов и элементов схемы.

Схема главных электрических соединений.

В ПУЭ сказано, что питание потребителей I и II категории необходимо осуществлять от двух независимых взаиморезервируемых источников. В связи с этим построю схему электроснабжения, приведенную на рисунке 1.

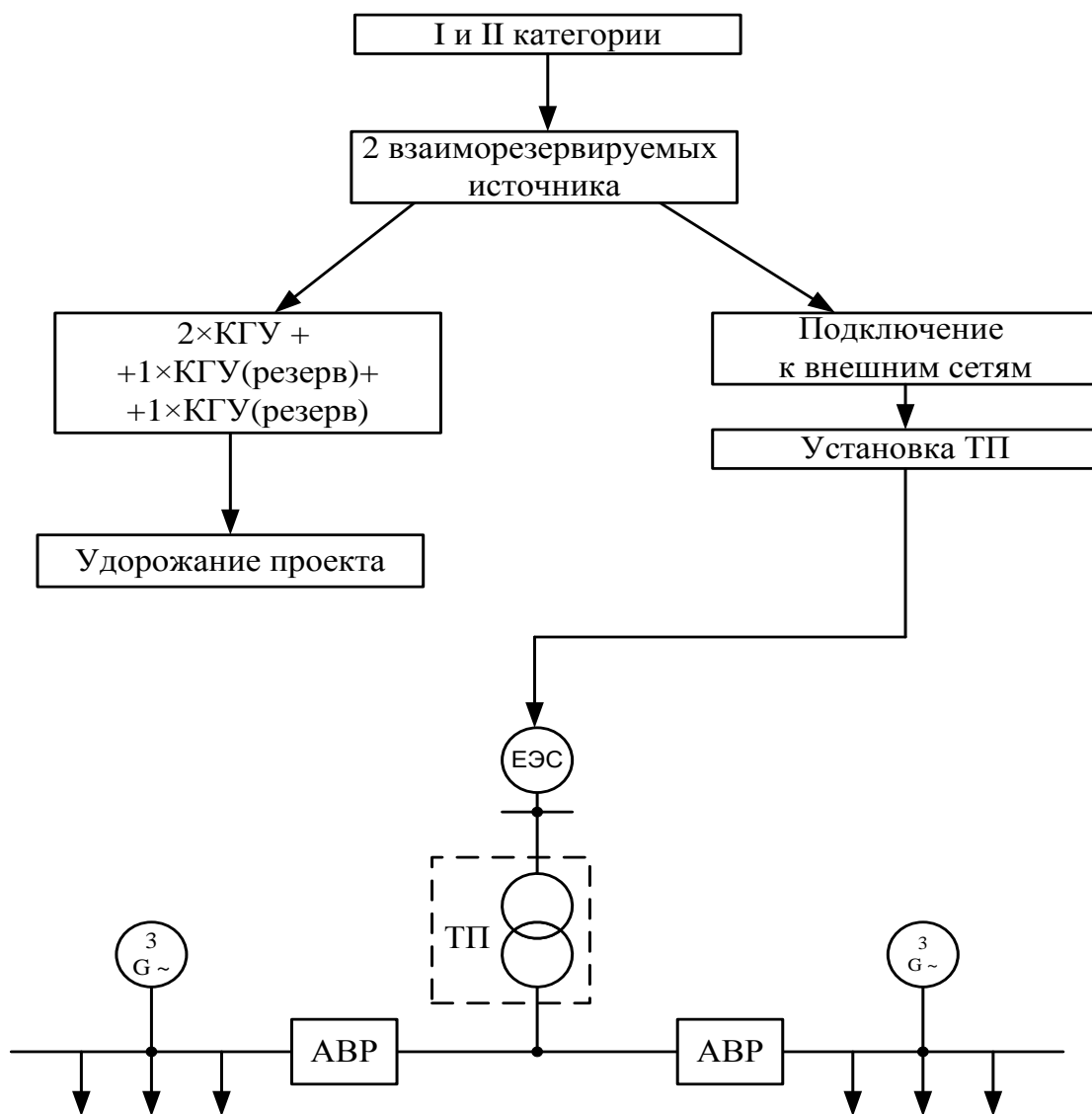


Рисунок 1 – Построение главной схемы электроснабжения

Внутрицеховые сети выполняют по смешанным схемам. Питание электроприемников рядом с генераторной будет осуществляться за счет установки магистрального шинпровода «ШМА 5», а питание других цехов с помощью кабельных линий.

Распределение нагрузки на генераторы.

Нагрузку между генераторами распределю так:

- генератор №1 – цех № 1, 5, 6,
- генератор №2 – цех № 2, 3, 4.

Получим, что нагрузка на генераторы составляет 1255 и 1261 кВ·А.

3.2 Выбор генераторных установок

Современной мировой промышленностью выпускается большое количество видов газопоршневых электростанций. Сегодня популярность газовых генераторов растет в геометрической прогрессии с каждым годом.

В данной работе используются когенерационные установки фирмы «Caterpillar». Мощность автономных источников определяется по выражению:

$$P_{a.и.} = \Sigma P_p + P_{рез},$$

где ΣP_p – максимальная расчетная мощность, кВт;

$P_{рез}$ – величина резервной мощности, кВт.

Величину резервной мощности принимаем равной 10 %, от максимальной нагрузки на генератор, такое значение выбрано из расчета подключения нагрузки собственных нужд и на некоторый запас учитывающий перспективу роста нагрузок

$$P_{a.и.} = 1037 + 0,1 \cdot 1037 = 1141 \text{ кВт.}$$

Принимаю к установке газопоршневую когенерационную электрогенераторную установку G3516B с генератором SR4B, номинальная мощность которого равна 1165 кВт .

3.3 Выбор трансформатора

Мощность трансформатора в ТП принимается из условий, что оба генератора одновременно отключиться не могут. Так как вероятность аварии при нормальных условиях крайне мала, но при поломке одного из генераторов, вероятность отказа второго более логична. Значит «наброс» нагрузки будет двухступенчатым.

Мощность трансформатора определится так:

$$S_{\text{т.ном.}} = \frac{S_{\text{max}} \cdot K_{12}}{1,4},$$

Коэффициент $K_{12} = 1$, из-за малой нагрузки потребителей III категории. А максимальная нагрузка $S_{\text{max}} = \Sigma S_{\text{H}} = 2515 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

$$S_{\text{т.ном.}} = \frac{2515 \cdot 100}{1,4} = 1796 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Приму к установке трансформатор типа ТМГ – 2500/10/0,4.

Таблица 3.1 – Паспортные данные трансформатора

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, кВ		ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{\text{кз}}$, кВт	$U_{\text{кз}}$, %	I_{xx} , %
		ВН	НН				
ТМГ - 2500	2500	10	0,4	2,5	26,5	6,0	1,1

Коэффициент загрузки найду по формуле:

$$K_3 = \frac{S_H}{S_{T.НОМ.}}$$

где $S_{T.НОМ.}$ – номинальная полная мощность трансформатора, кВ·А;
 S_H – расчетная нагрузка потребителей подключенная к генератору, кВ·А.

Так как нагрузка распределена равномерно между генераторами: 1255 кВ·А и 1261 кВ·А, для определения K_3 первой ступени примем $S_H = 1261$.

Тогда коэффициент загрузки будет равен:

– на первой ступени $K_3^I = \frac{1261}{2500} = 0,504$;

– на второй ступени $K_3^{II} = \frac{2515}{2500} = 1,01$.

Проверять выбранный трансформатор на перегрузку не имеет смысла, так как при резервировании обоих генераторов трансформатор будет работать в номинальном режиме.

3.4 Выбор сечения кабелей и шинопроводов

Внутри помещений будет проложен кабель марки ВВГнг-LS в кабельных коробах, а вне помещений и в земле выбираю кабель марки ВБбШв.

Для кабелей напряжением до 1 кВ сечение определяется по экономической плотности тока из выражения:

$$F = \frac{I_P}{J_{ЭК}}, \text{ мм}^2,$$

где $J_{ЭК}$ – нормированное значение плотности тока, А/мм².

Приведу расчет линии СП-1 на примере машины для кантования.

Исходные данные: $P_P = 32,4$ кВт, $Q_P = 23,1$ квар, $S_P = 39,8$ кВ·А,

$L = 59\text{ м}$, $I_p = 63\text{ А}$. Кабель проложен в коробе, с другими силовыми кабелями, при условии, что их не более 4 штук.

Тогда сечение кабеля будет равно:

$$F = \frac{63}{2,7} = 23 \text{ мм}^2,$$

приму сечение кабельной линии 25 мм^2 .

Проверю выбранный кабель по условию нагрева:

$$I_p \leq I_{\text{доп}} \cdot K_{\text{прокл}},$$

где $I_{\text{доп}}$ для данного сечения равен 115 А , а $K_{\text{прокл}} = 0,67$.

Тогда получится неравенство:

$$60,9 \leq 77,$$

следовательно, кабель проходит по условию нагрева.

Аналогичные расчеты по выбору кабеля для прочих электроприемников приведены в таблице 3.1.

Выбор шинпровода.

Шинпровод, питающий силовые пункты, установлю марки ШМА 5. Нагрузка шинпровода составляет $I_p = 1760\text{ А}$, тогда сечение шин определится по выражению:

$$F = \frac{1760}{1,0} = 1760 \text{ мм}^2,$$

Тогда шинпровод ШМА 5 установлю до 2500 А , с сечением фазных шин $F = 2240 \text{ мм}^2$.

Питание силовых пунктов осуществляется при помощи силовых кабелей через ответвительные секции без аппаратов коммутации.

Аналогично рассчитываются и другие цеха. Результаты расчетов отдельно стоящих цехов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Выбор электрических проводников

Наименование электропотребителей	S_p , кВ· А	Ip.к., А	$F_{э}$, мм ²	$F_{пр.}$, мм ²	кол- во	Idоп, А	I'до п А	L, км
Цех приемки и подготовки сырьевых материалов	498	751	1494	ШМА 5 1600 А (1380 мм ²)		1600	1600	0,095
Цех помола золы	489	743						
Цех производства сухих штукатурных смесей	269	425	154	150	1	435	435	0,085
Склад	19	29	11	10	1	90	90	0,05
Административно–технический корпус	74	113	42	50	1	145	116	0,21

Таблица 3.1 – Выбор кабелей для ЭП цеха № 1

КЛ	Ир.к., А	Fэ, мм ²	Fпр., мм ²	кол- во	Идоп, А	Гдоп А	L, км	Марка и сечение кабеля
СП-1	696	128	120	2	260	260	0,01	ВВГнг-LS 5×120
Транспортная тележка	33	12	16	1	75	75	0,021	ВВГнг-LS 5×16
Толкатель форм. Машина обработки формы. Машина для смазки форм. Рельсовая тележка.	60	22	25	1	95	64	0,023	ВВГнг-LS 5×25
Подающее устройство автоклавных поддонов	13	5	6	1	42	42	0,023	ВВГнг-LS 5×6
Дозирование и смешивание. Вибрационная пластина	336	65	120	2	520	348	0,056	ВВГнг-LS 5×120
Машина для кантования	61	23	25	1	95	95	0,032	ВВГнг-LS 5×25
Тележка. Боковой триммер. Машина резки по толщине	183	68	95	1	220	220	0,045	ВВГнг-LS 5×95
Вентиляция и дымоудаление	9	3	4	1	35	35	0,039	ВВГнг-LS 5×4
СП-2	459	85	95	2	274	274	0,035	ВВГнг-LS 5×95
Механизм подачи автоклавных тележек. Двери автоклава.	166	62	120	1	260	174	0,030	ВВГнг-LS 5×120
Машина поперечной резки	62	23	25	1	95	64	0,062	ВВГнг-LS 5×25
Механизм для удаления нижнего слоя	65	24	25	1	95	64	0,068	ВВГнг-LS 5×25
Погрузочная машина	68	25	25	1	95	95	0,025	ВВГнг-LS 5×25
Вентиляция	110	41	70	1	180	121	0,022	ВВГнг-LS 5×70
Управление автоклавом	3	1	2,5	1	25	25	0,045	ВВГнг-LS 5×2.5
СП-3	366	68	70	2	180	180	0,035	ВВГнг-LS 5×70
Укладочно-сортировочная машина	103	38	70	1	180	121	0,042	ВВГнг-LS 5×70
Система транспортировки пакетов. Прессовка пакетов.	90	33	50	1	145	97	0,048	ВВГнг-LS 5×50
Разделительная машина	109	40	50	1	145	145	0,047	ВВГнг-LS 5×50
Машина вытяжки	28	10	10	1	55	37	0,038	ВВГнг-LS 5×10
Вентиляция	6	2	2,5	1	25	17	0,030	ВВГнг-LS 5×2.5
Мастерские	25	9	10	1	55	37	0,042	ВВГнг-LS 5×10
СП-4	251	93	120	1	260	260	0,010	ВВГнг-LS 5×120
Паровой котел	137	51	95	1	220	147	0,049	ВВГнг-LS 5×95
Охладитель	86	32	50	1	145	97	0,060	ВВГнг-LS 5×50
Насосная технического водопровода	29	11	10	1	55	37	0,042	ВВГнг-LS 5×10

3.5 Выбор аппаратов защиты и коммутации

В качестве таких аппаратов приму автоматические выключатели серий ВА07, ВА88, ВА47-29. Их выбор произведу по номинальному току $I_{ном}$, а вводные автоматические выключатели для РП и отходящих присоединений в распределительном устройстве 0,4 кВ по максимально расчетному I_p . Автоматические выключатели должны проходить по условиям:

$$I_{н.расц} \geq I_{н.ЭП};$$

$$I_{н.расц} \geq I_p.$$

В таблицах 3.4 и 3.5 представлен выбор автоматических выключателей. Разъединитель выбирать не следует, так как такие выключатели устроены в «выдвижном» и «втычном» исполнении.

Таблица 3.4 – Выбор автоматических выключателей электроприемников

Наименование электроприемников	$P_{ном}/P_p$, кВт	$\cos\phi$	$I_{н.ЭП}/I_p$, А	Ток расц, А	Тип выключателя
СП – 1	372	0,78	696	800*	ВА88-40
Транспортная тележка	30	0,75	61	63	ВА88-33
Толкатель форм. Машина обработки формы. Машина для смазки форм. Рельсовая тележка.	31,1	0,75	62	63	ВА88-33
Подающее устройство автоклавных поддонов	10	0,75	20	25	ВА88-33
Дозирование и смешивание. Вибрационная пластина	185	0,8	351	400	ВА88-37
Машина для кантования	40	0,75	81	100	ВА88-33
Тележка. Боковой триммер. Машина резки по толщине	94,9	0,75	183	200	ВА88-35
Вентиляция и дымоудаление	4,97	0,85	9	10	ВА47-29
СП – 2	246	0,75	459	800*	ВА88-40
Механизм подачи автоклавных тележек. Передаточная вагонетка. Двери автоклава	86,1	0,75	166	200	ВА88-35
Машина поперечной резки	35	0,75	71	80	ВА88-32
Механизм для удаления нижнего слоя	42	0,75	85	100	ВА88-33
Погрузочная машина	57	0,75	115	125	ВА88-33
Вентиляция	56,8	0,75	110	125	ВА88-33
Управление автоклавом	2	1	3	4	ВА47-29
СП – 3	185	0,75	366	400*	ВА88-40
Укладочно-сортировочная машина	51,5	0,75	103	125	ВА88-33

Продолжение таблицы 3.4

Система транспортировки пакетов. Прессовка пакетов.	45,2	0,75	90	100	BA88-33
Разделительная машина	60	0,75	122	125	BA88-33
Машина вытяжки	25	0,75	51	63	BA88-33
Вентиляция	3,23	0,75	6,5	8	BA47-29
Мастерские	12,9	0,75	25	25	BA88-32
СП – 4	133	0,8	251	400*	BA88-37
Паровой котел	80	0,8	152	160	BA88-33
Охладитель	50	0,8	95	100	BA88-33
Насосная технического водопровода	14,6	0,8	29	32	BA88-32

* Выключатели с электронным расцепителем

Таблица 3.5 – Выбор выключателей отходящих присоединений РУ 0,4 кВ

Наименование отходящей линии	$S_p, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$I_p, \text{А}$	Ток расц, А	Тип выключателя
Цех по производству блоков из ячеистого бетона	1174	1772	2000*	BA07-220
Цех приемки и подготовки сырьевых материалов	494	751	1600*	BA88-216
Цех помола золы	489	743		
Цех по производству сухих строительных смесей	273	417	800*	BA88-40
Склад	15,1	23,0	25	BA88-33
Административно – технический корпус	70,2	107	125	BA88-33

* Выключатели с электронным расцепителем

4 Выбор основного электрооборудования РУ 0,4 кВ

Все токоведущие части, аппараты и механизмы должны выбираться по условиям длительной работы и проверяться по условиям короткого замыкания для стабильной и безотказной работы.

4.1 Выбор выключателей

Для всех выключателей самой сложной операцией является отключение токов короткого замыкания и включение на устойчивое КЗ.

Выключатели выбираю по условию:

$$U_{\text{ном.эл.}} \leq U_{\text{ном.а.}};$$

$$I_{\text{max}} \leq I_{\text{н.расц.}}$$

Цепь генератора.

В нормальном режиме максимальный ток принимается при загрузке генератора до номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ и при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi_{\text{ном}}$.

$$I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi};$$

$$I_{\text{max}} = \frac{1165}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 0,8} = 2102 \text{ А.}$$

Автоматические выключатели «IEK» ВА07–325 принимаются в качестве вводных для генераторов, имея номинальный ток отключения $I_{\text{н.расц.}} = 2500 \text{ А}$. Выключатели устроены в «выкатном» исполнении, и поэтому выбирать разъединители не стоит.

Цепь трансформатора.

Вводной выключатель для ТП выбираю по максимальному току нагрузки из выражения:

$$I_{\max} = I_{\text{раб.утяж}} = \frac{\Sigma S_{\text{H}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}},$$

$$I_{\max} = \frac{2548}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 3678 \text{ А.}$$

Приму к эксплуатации автоматический выключатель серии ВА07– 440, с номинальным током отключения $I_{\text{н.расц}} = 4000 \text{ А}$.

Секционные выключатели.

В роли секционных автоматических выключателей приму автоматы серии ВА07 – 325, с характеристикой $I_{\text{н.расц}} = 2500 \text{ А}$.

4.2 Выбор жестких шин

В закрытых распределительных устройствах 0,4 кВ ошиновка и сборные шины выполняют как алюминиевыми, так и медными шинами.

Эффективно эксплуатировать шины коробчатого сечения, из-за меньших потерь от эффекта близости и поверхностного эффекта, а также такие шины лучше охлаждаются.

Сборные шины и ошиновка в пределах распределительного устройства выбираются по допустимому току.

Условие выбора ошиновки в пределах распределительного устройства:

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп}},$$

Выбор сечения шин производится в таком порядке:

– В РУ генераторов: $I_{\text{ном.г}} = 2101$ ампер, тогда следует выбрать 2 шины (100×8), материал: алюминий, с $I_{\text{доп}} = 2390$ А;

– В РУ трансформаторной подстанции: $I_{\text{раб.утяж.}} = 3678$ ампер, тогда следует выбрать 2 шины (100×10), материал: медь, с $I_{\text{доп}} = 3610$ А.

В распределительном устройстве ТП принимаю решение об установке медных шин сечением 100×10, шины прямоугольного сечения марки АДЗ1Т и М1, так как шины коробчатого сечения не практикуются российскими производителями в низковольтных распределительных устройствах.

При отклонении температуры окружающей среды от +25 °С необходимо пересчитать допустимый ток $I_{\text{доп}}$ по выражению:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп.шин}} \cdot \sqrt{\frac{\theta_{\text{дл.доп}} - \theta_0}{\theta_{\text{дл.доп}} - \theta_{0\text{ норм}}}}, A,$$

Пересчитаю, приняв, что $\theta_0 = 23$ °С, тогда имеем:

– В РУ генераторов: $I_{\text{доп}} = 2390 \cdot \sqrt{\frac{70 - 23}{70 - 25}} = 2443 \text{ А} > I_{\text{ном.г}} = 2101 \text{ А}$.

– В РУ ТП: $I_{\text{доп}} = 3610 \cdot \sqrt{\frac{70 - 23}{70 - 25}} = 3689 \text{ А} > I_{\text{раб.утяж.}} = 3678 \text{ А}$.

Видно, что предварительно принятые шины в РУ проходят по условию допустимого тока.

Для соединения КГУ с РУ использую шинопровод «ШМА 5» при токе до 2500А. В качестве соединения трансформатора с распределительным устройством использую шинопровод «ШМА 68П» при токе до 4000А.

4.3 Выбор трансформаторов тока

Трансформаторы тока используются для питания измерительных приборов, и получения вторичного тока стандартной величины.

Контролировать режимы работы подстанции планируется при помощи контрольно-измерительных приборов, а именно: вольтметра, амперметра, счётчиков активной и реактивной энергии. Их установлю на каждом вводном устройстве. На трансформаторах тока 0,4 кВ устанавливаются: амперметр, счетчик электрической энергии. На рисунке 2 продемонстрирована схема включения приборов.

Приму аналоговый щитовой амперметр Э47, с классом точности 1,5 для измерения тока.

Введу в эксплуатацию аналоговый щитовой вольтметр «Э47 100» (до 600 В), с классом точности 1,5 для измерения напряжения.

Счетчик Меркурий 230 AR-01 R (счетчик активной и реактивной энергии), с классом точности 0,5S установлю для коммерческого и контрольного учета электроэнергии. Счетчики Меркурий 230 поддерживают как двух-, так и трехэлементное включение.

Выбираю трансформаторы тока «ТШЛ-0,66 У2» с заявленным классом точности 0,2S:

- В цепи генераторов: $I_{\text{ном.Г}} = 2101 \text{ A} \rightarrow 2500/5$;
- В цепи трансформатора: $I_{\text{раб.утяж.}} = 3678 \text{ A} \rightarrow 4000/5$.

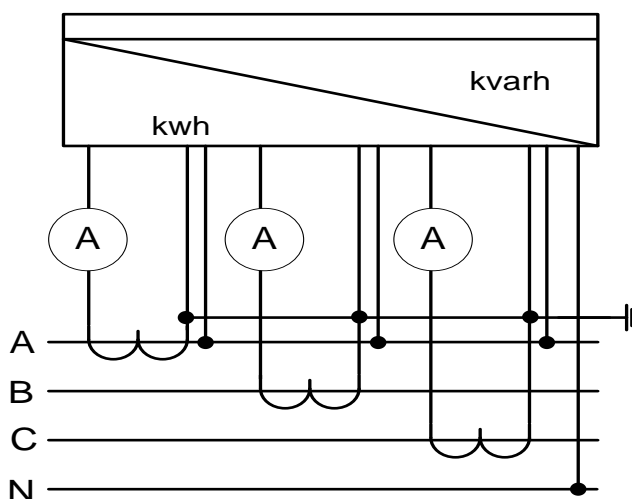


Рисунок 2 – Схема включения измерительных приборов

В таблице 4.1 приведена проверка трансформаторов тока по вторичной нагрузке, при использовании паспортных данных.

Таблица 4.1 – Вторичная нагрузка ТТ

Прибор	тип	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Амперметр	Э47	0,1	0,1	0,1
Счётчик электроэнергии	Меркурий 230 ART-01 R	2,5	2,5	2,5
Итого		2,6	2,6	2,6

Однотипные приборы устанавливаю в распределительном устройстве трансформаторной подстанции.

Проверка по вторичной нагрузке трансформаторов тока.

Сопротивление приборов:

$$R_{i \text{ дѐá}} = \frac{S_{i \text{ дѐá}}}{I_2^2};$$

$$R_{i \text{ дѐá}} = \frac{2,6}{5^2} = 0,104 \hat{I} \hat{i} .$$

Вторичная нагрузка трансформатора тока составляет 20 В·А то есть:

$$Z_{2\text{ном}} = \frac{S_{2\text{ном}}}{I_2^2};$$

$$Z_{2\text{ном}} = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ Ом.}$$

Сопротивление контактов принимаю равным 0,1, тогда сопротивление соединительных проводов найдется из выражения:

$$R_{\text{пр}} = Z_{2\text{н}} - R_{\text{приб}} - R_{\text{к}};$$

$$R_{\text{пр}} = 0,8 - 0,104 - 0,1 = 0,596 \text{ Ом.}$$

Сечение соединительных проводов:

$$q = \frac{\rho \cdot I_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}},$$

где ρ , для медных жил, = 0,0175, Ом·м/мм²;

$I_{\text{расч}}$, для соединения в звезду, = $\sqrt{3} \cdot I$;

$l = 5$ м.

$$q = \frac{0,0175 \cdot \sqrt{3} \cdot 5}{0,596} = 0,25 \text{ мм}^2.$$

По условию механической прочности приму провод ПВ-1 2,5мм², в распределительном устройстве ТП приму аналогичный проводник.

Для приема и распределения электроэнергии в РУ 0,4 кВ приму к эксплуатации низковольтное комплектное устройство (НКУ) «ЩО 09».

5 Расчет токов короткого замыкания

5.1 Расчет тока короткого замыкания в цепи генератора

Схема для расчета токов короткого замыкания показана на рисунке 3.

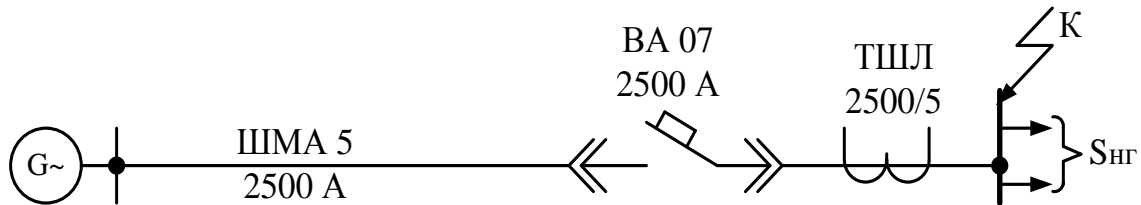


Рисунок 3 – Расчетная схема в цепи генератора

Величины для расчета приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения элементов схемы в цепи генератора

Генератор	Шинопровод ШМА 52500 А	Выключатель ВА 07 2500 А	Трансформа торы тока	Болтовые контактные соединения
$U_{НОМ.} = 400 \text{ В}$ $S_{НОМ} = 1456$ кВ·А $X_{d(НОМ)}'' = 0,15$ $r_{СТ} = 0,015 \cdot x_d$	$r_{Ш} = 0,018 \text{ мОм/м}$ $x_{Ш} = 0,009 \text{ мОм/м}$ $l = 5 \text{ м}$	$R_{КВ} = 0,14$ мОм $X_{КВ} = 0,07$ мОм	Свыше 500/5, сопротивлен ия не учитываются	$n = 15$ $r_{К} = 0,003 \text{ мОм}$

Схема замещения:

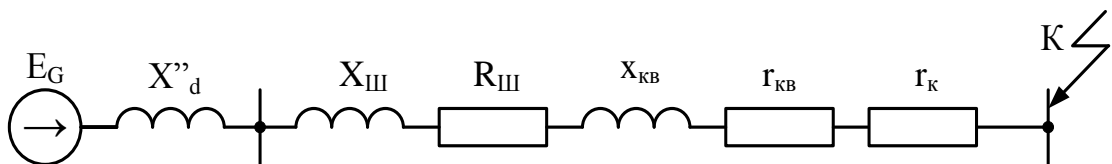


Рисунок 4 – Схема замещения

Расчет будет вестись в именованных единицах.

Определию основные параметры схемы замещения.

Сопротивление генератора:

$$x_d'' = X_{d(НОМ)}'' \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} ;$$

$$x_d'' = 0,15 \cdot \frac{0,4^2}{1,456} = 0,016 = 15,6 \text{ мОм};$$

$$r_{cm} = 0,015 \cdot 16,5 = 0,251 \text{ мОм}.$$

Сопротивление шинпровода:

$$R_{ш} = r_{ш} \cdot l, R_{ш} = 0,018 \cdot 5 = 0,08 \text{ Ом};$$

$$X_{ш} = x_{ш} \cdot l, X_{ш} = 0,009 \cdot 5 = 0,041 \text{ Ом}.$$

Сопротивление болтовых соединений:

$$R_K = r_K \cdot n, R_K = 0,0029 \cdot 12 = 0,034 \text{ Ом}.$$

Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания определю по выражению:

$$I_{nO} = \frac{E_G''}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}},$$

Приму условие, что КЗ металлическое.

Сопротивления найду по формулам:

$$R_{\Sigma} = r_{CT} + R_{TA} + R_{KB} + R_{ш} + R_K,$$

$$X_{\Sigma} = x_d'' + X_{TA} + R_{KB} + X_{ш},$$

Подставив данные, получим:

$$R_{\Sigma} = 0,251 + 0,085 + 0,14 + 0,034 = 0,51 \text{ мОм};$$

$$X_{\Sigma} = 15,6 + 0,07 + 0,041 = 15,7 \text{ мОм},$$

$$I_{нО} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,51^2 + 15,7^2}} = 13,9 \text{ кА}.$$

Расчет ударного тока КЗ.

Ударный ток трехфазного КЗ найду по выражению:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{нО} \cdot K_{уд},$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент, который определю так:

$$K_{уд} = \left(1 + e^{-\frac{t_{уд}}{T_a}} \right),$$

Далее расчет в следующем порядке:

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{\omega \cdot R_{\Sigma}};$$

$$t_{уд} = 0,001 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi_k}{\pi};$$

$$\varphi_k = \arctg(X_{\Sigma} / R_{\Sigma}).$$

Приму, что $t_{уд} = 0,01 \text{ с}$.

Далее следует рассчитать:

$$T_a = \frac{16,6}{314 \cdot 0,498} = 0,106 \text{ с};$$

$$K_{уд} = \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,106}} \right) = 1,91;$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 13,9 \cdot 1,91 = 37,5 \text{ кА}.$$

Учет сопротивления электрической дуги.

Значение активного сопротивления дуги в начальный момент действия короткого замыкания, определяю по формуле:

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{3 \cdot I_{\text{пО}}^2 \cdot K_c^2} - X_{\Sigma}^2 - R_{\Sigma}^2},$$

Коэффициент K_c найду по формуле:

$$K_c = 0,6 - 0,0025 \cdot Z_k + 0,114 \sqrt{Z_k} - 0,13 \sqrt[3]{Z_k},$$

Рассчитаю сопротивление электрической дуги по формуле:

$$K_c = 0,6 - 0,0025 \cdot 16,6 + 0,114 \cdot \sqrt{16,6} - 0,13 \cdot \sqrt[3]{16,6} = 0,691;$$

$$R_d = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 13,9^2 \cdot 0,691^2} - 16,6^2 - 0,498} = 16,9 \text{ мОм}.$$

Ток дугового замыкания определяю так:

$$I_{п0} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,498 + 16,9)^2 + 16,6^2}} = 9,6 \text{ кА};$$

$$T_a = \frac{16,6}{314 \cdot 17,4} = 0,003 \text{ с};$$

$$\varphi_k = \arctg(16,6/17,4) = 44;$$

$$t_{уд} = 0,001 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + 44}{\pi} = 0,015 \text{ с};$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 9,6 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,015}{0,003}} \right) = 13,7 \text{ кА}.$$

Расчет периодической составляющей тока КЗ для произвольного момента времени.

Расчет необходимо произвести для проверки защиты генераторов. Вестись он будет для трехфазного металлического КЗ на выводах генератора, при $t = \infty$.

$$I_{пт} = I_{п0(B)} \cdot \gamma_t,$$

$$I_{п0(B)} = \frac{E_G''}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{ст}^2 + x_d^2}};$$

$$I_{п0(B)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,248^2 + 16,5^2}} = 14 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ в цепи генератора приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значения расчетов токов короткого замыкания

Вид КЗ	Максимальные значения тока КЗ, кА		Минимальные значения тока КЗ, кА		
	$I_{п0}$	$i_{уд}$	$I_{п0}$	$I_{пт}(t = \infty)$	$i_{уд}$
$K^{(3)}$	13,9	37,5	9,6	5,88	13,7

5.2 Расчет тока короткого замыкания в цепи трансформатора

Схема для расчета тока короткого замыкания в цепи трансформатора показана на рисунке 5.

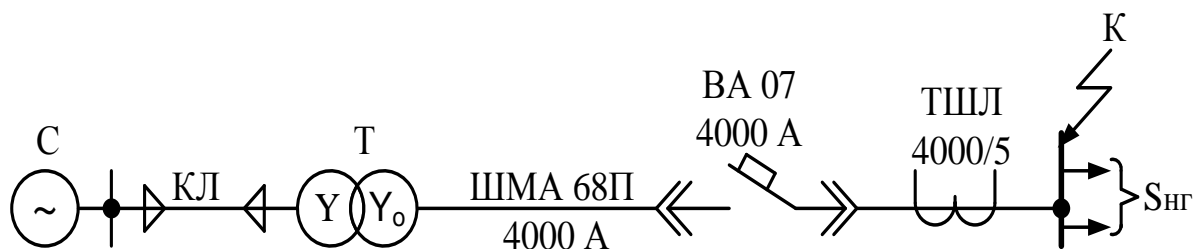


Рисунок 5 – Расчетная схема токов КЗ

Данные для расчета указаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Значения параметров элементов схемы цепи

Система	КЛ	Трансформатор ТМГ–2500/10	Шинопрово д ШМА 68П	Выключатель ВА 07 4000 А	Трансформаторы тока	Болтовые контактные соединения
$U_{ср.ВН} = 10,5$ кВ	$U_{ном} = 10$ кВ, $l = 2$ км*	$U_{ВН.ном.} = 10,5$ кВ $U_{НН.ном.} = 0,4$ кВ $S_{т.ном} = 2500$ кВ·А $\Delta P_{к.з.} = 26,5$ кВт $u_{к.з.} = 6 \%$	$r_{ш} = 0,014$ мОм/м $x_{ш} = 0,016$ мОм/м $l = 5$ м	$R_{кв} = 0,09$ мОм $X_{кв} = 0,06$ мОм	Свыше 500/5 $r_{та}$ не учитываются	$n = 12$ $r_k = 0,003$ мОм

Составлю схему замещения.

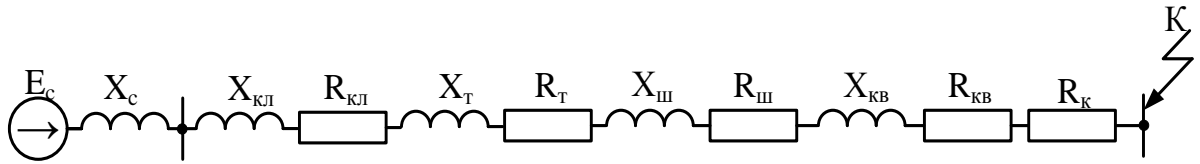


Рисунок 6 – Схема замещения элементов цепи трансформатора

Определяю параметры схемы замещения.

Сопротивление системы рассчитаю по выражению:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}} \cdot U_{\text{ср.ВН}}},$$

где – $I_{\text{откл.ном}} = 20$ кА.

Сопротивление системы получится равным:

$$X_c = \frac{400^2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10,5} = 0,44 \text{ МОм.}$$

Сопротивление кабельной линии: в качестве расчетного тока приму $I_{\text{раб.утяж.}} = 3233$ А. Получим, что при $T_m = 5800$ ч для кабелей с алюминиевыми жилами и пластмассовой изоляцией справедливо выражение:

$$F = \frac{3678 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)}{1,6} = 87 \text{ мм}^2,$$

приму сечение 90 мм^2 : $I_{\text{доп}} = 254$ А (при прокладке кабеля в земле), $r_{\text{уд.кб}} = 0,442 \text{ МОм/м}$, $x_{\text{уд.кб}} = 0,118 \text{ МОм/м}$. Сопротивление приведенное к стороне 400 вольт будет находится так:

$$R_{\text{кб}} = 0,442 \cdot 2000 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5}\right)^2 = 1,31 \text{ МОм};$$

$$X_{кб} = 0,118 \cdot 2000 \cdot \left(\frac{0,4}{10,5} \right)^2 = 0,38 \text{ мОм.}$$

Сопротивление трансформатора определю следующим образом:

$$R_T = \frac{\Delta P_{к.з.} \cdot U_{НН.НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}^2},$$

$$X_T = \sqrt{u_{к.з.}^2 - \left(\frac{100 \cdot \Delta P_{к.з.}}{S_{Т.НОМ}} \right)^2} \cdot \frac{U_{НН.НОМ}^2}{S_{Т.НОМ}} \cdot 10^4,$$

$$R_m = \frac{14,5 \cdot 0,4^2}{1600^2} \cdot 10^6 = 0,89 \text{ мОм};$$

$$X_m = \sqrt{6^2 - \left(\frac{100 \cdot 26,5}{2500} \right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{2500} \cdot 10^4 = 6,58 \text{ мОм.}$$

Сопротивление шинпровода:

$$R_{ш} = r_{ш} \cdot l, R_{ш} = 0,014 \cdot 5 = 0,07 \text{ Ом},$$

$$X_{ш} = x_{ш} \cdot l, X_{ш} = 0,016 \cdot 5 = 0,08 \text{ Ом.}$$

Сопротивление болтовых соединений равно:

$$R_K = r_K \cdot n, R_K = 0,003 \cdot 12 = 0,036 \text{ Ом.}$$

Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ.

$$R_{\Sigma} = 1,31 + 0,89 + 0,07 + 0,1 + 0,036 = 2,41 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma} = 0,44 + 0,38 + 6,58 + 0,08 + 0,05 = 7,53 \text{ Ом};$$

$$I_{no} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2,41^2 + 7,53^2}} = 29,4 \text{ кА.}$$

Расчет ударного тока.

$$T_a = \frac{7,49}{314 \cdot 2,41} = 0,01 \text{ с};$$

$$\varphi_k = \arctg(7,49 / 2,41) = 72;$$

$$t_{уд} = 0,001 \cdot \frac{\frac{3,14}{2} + 72}{3,14} = 0,023 \text{ с};$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 29,4 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,023}{0,01}} \right) = 45,7 \text{ кА.}$$

Учет сопротивления электрической дуги.

Сопротивление дуги рассчитаю аналогично пункту 5.1:

$$K_c = 0,6 - 0,0025 \cdot 7,87 + 0,114 \cdot \sqrt{7,87} - 0,13 \cdot \sqrt[3]{7,87} = 0,642;$$

$$R_d = \sqrt{\frac{400^2}{3 \cdot 29,4^2 \cdot 0,642^2} - 7,49^2} - 2,41 = 7,27 \text{ мОм.}$$

Получится, что ток трехфазного КЗ будет равен:

$$I_{по} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(2,41 + 7,27)^2 + 7,49^2}} = 18,9 \text{ кА};$$

$$T_a = \frac{7,49}{314 \cdot 9,68} = 0,003 \text{ с};$$

$$\varphi_k = \arctg(7,49/9,68) = 38;$$

$$t_{уд} = 0,001 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + 38}{\pi} = 0,013 \text{ с};$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 18,9 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,013}{0,003}} \right) = 27,1 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ в цепи трансформатора приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты расчетов токов короткого замыкания

Вид КЗ	Максимальные значения тока КЗ, кА		Минимальные значения тока КЗ, кА	
	$I_{пО}$	$i_{уд}$	$I_{пО}$	$i_{уд}$
$K^{(3)}$	29,4	45,7	18,9	27,1

6 Выбор релейной защиты и автоматики

6.1 Расчет защит силового трансформатора

Для трансформаторов, высокая сторона которых больше 6 кВ, необходимы следующие виды защит:

- Токовая отсечка без выдержки времени;
- Максимальная токовая защита;
- Максимальная токовая защита от перегрузки.

На трансформаторе ТМГ -2500/10/0,4 схема соединения: Y/Y_0-0 .

Максимальную нагрузку на трансформатор приму равной: $1,4 \cdot S_{\text{ном.т}}$.

Наибольшее время защит линий, отходящих от шин низкого напряжения трансформатора будет равно: $t_{\text{макс}} = 0,03\text{с}$.

В таблице 6.1 приведены токи короткого замыкания.

Таблица 6.1 – Токи короткого замыкания для расчета защит

ВН 10 кВ	НН 0,4 кВ	
$I_{\text{макс}}^{(3)} = 10,5 \text{ кА}; I_{\text{мин}}^{(3)} = 8,97 \text{ кА}$	$I_{\text{НН.МАХ}}^{(3)} = 29,4 \text{ кА}$	$I_{\text{НН.МИН}}^{(3)} = 18,9 \text{ кА}$

Максимальная защита и ТО выполнена на микропроцессорной базе устройства «SEPAМ Т-20»

«SEPAМ Т-20» - это терминал для использования в цепях простых защит, основанный на изменении тока или напряжения. Например: защита ВЛ с АПВ, защита вводов и фидеров подстанции от междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю, защита трансформаторов малой мощности от перегрузок, защита электродвигателей от внутренних повреждений и повреждений, зависящих от нагрузки с контролем режима пуска двигателя.

На таких цифровых терминалах уставки задаются в первичных величинах или в процентах от номинальных значений той или иной величины.

Исходная схема для расчета защит трансформатора показана на рисунке 7.

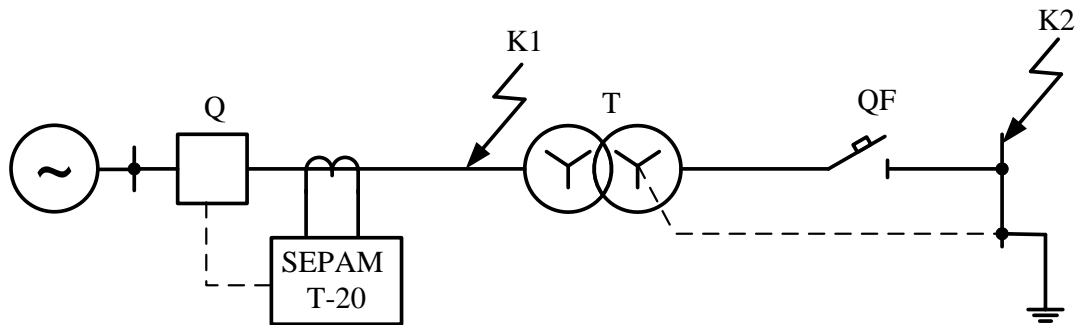


Рисунок 7 – Схема к расчету защит трансформатора

Расчет токовой отсечки.

Токовая отсечка от междуфазных КЗ на стороне 10 кВ.

Значение уставки токовой отсечки выбирается по выражению:

$$I_{т.о.} = I_K^{(3)} \cdot k_{отс},$$

где $I_K^{(3)}$ – величина тока КЗ на выводах обмотки 400 В, А.

$k_{отс}$ – коэффициент отстройки

Для цифровых терминалов «SEPAM» коэффициент отстройки равен 1,1.

$$I_{т.о.} = 18,9 \cdot \left(\frac{0,4}{10} \right) \cdot 1,1 \cdot 10^3 = 831,6 \text{ А.}$$

Защита не должна чувствовать бросок тока намагничивания:

$$I_{т.о.} = I_{ном.т.} \cdot k_{отс};$$

$$I_{т.о.} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \cdot 1,1 = 151,2 \text{ А.}$$

Выберу больший из токов, т.е. 831,6 А.

Найду ток двухфазного короткого замыкания по выражению:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{мин}}^{(3)};$$

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 8970 = 7768 \text{ А.}$$

Проверю $K_{\text{ч}}$ токовой отсечки:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_K^{(2)}}{I_{\text{т.о.}}} \geq 2;$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{7768}{831,6} = 9,3.$$

Получается, что защита чувствительна только при повреждениях на выводах и части обмотки высокого напряжения, следовательно, $t_{\text{т.о.}} = 0$ с.

Расчет максимальной токовой защиты.

МТЗ трансформатора находится со стороны вводов 10 кВ, однако, является и защитой ввода питания 0,4 кВ. При использовании цифровых терминалов «SEPAМ» защита выполняется с применением трансформаторов тока во всех трех фазах.

Защита отстраивается от наибольшего возможного тока нагрузки, с учётом токов самозапуска ЭД:

$$I_{\text{наг.ВН}}^{\text{max}} = \frac{S_{\text{нагр.макс.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.ВН}}};$$

$$I_{с.з.} = \frac{k_H \cdot k_{сзп}}{k_B} \cdot I_{наг.макс},$$

где $k_{сзп}$ – коэффициент самозапуска, приму равным 1,3.

$I_{наг.макс.}$ – максимальный ток нагрузки, А.

На терминале «SEPM T-20» значение $k_H = 1,1$, а $k_B = 0,94$.
Максимальная нагрузка будет равна суммарной расчетной нагрузке $\Sigma S_{расч} = 2548$ кВ·А.

$$I_{нагр.ВН}^{max} = \frac{2515}{\sqrt{3} \cdot 10} = 145,2 \text{ А};$$

$$I_{н.с.} = \frac{1,1 \cdot 1,3}{0,94} \cdot 145,2 = 222,1 \text{ А}.$$

Чувствительность проверю по $K_{ч}$ на стороне 400 В:

$$k_{ч} = \frac{I_{НН}^{(2)}}{I_{с.з.}} \geq 1,5,$$

где $I_{НН}^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания

$$k_{ч} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 18,9 \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right) \cdot 10^3}{222,1} = 2,95.$$

Получается, что защита окажется чувствительной.

Временной интервал срабатывания определю по выражению:

$$t_{МТЗ} = t_{ср.пред.} + \Delta t,$$

$$t_{\text{МТЗ}} = 0,03 + 0,3 = 0,33 \text{ с.}$$

Выдержка времени токовой защиты трансформатора: $t_{\text{т.о.}} = 0,33 \text{ с.}$

Расчет защиты от симметричных перегрузок трансформатора.

Защита от симметричных перегрузок действует на сигнал. Такая защита выполняется с помощью одной из ступеней МТЗ.

Ток срабатывания защиты от перегрузки находится по формуле:

$$I_{\text{сзп}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{ном.т}};$$

$$I_{\text{сзп}} = \frac{1,1}{0,935} \cdot 137 = 161,2 \text{ А.}$$

Время срабатывания защит от перегрузок должно превышать время срабатывания основных защит трансформатора, поэтому:

$$t_{\text{ПЕР}} = t_{\text{МТЗ}} + \Delta t;$$

$$t_{\text{ПЕР}} = 0,33 + 0,3 = 0,63 \text{ с.}$$

Из-за того, что защита от перегрузки воздействует на сигнал, то проверять чувствительность не следует. А выдержка по времени будет равной: $t_{\text{т.о.}} = 0,63 \text{ с.}$

6.2 Расчет защит генераторов

Данные генератора SR4B Caterpillar: номинальная мощность – 1170 кВт, номинальное напряжение – 0,4 кВ, коэффициент мощности = 0,8.

Защиту данного генератора выполню с помощью автоматического выключателя (рисунок 8).

Генератор работает в сети с глухозаземленной нейтралью, и защита от всех видов повреждений будет обеспечиваться с помощью автоматического

выключателя с максимальным расцепителем. Защита предусматривается в трехфазном исполнении, присоединяется к трансформатору тока, установленного на выводах генератора на стороне нейтрали. В таком генераторе, как и во всех генераторах мощностью более 1000 кВт должны быть устройства, осуществляющие автоматическое гашение поля.

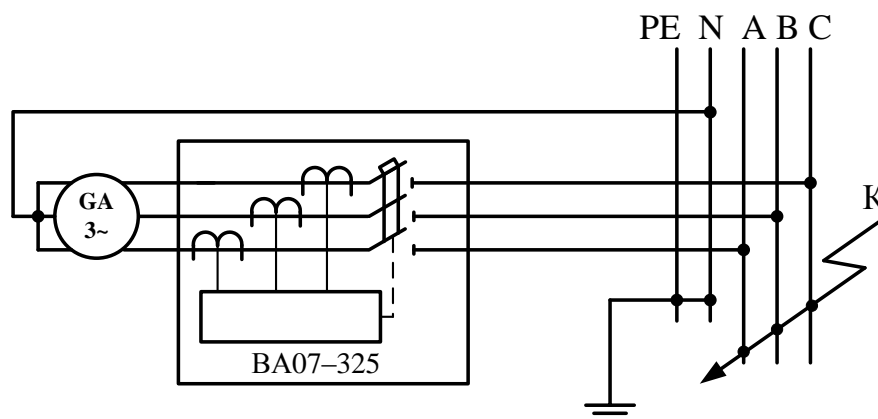


Рисунок 8 – Схема к расчету релейной защиты генератора

Автоматический выключатель ВА07 – 325, с $I_{\text{НОМ.В.}} = 2500$ А способен обеспечить работу защит, таких как:

- Максимальная токовая защита;
- Защита от перегрузки;
- Мгновенная токовая отсечка.

Токовая отсечка используется только для защиты генераторов, работающих параллельно друг другу или с сетью

Расчет максимальной токовой защиты генератора.

Ток уставки максимального расцепителя находится следующим образом:

$$I_{\text{ус.расц}} \geq (1,3 \div 1,6) \cdot I_{\text{Г.НОМ}};$$

$$I_{\text{ус.расц}} \geq 1,4 \cdot 2102 = 2943 \text{ А.}$$

По шкале уставок автоматического выключателя выберу ближайшую большую, т.е выберу $I_{\text{НОМ.В.}} \times 1,5$.

Значение тока уставки максимального расцепителя:

$$I_{\text{ус.расц}} = 1,5 \cdot I_{\text{ном.в.}} ;$$

$$I_{\text{ус.расц}} = 1,5 \cdot 2500 = 3750 \text{ А.}$$

Следовательно ток уставки приму равным $I_{\text{ус.расц}} = 3750 \text{ А.}$

Чувствительность МТЗ на выводах генератора определяю:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к. min}}^{(3)}}{I_{\text{уст.расц}}} \geq 1,5.$$

где $I_{\text{к. min}}^{(3)} = I_{\text{пт}}^{(3)} (t = \infty)$

$$k_{\text{ч}} = \frac{5880}{3750} = 1,57.$$

То есть защита будет чувствительна.

Для селективной работы требуется согласование защитной характеристики автоматического выключателя генератора с защитными характеристиками автоматического выключателя элементов внешней сети. При коротких замыканиях на этих элементах их защитные устройства срабатывают раньше, чем отработает автоматический выключатель защиты генератора. Поэтому необходимо отстроится от уставок автомата, защищаемого шинопровод в НКУ, так как он имеет аналогичную характеристику.

Время срабатывания определяется из формулы:

$$t_{\text{МТЗ}} = t_{\text{внеш.}} + \Delta t,$$

где $t_{\text{внеш.}}$ – временной интервал отключения присоединений, с;

$$\Delta t = 0,3 \text{ с.}$$

Время отключения отходящих присоединений будет равно:

$$t_{\text{МТЗ}} = 0,03 + 0,3 = 0,33 \text{ с.}$$

Выдержку времени ТО приму: $t_{\text{т.о.}} = 0,33 \text{ с.}$

Расчет защиты от перегрузки генератора.

Ток срабатывания защиты от перегрузки:

$$I_{\text{пер.}} \geq \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{НОМ.Г.}},$$

где $k_{\text{в}} = 0,95$, $k_{\text{н}} = 1,05$;

$$I_{\text{пер.}} \geq \frac{1,05}{0,95} \cdot 2102 = 2323 \text{ А.}$$

Выбираю ток уставки от перегрузки равный $I_{\text{НОМ.В.}} \times 1$.

Тогда ток будет иметь значение:

$$I_{\text{ус.расц}} = 1 \cdot I_{\text{НОМ.В.}};$$

$$I_{\text{пер.}} = 1 \cdot 2500 = 2500 \text{ А.}$$

Ток уставки от перегрузки будет принят $I_{\text{ус.расц}} = 2500 \text{ А.}$

Выдержка по времени с учетом степени селективности, отстроенного от максимальной токовой защиты генератора буде равно:

$$t_{\text{пер.}} = 0,33 + 0,3 = 0,63 \text{ с.}$$

7 Расчет заземления

Для предотвращения поражения персонала электрическим током в генераторной и ТП предусмотрю два связанных заземляющих устройства.

При выносной системе заземления защита человека производится только из-за малого сопротивления грунта, а оборудование находится вне поля растекания электрического тока.

Контур искусственного заземлителя будет иметь форму четырехугольника. Заземлитель будет выполнен из стальных электродов длиной 3 метра. Верхние концы этих электродов соединятся при помощи горизонтального электрода – стальной полосы 40·4 мм, зарытой в землю на 0,5 метра.

Таблица 7.1 – Данные для расчета заземления

Вид заземления	Выносное
Длина электрода (вертикального) l , м	3
Диаметр электрода (пруток), м	0,016
Глубина заложения h , м	0,48
Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м	48
Климатическая зона	II
Размеры горизонтального электрода $b \times c$, мм	40 × 4
Сопротивление заземляющего устройства $R_{з.у.}$, Ом	4

Расчет заземлителя (по допустимому сопротивлению).

1. Определяю значение сопротивления утеканию тока в землю:

$$R_3 = \frac{\rho \cdot K_c}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4t + 1}{4t - 1} \right),$$

$$t = h + 0,5 \cdot l$$

Получим, подставив данные:

$$t = 0,5 + 0,5 \cdot 3 = 2, \text{ м};$$

$$R_3 = \frac{50 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,016} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 33,6 \text{ Ом.}$$

2. Число заземлителей без учёта взаимного экранирования:

$$n' = \frac{R_3}{R_{3,y}};$$

$$n' = \frac{33,6}{4} = 8,4 \approx 8, \text{ шт.}$$

3. Число вертикальных электродов с учетом экранирования.

$$n = \frac{n'}{\eta_3},$$

Коэффициент экранирования приму при известном расстоянии между электродами (рисунок 9).

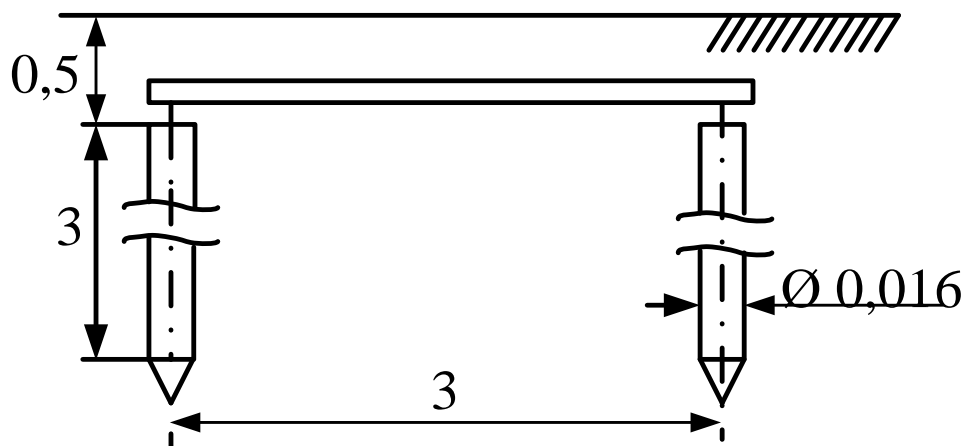


Рисунок 9 – Схема залегания вертикальных электродов в грунте

$$n = \frac{n'}{0,49} = \frac{8}{0,58} = 13,8 \approx 14 \text{ шт.}$$

4. Определяю длину полосы соединения:

$$l_{\Pi} = 1,05 \cdot n \cdot a;$$

$$l_{\Pi} = 1,05 \cdot 14 \cdot 3 = 44,1 \text{ м.}$$

5. Расчет полного значения сопротивления растекания тока с полосы:

$$R_{\Pi} = \frac{\rho \cdot K_c}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Pi}} \ln \frac{l_{\Pi}^2}{0,5 \cdot b \cdot h},$$

$$R_{\Pi} = \frac{50 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 44,1} \ln \frac{44,1^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,5} = 4,4 \text{ Ом.}$$

6. Рассчитаю полное значение сопротивления ЗУ:

$$R_{\text{зу}} = \frac{R_3 \cdot R_{\Pi}}{R_3 \cdot \eta_{\Pi} + R_{\Pi} \cdot \eta_3 \cdot n},$$

$$R_{\text{зу}} = \frac{33,6 \cdot 4,4}{33,6 \cdot 0,46 + 4,4 \cdot 0,58 \cdot 14} = 2,9 \text{ Ом.}$$

Полученное сопротивление меньше допустимого, поэтому рассчитанная система заземления сможет обеспечить защиту персонала, при выносной схеме расположения заземлителей.

Заключение

В работе было разработано электроснабжение промышленного предприятия. Наличие на заводе дорогого оборудования и сложных технологических линий побуждает к установке дополнительных источников электрической энергии, такими являются выбранные КГУ.

Электроснабжение предприятия осуществляется от когенерационных генераторных установок «Caterpillar» мощностью $P_{\text{ном}} = 1165$ кВт, с резервированием от внешней энергосистемы. В качестве резервного источника установлен трансформатор типа ТМГ – 1600/10/0,4.

В ВКР бакалавра были рассчитаны нагрузки по цехам завода, рассчитано рабочее искусственное освещение и определено месторасположение электрогенераторной. Были выбраны питающие кабельные линии для цеховых ЭП и аппараты защиты и управления.

Было выбрано необходимое электрооборудование. Для проверки на эксплуатационную пригодность выбранного оборудования в генераторной и трансформаторной подстанции были посчитаны токи короткого замыкания в цепях трансформатора и генератора. Питание от внешней электрической системы получили путем присоединения к подстанции «Заволжская 1» 110/10 кВ, ввиду её малой удаленности от планируемого размещения завода.

Для защиты генератора и его проводников были выбраны автоматические выключатели серии ВА07 от компании «IEK». Для защиты трансформатора были рассчитаны максимальная токовая защита, токовая отсечка и защита от перегрузки на базе микропроцессорного устройства «Seram T-20». А для кабельной линии будет установлена защита от замыканий на землю.

В работе также был проведён расчёт защитного заземления.

Список использованных источников

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., переработанное и дополненное - М.: Энергоатомиздат, 2005. - 640 с.
2. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин - Москва: Интермет Инжиниринг, 2007. - 359 с.
3. Проектирование системы электроснабжения промышленного предприятия. Ч.1. Методические указания к курсовому проектированию для студентов специальности «Электроснабжение» / сост. В. И. Мошкин, Н. С. Деркач, Т. А. Стрижова. - Курган: Издательство КГУ, 2005. - 34 с.
4. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. - М.: Форум, 2010. - 531 с.
5. Свод правил: СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение: нормативно-технический материал.- Москва, 2011. - 68 с.
6. Вагин, Г. Я. Системы электроснабжения : комплекс учеб.-метод. материалов. / Г. Я. Вагин, Е. Н. Соснина ; НГТУ. - Н. Новгород : [б.и.], 2006. – 91с. : ил. – Библиогр. : с. 90 - 91.
7. Руководящий документ: РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: нормативно-технический материал. – Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2002.
8. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.
9. Шабад, М.А. Защита генераторов малой и средней мощности. / М. А. Шабад - М.:НТФ Энергопресс, 2001. – 95 с.
10. Беркович, М. А. Автоматика энергосистем / М. А. Беркович, В. А. Гладышев, В. А. Семенов – Москва: Энергоатомиздат, 2007. – 238 с.

11. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы :СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях: нормативно-технический материал. - М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 38 с.

12. Строительные нормы и правила: СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция, кондиционирование: нормативно – технический материал. - ГОССТРОЙ России, 2004.

13. Ящура, А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования : справочник./ А. И. Ящура – М.: НЦ ЭНАС, 2005. – 503 с.

14. Software System for Finding the Incipient Faults in Power Transformers [Электронный ресурс] / Nikolina Petkova. – Режим доступа: <http://www.temjournal.com/content/42/01/temjournal4201.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

15. Current Transformers - Windings and Rated Insulation Levels [Электронный ресурс] / Jason Romerik. – Режим доступа: <http://www.studyelectrical.com/2014/06/current-transformers-primary-secondary-windings-ct.html>, свободный. - Загл. с экрана. – Яз. англ.

16. Predictive maintenance and modeling of Transformer [Электронный ресурс] / Ladani Dhaval., Sandeep Mehta, Pallav Gandhi. – Режим доступа: <http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-4/IJETT-V4I4P336.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

17. Electrical edition - Sulphur Hexaflouride (SF6) Circuit Breakers [Электронный ресурс] / Tomas Sharleth. – Режим доступа: <http://www.electricaledition.com/2015/09/sulphur-hexaflouride-sf6-circuit-breakers.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

18. Analysis of Power Transformer Insulation Design Using FEM [Электронный ресурс] / Tathagat Chakraborty, Akik Biswas, Roger Sudha. – Режим доступа:<http://www.ijscce.org/attachments/File/v2i3/C0673052312.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

19. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Издательство стандартов, 2008.

20. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии : учебное пособие/ А.А. Герасименко, В.Т.Федин. – М.: КНОРУС, 2012.

21. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп./ Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 608 с.

22. Макаров, Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ: в 6 т.: учеб. произв. издание Т. 4 / Е.Ф. Макаров. – М.: Папирус Про, 2006. – 637 с.