

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева
Кафедра «Энергетика»

Куржиди Богдан Николаевич

Трансформатор тока в устройствах релейной защиты

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

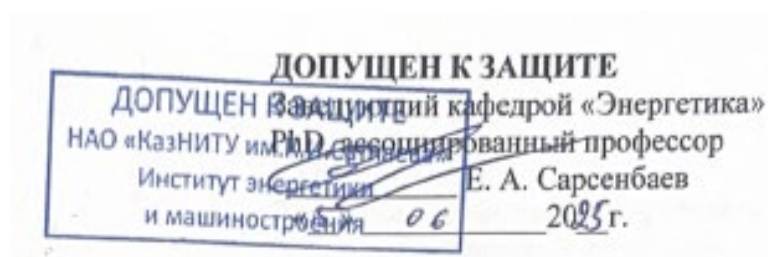
6B07101 - «Энергетика»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Трансформатор тока в устройствах релейной защиты»

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Куржиди Б.Н.

Рецензент

Главный энергетик ТОО «Консолид.
строит. горнорудная компания»

Е.А. Жолдыбеков

«18» мая 2025 г.

Научный руководитель

магистр, старший преподаватель

Р.Ш. Абитаева

«16» мая 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой «Энергетика»
PhD, ассоциированный профессор
Е. А. Сарсенбаев
«01» 01 2025г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Куржиди Богдан Николаевичу

Тема: Трансформатор тока в устройствах релейной защиты

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №2–п от "18"ноября 2024г.

Срок сдачи законченной работы «19» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: питание завода осуществлено от подстанции энергосистемы мощностью 650 МВА, на которой установлено 2 параллельно-работающих трансформатора мощностью по 63 МВА, напряжением 115/37/10,5 кВ, мощность КЗ на стороне 115 кВ, равна 1000 МВА.

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Выбор трансформатора тока для схем релейной защиты
- б) Схемы соединения трансформатора тока и реле
- в) Устройства релейной защиты от повреждения трансформаторов
- г) Виды погрешностей в трансформаторах тока
- д) Расчет погрешностей трансформатора тока

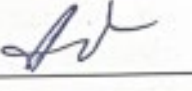
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
представлены 13 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из 14 наименований учебных материалов.

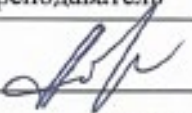
ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименование разделов, перечень рассматриваемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
Выбор трансформатора тока для схем релейной защиты	27.02.2025 г	—
Схемы соединения трансформатора тока и реле	5.03.2025 г	—
Устройства релейной защиты от повреждения трансформаторов	15.03.2025 г	—
Виды погрешностей в трансформаторах тока	25.03.2025 г	—
Расчет погрешностей трансформатора тока	5.04.2025 г	—
Расчет погрешностей трансформатора тока	19.05.2025 г	—

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	Р. Ш. Абитаева, магистр, старший преподаватель	19.05.2025	
Экономическая часть	Р. Ш. Абитаева, магистр, старший преподаватель	24.05.2025	
Нормоконтролер	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	26.05.2025	

Научный руководитель



Р. Ш. Абитаева

Задание принял к исполнению обучающийся



Б. Н. Куржиди

Дата

" 30 " 01 2025 г

АННОТАЦИЯ

В данной дипломной работе разработан проект системы электроснабжения механического завода с учетом технологических особенностей производственного процесса.

Произведен расчет электрических нагрузок завода, на шинах 0,4 кВ и 110 кВ, выбор числа и мощности трансформаторов. Сравнение двух вариантов внешнего электроснабжения 35 кВ и 110 кВ, по результатам которого выбран рациональный вариант на базе линии электропередачи 110 кВ. Произведен выбор силовых выключателей, кабелей, разъединителей, трансформаторов тока, трансформатора напряжения, трансформатора собственных нужд.

Отдельный раздел работы посвящён трансформаторам тока в устройствах релейной защиты: исследованы схемы подключения, области их применения, а также выполнен анализ точностных характеристик на примере трансформатора ТЛМ-10-1У3. Представленные расчёты и выводы обеспечивают надёжность и эффективность разработанной системы электроснабжения.

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста өндірістік процестің технологиялық ерекшеліктерін ескере отырып, механикалық зауыттың электрмен жабдықтау жүйесінің жобасы жасалды.

Зауыттың электрлік жүктемелері 0,4 кВ және 110 кВ шиналарында есептеліп, трансформаторлардың саны мен қуаты таңдалды. 35 кВ және 110 кВ кернеу деңгейіндегі екі сыртқы электрмен жабдықтау нұсқасы салыстырылып, нәтижесінде 110 кВ әуе желісі негізіндегі тиімді шешім таңдалды. Күштік ажыратқыштар, кабельдер, ажыратқыштар, ток трансформаторлары, кернеу трансформаторы және өзіндік қажетке арналған трансформатор таңдалды.

Жұмыстың жеке бөлімі релейлік қорғаныс құрылғыларында қолданылатын ток трансформаторларына арналған: қосылу сұлбалары мен қолдану салалары қарастырылып, ТЛМ-10-1У3 трансформаторы мысалында дәлдік сипаттамалары талданды. Келтірілген есептеулер мен қорытындылар әзірленген электрмен жабдықтау жүйесінің сенімділігі мен тиімділігін қамтамасыз етеді.

ANNOTATION

This thesis presents the design of a power supply system for a mechanical plant, taking into account the technological features of the production process.

The electrical loads of the plant were calculated at 0.4 kV and 110 kV busbars, and the number and capacity of transformers were determined. A comparison of two external power supply options—35 kV and 110 kV—was conducted, resulting in the selection of the optimal solution based on a 110 kV transmission line. Power circuit breakers, cables, disconnectors, current transformers, a voltage transformer, and an auxiliary transformer were selected.

A dedicated section of the thesis is devoted to current transformers in relay protection systems: connection schemes and their areas of application were examined, and an analysis of accuracy characteristics was carried out using the TLM-10-1U3 transformer as an example. The presented calculations and conclusions ensure the reliability and efficiency of the developed power supply system.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Основные сведения	7
1.1 Исходные данные по проектированию электроснабжения механического завода	7
1.2 Определение осветительной нагрузки по цехам	9
2 Расчет электрических нагрузок механического завода	11
2.1 Определение количества цеховых трансформаторов	11
2.2 Распределение нагрузок низкого напряжения по цеховым ТП	15
2.3 Окончательное распределение $Q_{\text{нбк}}$ по цеховым ТП	16
3 Оптимальный расчет электрических нагрузок на шинах 10 кВ	18
3.1 Расчет высоковольтных нагрузок по заводу	19
3.2 Расчет компенсации реактивной мощности выше 1 кВ	19
3.3 Расчет для составления картограммы нагрузок	24
4 Сравнение вариантов внешнего электроснабжения	26
4.1 Первый вариант электроснабжения ЛЭП 110 кВ	26
4.2 Второй вариант электроснабжения ЛЭП 35 кВ	34
5 Выбор оборудования и расчет токов КЗ на стороне 10 кВ	42
5.1 Расчет токов короткого замыкания	42
5.2 Выбор выключателей	43
5.3 Выбор сечений и типов силовых кабелей отходящих линий	45
6 Выбор трансформаторов тока	47
6.1 Выбор трансформаторов тока на вводах и на СВ	47
6.2 Выбор трансформаторов собственных нужд и ТН	50
6.3 Выбор шин ГПП	51
7 Специальный раздел. ТТ в устройствах релейной защиты	54
7.1 Выбор трансформатора тока для схем релейной защиты	54
7.2 Схемы соединения трансформаторов тока и реле	55
7.3 Устройства релейной защиты от повреждения трансформаторов	58
7.4 Виды погрешностей в трансформаторах тока	59
7.5 Расчет погрешностей трансформатора тока	60
Заключение	64
Список использованной литературы	65
Приложение А	66
Приложение Б	67

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетика — одна из важнейших отраслей промышленности, требующая высокой степени надежности, безопасности и стабильности в работе оборудования. Особую роль в обеспечении устойчивого функционирования энергосистем играют устройства релейной защиты, предназначенные для быстрого обнаружения и устранения аварийных режимов. Одним из ключевых элементов таких устройств являются трансформаторы тока, от характеристик и правильного выбора которых напрямую зависит корректность функционирования всей защитной схемы.

Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты выполняют задачу преобразования высоких рабочих токов до стандартных значений, пригодных для подачи на чувствительные элементы защитных и измерительных приборов. Их работа обеспечивает надёжную изоляцию релейных цепей от высоких напряжений и токов, а также точность срабатывания защит при коротких замыканиях, перегрузках и других нештатных ситуациях. При этом выбор типа трансформатора, его параметров и схемы подключения существенно влияет на эффективность защиты и может либо предотвратить аварию, либо, напротив, стать её причиной при ошибках проектирования.

Данная дипломная работа направлена на изучение трансформаторов тока в контексте их применения в устройствах релейной защиты. В работе рассматриваются вопросы выбора трансформаторов для различных защитных схем, типовые способы их подключения, особенности взаимодействия с реле, а также анализируются виды погрешностей, влияющих на точность и надёжность работы. Особое внимание уделено расчетам, определяющим соответствие трансформатора требованиям релейной защиты, а также практической проверке его характеристик на примере трансформатора ТЛМ-10-1УЗ, установленного на вводах к шинам первой и второй секции.

Актуальность выбранной темы обусловлена высокой значимостью точной и своевременной работы релейной защиты в современных энергосистемах, где каждая доля секунды задержки или искажения сигнала может повлечь за собой серьёзные последствия. Применение корректно подобранных трансформаторов тока способствует снижению риска аварий, улучшению надежности сети и увеличению срока службы оборудования.

1 Основные сведения

1.1 Исходные данные по проектированию электроснабжения механического завода

В данной дипломной работе, мы будем рассчитывать электропотребление механического завода с несколькими цехами, для проектирования электроснабжения, подбор электрооборудования и не только (конденсаторная установка, вакуумный выключатель, разъединитель, подбор проводов и кабелей, трансформатор тока, трансформатор напряжения, трансформатор собственных нужд). При этом мы будем делать проверки для каждого подобранного электрооборудования, проводов и кабелей. Представим генплан и заполним таблицу по электрическим нагрузкам, по каждой цеху.

Электрических нагрузки по цехам завода представлены в таблице 1.1. Генплан механического завода изображен на рисунке 1.1.

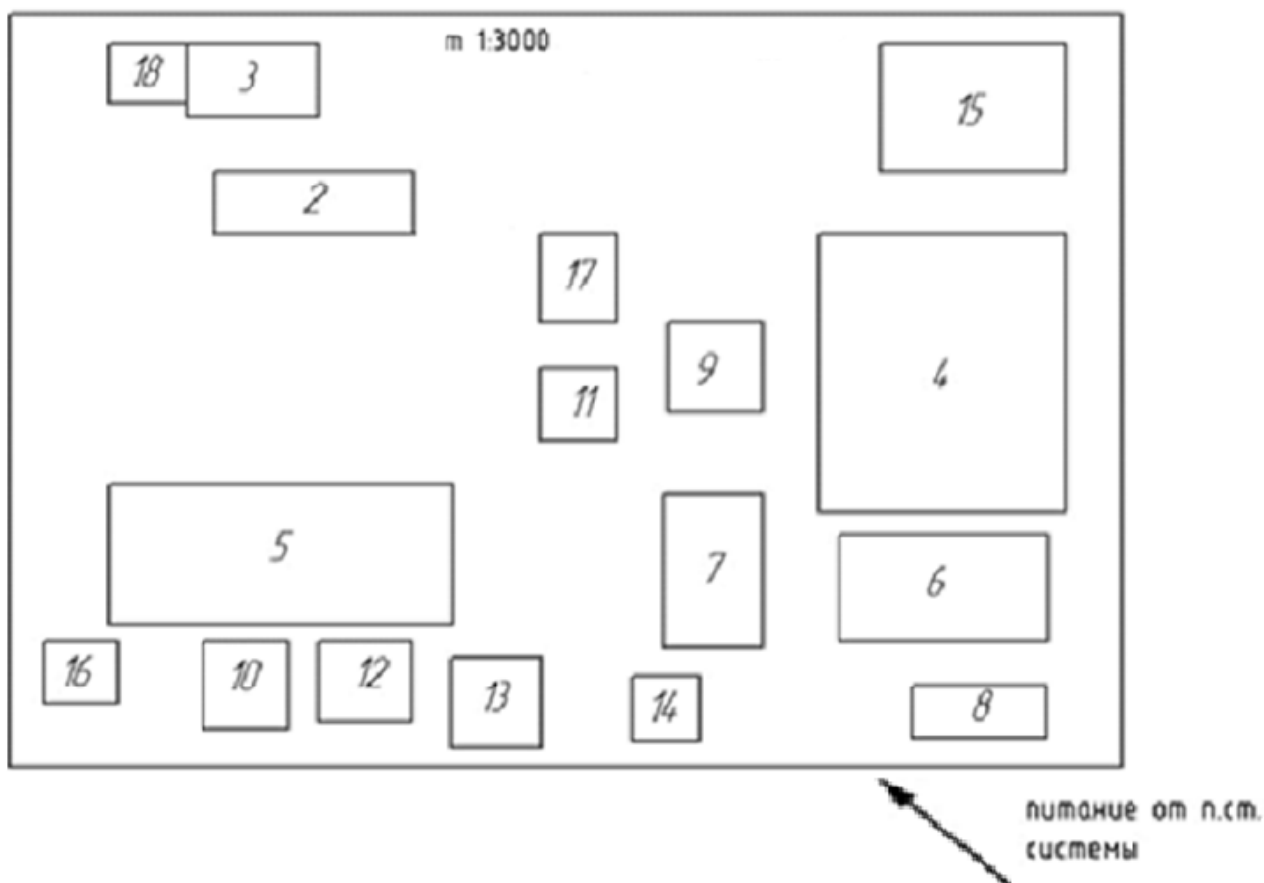


Рисунок 1.1. – Генплан механического завода

Таблица 1.1 – Электрические нагрузки по цехам завода

№ на плане	Наименование цеха	P _н , кВт	Кол-во ЭП	К _и	cosφ	tanφ
2	Бытовые помещения	600	20	0,3	0.5	1,7
3	Заводоуправление	800	25	0,5	0.6	1,3
4	Механический цех	600	125	0,7	0,8	0,8
5	Опытно-экспериментальный цех	1100	47	0,5	0,7	1,0
6	Цех сварки биметаллов	1100	70	0,7	0,8	0,8
7	Цех новых материалов	800	60	0,5	0,7	1,2
8	Блок складов	600	35	0,6	0,6	1,3
9	Открытый склад	75	3	0,3	0,4	2,3
10	Автокомпрессорная станция			-	-	-
	10кВ (СД)	2800	7	0,9	0,9	0,48
	0,38 кВ	900	15	0,7	0,8	0,75
11	Штамповочный цех	600	42	0,7	0,8	0,9
12	Очистные сооружения	2800	45	0,6	0,7	1,2
13	Насосная ст. обратного водоснабжения	300	15	0,7	0,7	1,0
14	Станция противопожарного водоснабжения	450	25	0,7	0,7	1,0
15	РМЦ	280	20	0,7	0,8	0,9
16	Градирня №1	290	38	0,7	0,7	1,0
17	Градирня №2	850	34	0,7	0,7	1,0
18	Столовая	150	20	0,3	0,5	1,7

1.2 Определение осветительной нагрузки по цехам

Расчетную осветительную нагрузку принимаем равной средней мощности освещения за наиболее загруженную смену и определяем в соответствии с формулами (1.1), (1.2):

$$P_{p0} = K_{c0} \cdot P_{y0}, \text{ кВт} \quad (1.1)$$

$$Q_{p0} = \text{tg}\varphi \cdot P_{p0}, \text{ кВар} \quad (1.2)$$

где K_{c0} – это коэффициент, отражающий спрос по активной мощности для осветительной нагрузки. Его численные значения берутся из таблиц, приведённых в источнике [2].

$\text{tg}\varphi$ – тангенс угла сдвига фаз между током и напряжением, характеризующий реактивную мощность. Он рассчитывается на основе известного значения косинуса угла φ ($\cos\varphi$) осветительной установки.

P_{y0} – установленная мощность осветительных приемников для конкретного помещения, такого как цех или отдел. Она определяется на основании удельной мощности освещения на один квадратный метр площади пола и общей площади производственного помещения.

$$P_{y0} = p_0 \cdot F, \text{ кВт} \quad (1.3)$$

где p_0 – удельная расчетная мощность измеряется в кВт/м².

F – площадь пола производственного помещения измеряется в м².

Удельная расчетная мощность зависит от рода помещений, по справочнику [2].

Расчет осветительной нагрузки предприятия проводится в таблице 1.2 в следующем порядке:

- на основе генерального плана предприятия производится измерение длины и ширины каждого производственного помещения и территории предприятия с учетом масштаба, данные переводятся в метры.

- площадь освещаемой поверхности для каждого производственного помещения определяется индивидуально. Площадь наружного освещения рассчитывается как разность между общей площадью территории предприятия и суммарной площадью производственных зданий.

- для каждого производственного помещения и территории предприятия подбирается p_0 осветительной нагрузки на один квадратный метр и определяется установленная мощность осветительных нагрузок из формулы (1.3).

- по таблице, в зависимости от типа освещаемого объекта, коэффициент спроса осветительной нагрузки, на основе которого по формуле (1.1) рассчитывается потребляемая осветительная нагрузка по каждому цеху.

Таблица 1.2 – Расчёт осветительной нагрузки по цехам механического завода

№ на плане	Наименование цеха	Осветительная нагрузка					
		$P_{уд},$ Вт/м ²	$F,$ м ²	$P_{н.ос},$ кВт	K_c	$P_{р.ос},$ кВт	$Q_{р.ос},$ кВар
2	Бытовые помещения	12	144 9	17,4	0, 3	5,2	1,3
3	Заводоуправление	15	114 7	17,2	0, 5	8,6	2,2
4	Механический цех	10	180 0	18	1	17,1	4,3
5	Опытно-экспериментальный цех	17	576 0	97,9	0, 8	78,3	19,6
6	Цех сварки биметаллов	19	270 0	51,3	1	48,7	12,2
7	Цех новых материалов	10	178 2	17,8	1	16,9	4,2
8	Блок складов	5	864	4,3	0, 6	2,6	0,6
9	Открытый склад	5	108 9	5,4	0, 6	3,3	0,8
10	Автокомпрессорная станция	13	990	12,9	0, 7	9,0	2,3
11	Штамповочный	16	729	11,7	1	11,1	2,8
12	Очистные сооружения	8	891	7,1	0, 7	5	1,2
13	Насосная ст. оборот. воднос	8	990	7,9	0, 7	5,5	1,4
14	Ст. противопож. водоснаб.	10	576	5,8	0, 5	2,9	0,72
15	РМЦ	15	283 5	42,5	0, 8	34	8,5
16	Градирня №1	5	504	2,5	0, 7	1,8	0,4
17	Градирня №2	5	810, 0	4,1	0, 7	2,8	0,7
18	Столовая	8	567, 0	4,5	0, 8	3,6	0,9
19	Территория	0,16	244 93	281,5	1	281,5	80
	Итого		499 76	631		563	160

2 Расчет электрических нагрузок механического завода

2.1 Определение количества цеховых трансформаторов

Расчет электрических нагрузок по механическому заводу занесем в таблицу 2.1.

Определим с учетом полной компенсации реактивной мощности на шинах 0,4 кВ минимальное количество цеховых трансформаторов по формуле (2.1):

$$N_{\min \text{ тр}} = \frac{P_{p0,4}}{K_3 \cdot S_{н.тр}} + \Delta N \quad (2.1)$$
$$N_{\min \text{ тр}} = \frac{9222,6}{0,8 \cdot 1600} + 0,4 = 7,6 \sim 8$$

где $P_{p0,4} = 9222,6$ кВт – по таблице 2.1;

$K_3 = 0,8$ – потому что, завод из второй категории потребителя;

Примем $S_{н.тр} = 1600$ кВА,

ΔN – дополнительное значение.

По справочным данным определим дополнительное число трансформаторов $m = 2$, отсюда, по формуле (2.2):

$$N_{\text{тр.эк}} = N_{\min.тр} + m \quad (2.2)$$
$$N_{\text{тр.эк}} = 8 + 2 = 10$$

Определим максимальную допустимую реактивную мощность, передаваемую через все 10 трансформаторов: по формуле (2.3):

$$Q_T = \sqrt{(N_{Т.Э} \cdot S_{н.Т} \cdot K_3)^2 - P_{p0,4}^2}, \text{ кВар} \quad (2.3)$$
$$Q_T = \sqrt{(10 \cdot 1600 \cdot 0,8)^2 - 9222,6^2} = 4449,8 \text{ кВар}$$

Отсюда определяем мощность $Q_{НБК}$ по формуле (2.4):

$$Q_{НБК1} = Q_{P0,4} - Q_T, \text{ кВар} \quad (2.4)$$
$$Q_{НБК1} = 8231,7 - 4449,8 = 3781,9 \text{ кВар}$$

Таблица 2.1 – Расчет силовых нагрузок механического завода на напряжение 0,4 кВ

Наименование цеха	Силовая нагрузка						Расчетная нагрузка					Суммарная нагрузка			С учетом осветительной нагрузки		
	P _н , кВт	Кол -во ЭП	P _н , кВт	K _и	cos φ	tan φ	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА	пэ	K _м	P, кВт	Q, кВа р	S, кВА	P _о , кВт	Q _о , кВа р	S _о , кВА
Бытовые помещения	600	20	5-70	0,3	0,5	1,73	180	311,8	360	17	1,3 2	237, 6	311, 8	392	242, 8	313, 1	396,2
Заводоуправлени е	800	25	5-70	0,5	0,6	1,33	400	533,3	666,7	23	1,3 8	552	533, 3	767, 6	560, 6	535, 5	775,3
Механический цех	600	125	1- 100 0	0,7	0,8	0,75	420	315	525	12	1,2	495, 6	315	587, 2	512, 7	319, 3	604
Опытно- экспериментальн ый цех	110 0	47	8-65	0,5	0,7	1,02	550	561,1	785,7	34	1,1 2	616	561, 1	833, 2	694, 3	580, 7	905,2
Цех сварки биметаллов	110 0	70	10- 100	0,7	0,8	0,75	770	577,5	962,5	22	1	770	577, 5	962, 5	818, 7	589, 7	1009
Цех новых материалов	800	60	10- 100	0,5	0,7	1,17	400	467,7	615,4	16	1	400	467, 7	615, 4	416, 9	471, 9	629,7
Блок складов	600	35	5-46	0,6	0,6	1,33	360	480	600	26	1,2 7	457, 2	480	662, 9	459, 8	480, 6	665,2
Открытый склад	75	3	1-65	0,3	0,4	2,29	22,5	51,6	56,3	2	2,7	60,8	56,7	83,1	64	57,5	86,1

Продолжение таблицы 2.1

Наименование цеха	Силовая нагрузка						Расчетная нагрузка					Суммарная нагрузка			С учетом осветительной нагрузки		
	P _н , кВт	Кол-во ЭП	P _н , кВт	К _и	cos φ	tan φ	P _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА	nэ	К _м	P, кВт	Q, кВар	S, кВА	P _о , кВт	Q _о , кВар	S _о , кВА
Автокомпрес. Станция																	
10кВ (СД)	2800	4	425	0,9	0,9	0,48	2520	1220,5	2800	4	1,08	2721,6	1342,5	3034,7	2721,6	1342,5	3034,7
0,38 кВ	900	15	15-33	0,7	0,8	0,75	630	472,5	787,5	15	1,15	724,5	472,5	865	724,5	472,5	865
Штамповочный цех	600	42	5-36	0,8	0,8	0,88	480	423,3	640	33	1,1	528	423,3	676,7	539,1	426,1	687,1
Очистные сооружения	2800	45	10-200	0,7	0,7	1,17	1960	2291,5	3015,4	28	1,05	2058	2291,5	3080	2063	2292,7	3084,2
Насосная ст. обратного водоснаб.	300	15	1-40	0,7	0,7	1,02	210	214,2	300	15	1,08	226,8	214,2	312,0	232,3	215,6	317
Станция противопож. водоснаб.	450	25	3-43	0,7	0,7	1,02	315	321,4	450	21	1,2	378	321,4	496,1	380,9	322,1	498,8
РМЦ	280	20	1-50	0,7	0,8	0,88	196	172,9	261,3	11	1,16	227,4	172,9	285,6	261,4	181,4	318,1
Градирня №1	290	38	1-50	0,7	0,7	1,02	203	207,1	290	12	1,13	229,4	207,1	309	231,2	207,5	310,7

Продолжение таблицы 2.1

Наименование цеха	Силовая нагрузка						Расчетная нагрузка					Суммарная нагрузка			С учетом осветительной нагрузки		
	Р _н , кВт	Кол-во ЭП	Р _н , кВт	К _и	cos φ	tan φ	Р _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА	η	К _м	Р, кВт	Q, кВар	S, кВА	Р _о , кВт	Q _о , кВар	S _о , кВА
Градирня №2	850	34	1-55	0,7	0,7	1,02	595	607	850	31	1,08	642,6	607	884	645,4	607,7	886,5
Столовая	150	20	1-20	0,3	0,5	1,73	45	77,9	90	15	1,24	55,8	77,9	95,9	59,4	78,8	98,7
Итого по 0,4												8659,6	8090,9	11851,2	9222,6	8231,7	12361,9
Итого по 10												2721,6	1342,5	3034,7	2721,6	1342,5	3034,7
Итого												11381,2	9433,5	14782,5	11944,2	9574,2	15307,8

Определим дополнительную мощность $Q_{\text{НБК2}}$ по условию потерь в соответствии с формулой (2.5):

$$Q_{\text{НБК2}} = Q_{\text{P0,4}} - Q_{\text{НБК1}} - \gamma \cdot N_{\text{Т.Э}} \cdot S_{\text{Н.Т}}, \text{кВар} \quad (2.5)$$

Расчетные коэффициенты K_1 и K_2 , а также коэффициент γ определим по справочным данным [1]. Коэффициент γ будет равен числу 0,2 [1].

Тогда $Q_{\text{НБК2}}$ будет равен по формуле (2.6):

$$Q_{\text{НБК2}} = 8231,7 - 3781,9 - 0,2 \cdot 10 \cdot 1600 = 1249,8 \text{ кВар} \quad (2.6)$$

При $Q_{\text{НБК2}} > 0$, принимается значение $Q_{\text{НБК2}} = 1249,8$, по формуле (2.7):

$$Q_{\text{НБК}\Sigma} = Q_{\text{НБК1}} + Q_{\text{НБК2}}, \text{кВар} \quad (2.7)$$

$$Q_{\text{НБК}\Sigma} = 3781,9 + 1249,8 = 5031,7 \text{ кВар}$$

Определим мощность $Q_{\text{НБК}}$ на один трансформатор (2.8):

$$Q_{\text{НБК}} = \frac{Q_{\text{НБК}\Sigma}}{N_{\text{тр.эк}}}, \text{кВар} \quad (2.8)$$

$$Q_{\text{НБК}} = \frac{5031,7}{10} = 503,17 \text{ кВар}$$

Выбираем к установке УКБН – 0,38 -600 [7].

2.2 Распределение нагрузок низкого напряжения по цеховым ТП

Рассчитаем коэффициент загрузки для ТП из формулы (2.9):

$$K'_3 = \frac{S_p}{n \cdot S_{\text{Н.ТР}}} \quad (2.9)$$

$$K_3 = \frac{12361,9}{10 \cdot 1600} = 0,77$$

где n – количество трансформаторов на ТП.

Некомпенсированную реактивную мощность на ТП определим из формулы (2.10):

$$Q_{\text{неском}} = Q_{\text{рТП}} + Q_{\text{фНБК ТП}}, \text{кВар} \quad (2.10)$$

Расчетные данные занесем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Распределение нагрузок низкого напряжения по цеховым ТП

№ТП, S _{н.тр} , Q _{нбк}	№ цехов	P _{р0,4} , кВт	Q _{р0,4} , кВар	S _{р0,4} , кВА	K _з
ТП1 ÷ ТП3	2	242,8	313,1	396,2	
(5x1600)	3	560,6	535,5	775,3	
S _н = 8000 кВА	4	512,7	319,3	604,0	
	7	416,9	471,9	629,7	
	8	459,8	480,6	665,1	
	9	64,0	57,5	86,0	
	11	2721,6	1342,5	3034,7	
	12	724,5	472,5	865,0	
Q _{нбк} = 5 x 600	осв. тер 1/2	281,5	80	292,6	
			-3000,0		
		5984,4	1072,9	6079,8	0,76
ТП4 ÷ ТП6	5	694,3	580,7	905,1	
(5x1600)	6	818,7	589,7	1009,0	
S _н = 8000 кВА	13	539,1	426,1	687,2	
	14	2063,0	2292,7	3084,2	
	15	232,3	215,6	316,9	
	16	380,9	322,1	498,8	
	17	261,4	181,4	318,2	
	18	231,2	207,5	310,7	
Q _{нбк} = 5 x 600	осв. тер 1/2	281,5	80	292,6	
			-3000,0		
		5502,4	1895,8	5819,8	0,73

2.3 Окончательное распределение Q_{нбк} по цеховым ТП

Распределим Q_{нбкΣ} = 5031,7 кВар (из пункта 2.1) на реактивные нагрузки ТП. Запишем выражение (2.11):

$$\frac{Q_{р0,4}}{Q_{нбк}} = \frac{Q_{рТП}}{Q_{нбк ТП}}, \text{ кВар} \quad (2.11)$$

Отсюда, получаем выражение для ТП1 ÷ ТП3 (2.12):

$$Q_{р нбк ТП1÷ТП3} = \frac{Q_{нбкΣ} \cdot Q_{р ТП1÷ТП3}}{Q_{р 0.4}}, \text{ кВар} \quad (2.12)$$

$$Q_{p \text{ НБК ТП1} \div \text{ТП3}} = \frac{5031,7 \cdot 4072,9}{8231,7} = 2489,59 \text{ кВар}$$

Тогда для ТП4 ÷ ТП6 запишем формулу (2.13):

$$Q_{p \text{ НБК ТП4} \div \text{ТП6}} = \frac{Q_{\text{НБК}\Sigma} \cdot Q_{p \text{ ТП4} \div \text{ТП6}}}{Q_{p 0.4}}, \text{ кВар} \quad (2.13)$$

$$Q_{p \text{ НБК ТП4} \div \text{ТП6}} = \frac{5031,7 \cdot 4895,8}{8231,7} = 2992,6 \text{ кВар}$$

Найдем $Q_{\text{нескомп}}$ для ТП1 ÷ ТП3 по формуле (2.14):

$$Q_{\text{нескомп ТП1} \div \text{ТП3}} = Q_{p \text{ ТП}} - Q_{\Phi}, \text{ кВар} \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{нескомп ТП1} \div \text{ТП3}} = 4072,9 - 3000 = 1072,9 \text{ кВар}$$

Найдем $Q_{\text{нескомп}}$ для ТП4 ÷ ТП6 по формуле (2.15):

$$Q_{\text{нескомп ТП4} \div \text{ТП6}} = Q_{p \text{ ТП}} - Q_{\Phi}, \text{ кВар} \quad (2.15)$$

$$Q_{\text{нескомп ТП4} \div \text{ТП6}} = 4895,8 - 3000 = 1895,8 \text{ кВар}$$

Расчетные значения сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Окончательное распределение $Q_{\text{НБК}}$ по ТП

№ТП	$Q_{p \text{ ТП}}, \text{ кВар}$	$Q_{p \text{ НБК}}, \text{ кВар}$	$Q_{\Phi \text{ НБК по ТП}}, \text{ кВар}$	$Q_{\text{нескомп}}, \text{ кВар}$
ТП1 ÷ ТП3	4072,9	2489,59	$5 \times 600 = 3000$	1072,9
ТП4 ÷ ТП6	4895,8	2992,6	$5 \times 600 = 3000$	1895,8

3 Оптимальный расчет электрических нагрузок на шинах 10 кВ

Низковольтную нагрузку 0,4 кВ приведем к шинам 10 кВ, сначала мы рассчитаем потери в цеховых трансформаторах.

Примем трансформатор ТМ-1600/10. Паспортные данные которого из [6]: $\Delta P_{x.x.} = 2,1$ кВт; $\Delta P_{кз.} = 16,5$ кВт; $i_{x.x.} = 1$ %; $u_{кз.} = 6$ %.

Произведем расчет потерь активной и реактивной мощностей в понижающем трансформаторе для СД 10 кВ. В соответствии с формулами (3.1) и (3.2):

$$\Delta P_{ТСД} = (\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot K_3^2) \cdot N, \text{ кВт} \quad (3.1)$$

$$\Delta P_{ТСД} = (2,1 + 16,5 \cdot 0,8^2) \cdot 4 = 50,64 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{ТСД} = \left(\frac{i_{x.x.}}{100} \cdot S_{н.т.} + \frac{U_{кз.}}{100} \cdot S_{н.т.} \cdot K_3^2 \right) \cdot N, \text{ кВар} \quad (3.2)$$

$$\Delta Q_{ТСД} = \left(\frac{1}{100} \cdot 1600 + \frac{6}{100} \cdot 1600 \cdot 0,8^2 \right) \cdot 4 = 309,8 \text{ кВар}$$

Расчет потерь активной и реактивной мощностей в ТП1÷ТП3 в соответствии с формулами (3.3) и (3.4) при $K_3 = 0,76$, $N = 5$. (из таблицы 2.2):

$$\Delta P_T = (P_{x.x.} + P_{кз} \cdot K_3) \cdot N, \text{ кВт} \quad (3.3)$$

$$\Delta P_T = (2,1 + 16,5 \cdot 0,76^2) \cdot 5 = 58,15 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{i_{x.x.}}{100} \cdot S + \frac{u_{кз.}}{100} \cdot S \cdot K_3^2 \right) \cdot N, \text{ кВар} \quad (3.4)$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{1}{100} \cdot 1600 + \frac{6}{100} \cdot 1600 \cdot 0,84^2 \right) \cdot 5 = 357,2 \text{ кВар}$$

Расчет потерь активной и реактивной мощностей в ТП4÷ТП6 по формулам (3.3), (3.4) при $K_3 = 0,73$, $N = 5$. (данные взяты из таблицы 2.2):

$$\Delta P_T = (2,1 + 16,5 \cdot 0,73^2) \cdot 5 = 54,46 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = \left(\frac{1}{100} \cdot 1600 + \frac{6}{100} \cdot 1600 \cdot 0,73^2 \right) \cdot 5 = 335,8 \text{ кВар}$$

Просуммированная мощность потерь в цеховых ТП рассчитаем по формулам (3.5), (3.6):

$$\sum \Delta P_T = \Delta P_{ТП1 \div ТП3} + \Delta P_{ТП4 \div ТП6} + \Delta P_{ТСД}, \text{ кВт} \quad (3.5)$$

$$\sum \Delta P_T = 58,15 + 54,46 + 50,64 = 163,2 \text{ кВт},$$

$$\sum \Delta Q_T = \Delta Q_{ТП1 \div ТП3} + \Delta Q_{ТП4 \div ТП6} + \Delta Q_{ТСД}, \text{ кВар} \quad (3.6)$$

$$\sum \Delta Q_T = 357,2 + 335,8 + 309,8 = 1002,8 \text{ кВар}.$$

3.1 Расчет высоковольтных нагрузок по заводу

Данные СД 10 кВ ($P_{РСД}$, $Q_{РСД}$): $P_{НСД} = 425 \text{ кВт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $\tan \varphi = 0,75$; $K_3 = 0,8$; $N = 4$.

Рассчитаем расчетную активную и реактивную мощности СД 10 кВ в соответствии с формулами (3.7) и (3.8):

$$P_{РСД} = P_{НСД} \cdot K_3 \cdot N_{СД}, \text{ кВт} \quad (3.7)$$

$$P_{РСД} = 425 \cdot 0,8 \cdot 4 = 1360 \text{ кВт},$$

$$Q_{РСД} = P_{РСД} \cdot \tan \varphi, \text{ кВар} \quad (3.8)$$

$$Q_{РСД} = 1360 \cdot 0,75 = 1020 \text{ кВар}$$

3.2 Расчет компенсации реактивной мощности выше 1 кВ

Изобразим расчетную схему для составления баланса реактивной мощности на рисунке 3.1.

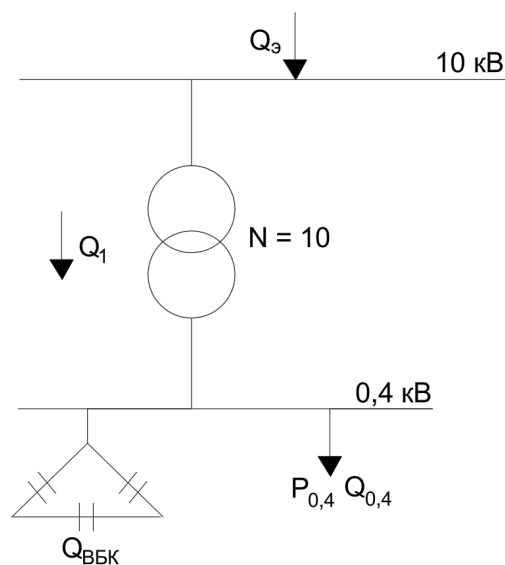


Рисунок 3.1 – Расчетная схема для составления баланса реактивной мощности

Составляется уравнение баланса реактивной мощности на шинах 10 кВ относительно $Q_{ВБК}$ по формуле (3.9):

$$Q_{ВБК} = Q_{p0,4} + \sum \Delta Q_T + Q_{РЕЗ} - Q_{Э} - \sum Q_{РСД} - Q_{НБКЭ}, \text{ кВар} \quad (3.9)$$

где $Q_{Э}$ - входная реактивная мощность устанавливается энергосистемой как наилучший с экономической точки зрения объем реактивной мощности, допустимый к передаче предприятию в часы максимальной загрузки энергосистемы. Расчет производится по соответствующей формуле (3.10):

$$Q_{Э} = 0,24 \cdot (P_{p0,4} + \sum \Delta P_T + P_{РСД} + \Delta P_{ТСД}), \text{ кВар} \quad (3.10)$$

$$Q_{Э} = 0,24 \cdot (9222,6 + 163,2 + 1360 + 50,64) = 2591,1 \text{ кВар}$$

$Q_{РЕЗ}$ – результирующая реактивная мощность, определяется по формуле (3.11):

$$Q_{РЕЗ} = 0,1 \cdot (Q_{p0,4} + \sum \Delta Q_T + \Delta Q_{ТСД} + Q_{РСД}), \text{ кВар} \quad (3.11)$$

$$Q_{РЕЗ} = 0,1 \cdot (8231,7 + 1002,8 + 309,8 + 1020) = 1056,4 \text{ кВар}$$

Отсюда:

$$Q_{ВБК} = 8231,7 + 1002,8 + 1056,4 - 2591,1 - 1020 - 5031,7 = 1648,1 \text{ кВар}$$

Выбираем по полученным результатам высоковольтные конденсаторные установки для компенсации реактивной мощности на шинах 10 кВ марки УКЛ-10,5-1000 УЗ количество 2 штуки [7]. Заполним таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Уточненный расчет силовых нагрузок по механическому заводу

№ТП	№ цехов	n	$P_{н.мин} - P_{н.макс}, \text{ кВт}$	$\Sigma P_n, \text{ кВт}$	$K_{и}$	Сред. Мощн		$n_э$	K_m	Расчетные нагрузки			K_z
						$P_{см}, \text{ кВт}$	$Q_{см}, \text{ кВар}$			$P_p, \text{ кВт}$	$Q_p, \text{ кВар}$	$S_p, \text{ кВА}$	
ТП1 ÷ ТПЗ	2	20	5-70	650	0, 3	195	337,75		1, 3	257,4	337,8	424,7	
(5x1600)	3	25	5-70	700	0, 5	350	466,67		1, 4	483,0	466,7	671,6	
	4	12 5	1-1000	2125	0, 7	1487,5	1115,63		1, 2	1785,0	1115, 6	2105, 0	
	7	60	10- 1000	1200	0, 5	600	701,48		1	600,0	701,5	923,1	
	8	35	5-46	665	0, 6	399	532		1, 3	506,7	532,0	734,7	
	9	3	1-65	45	0, 3	13,5	30,93		2, 7	36,5	30,9	47,8	
	11	42	5-36	630	0, 7	441	388,93		1, 1	485,1	388,9	621,8	
	12	45	10-200	1125	0, 6	675	789,16		1, 1	708,8	789,2	1060, 7	
Силовая		37 0		7410	0, 5	4350	4555,36	19 5	1, 3	4862,4	4362, 6	6532, 6	
Осветительная										563,0	160,0	585,3	
Освещение территории (1/2)										281,5	80,0	292,6	
ОНБК											-3000		

Продолжение таблицы 3.1

№ТП	№ цехов	п	Р _{н.мин} - Р _{н.макс} , кВт	ΣР _н , кВт	К _и	Сред. Мощн		п _э	К _м	Расчетные нагрузки			Кз
						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА	
Итого по ТП1÷ТП4										5706,9	1602,6	5927,7	0,74
ТП4÷ТП6	5	47	8-65	1222	0,5	611	623,34		1,1	684,3	623,3	925,7	
(5x1600)	6	70	10-100	1750	0,7	1225	918,75		1	1225,0	918,8	1531,3	
	13	15	1-40	270	0,7	189,0	192,8		1,1	204,1	192,8	280,8	
	14	25	3-43	475	0,7	332,5	339,22		1,2	399,0	339,2	523,7	
	15	20	1-50	460	0,7	322	283,98		1,2	373,5	284,0	469,2	
	16	38	1-50	836	0,7	585,2	597,02		1,1	661,3	597,0	890,9	
	17	34	1-55	782	0,7	547,4	558,46		1,1	591,2	558,5	813,3	
	18	20	1-20	220	0,5	110	190,53		1,2	136,4	190,5	234,3	
Силовая		254		5745	0,6	3733,1	3511,3	155	1,1	4274,8	3704,1	5656,4	
Осветительная										563,0	160,0		
Освещение территории (1/2)										281,5	80,0	292,6	
QHБK											-3000		

Продолжение таблицы 3.1

№ТП	№ цехов	n	Р _{н.ми-} Р _{н.макс} , кВт	ΣР _н , кВт	К _и	Сред. Мощн		n _э	К _м	Расчетные нагрузки			К _з
						Р _{см} , кВт	Q _{см} , кВар			Р _р , кВт	Q _р , кВар	S _р , кВА	
Итого по ТП4-ТП6										5119,3	944,1	5205,7	0,6 5
Итого 0,4 кВ										8659,6	8090, 9	11851, 2	
ΣΔР _т , ΣΔQ _т										163,2	1002, 8		
ΔР _{тсд} , ΔQ _{тсд}										50,6	309,8		
Итого 0,4 кВ к 10 кВ										8873,4	9403, 5		
Автокомпрессорная (СД 10 кВ)										2560,0	-1920		
ВБК											-2000		
Итого по заводу										11433, 4	5483, 5	12680, 4	

3.3 Расчет для составления картограммы нагрузок

Радиус окружности для расчета картограммы электрических нагрузок по формуле (3.12):

$$r_i = \sqrt{\frac{P_p}{\pi \cdot m}}, \text{ мм} \quad (3.12)$$

Для цеха с наибольшей активной мощностью P_p строим окружность, определяем радиус, находим масштаб по формуле (3.13):

$$m = \frac{P_p}{\pi \cdot r^2}, \text{ кВт/мм} \quad (3.13)$$

Угол сектора (доля осветительной нагрузки) найдем по формуле (3.14):

$$a = \frac{P_{po}}{P_p} \cdot 360 \quad (3.14)$$

Для высоковольтных нагрузок, то есть для цехов, в которых установлены силовые двигатели (СД), принимаем индивидуальный масштаб и вычисляем радиус окружности на картограмме. В приложении Б показывается картограмма электрических нагрузок механического завода. Данные представлены в таблице 3.2.

Для низковольтной нагрузки картограмма должна наглядно показывать долю осветительной нагрузки цеха, которую на картограмме нагрузок изображаем в виде сектора круга соответствующего цеха.

Таблица 3.2 – Расчёт для составления картограммы

№ на плане	Название цеха	Мощности		Радиусы нагрузок	
		$P_{p.ос}, \text{кВт}$	$P_p, \text{кВт}$	$r_i, \text{см}$	$a, ^\circ$
2	Бытовые помещения	242,8	5,2	2,68	7,71
3	Заводоуправление	560,6	8,6	4,07	5,52
4	Механический цех	512,7	17,1	3,89	12,01
5	Опытно-экспериментальный цех	694,3	78,3	4,52	40,60
6	Цех сварки биметаллов	818,7	48,7	4,91	21,41
7	Цех новых материалов	416,9	16,9	3,51	14,59
8	Блок складов	459,8	2,6	3,68	2,04
9	Открытый склад	64	3,3	1,37	18,56
11	Штамповочный цех	539,1	11,1	3,99	7,41
12	Очистные сооружения	2063	5	7,80	0,87
13	Насосная ст. обратного водоснабжения	232,3	5,5	2,62	8,52
14	Станция противопожарного водоснабжения	380,9	34	3,35	32,13
15	РМЦ	261,4	1,8	2,78	2,48
16	Градирня №1	231,2	2,8	2,61	4,36
17	Градирня №2	645,4	3,6	4,36	2,01
18	Столовая	59,4	3,6	1,32	21,82

4 Сравнение вариантов внешнего электроснабжения

Питание завода осуществлено от подстанции энергосистемы мощностью 650 МВА, на которой установлено 2 параллельно-работающих трансформатора мощностью по 63 МВА, напряжением 115/37/10,5 кВ.

Мощность КЗ на стороне 115 кВ составляет 1000 МВА. Расстояние от подстанции энергосистемы до предприятия – 13 км. Завод функционирует в две смены.

В целях технико-экономического обоснования целесообразности схемы электроснабжения предприятия будут рассмотрены два альтернативных варианта. По результатам анализа будет выбран наиболее рациональный – то есть экономически менее затратный и более выгодный для эксплуатации.

Первый вариант электроснабжения – ЛЭП 115 кВ;

Второй вариант электроснабжения – ЛЭП 37 кВ.

4.1 Первый вариант электроснабжения ЛЭП 110 кВ

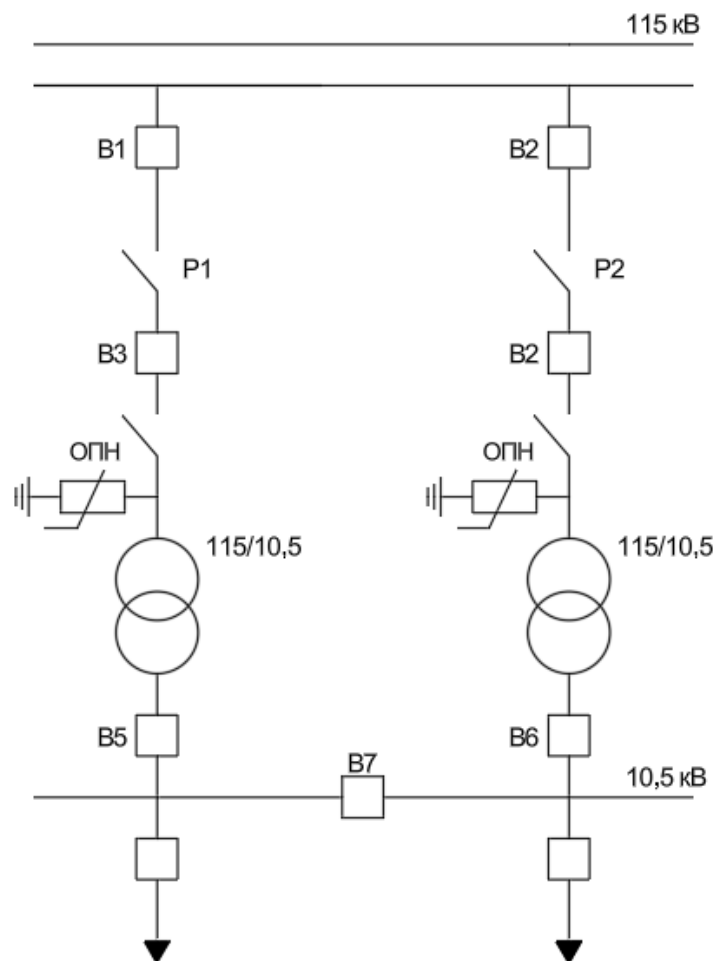


Рисунок 4.1 – Первый вариант схемы электроснабжения

Выбираем ЭП для первого варианта:

Принимаем трансформаторы ГПП.: ТДН – 10000/110 [8]. Паспортные данные: $U_{ВН} = 115$ кВ; $U_{НН} = 10,5$ кВ; $\Delta P_{xx} = 10$ кВт; $\Delta P_{кз} = 58$ кВт; $i_{xx} = 0,4$ %; $u_{кз} = 10,5$ %.

Определим полную расчетную мощность ГПП $S_{pГПП}$ по формуле (4.1):

$$S_{pГПП} = \sqrt{P_p^2 + Q_{\Sigma}^2}, \text{ кВА} \quad (4.1)$$

$$S_{pГПП} = \sqrt{11433,4^2 + 2591,1^2} = 11723,3 \text{ кВА}$$

P_p – из таблицы 3.1; Q_{Σ} – из пункта 3.2.

Вычислим коэффициент загрузки трансформаторов по формуле (4.2):

$$K_3 = \frac{S_{p.ГПП}}{2 \cdot S_{н.т.}} \quad (4.2)$$

$$K_3 = \frac{11723,3}{2 \cdot 10000} = 0,58$$

Определим потери активной и реактивной мощности в трансформаторах ГПП по формулам (4.3) и (4.4):

$$\Delta P_{тр.ГПП} = 2 \cdot (\Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot K_3^2), \text{ кВт} \quad (4.3)$$

$$\Delta P_{тр.ГПП} = 2 \cdot (10 + 58 \cdot 0,58^2) = 59 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{тр.ГПП} = 2 \cdot \left(\frac{i_{xx}}{100} \cdot S_{н.т.} + \frac{u_{кз}}{100} \cdot S_{н.т.} \cdot K_3^2 \right), \text{ кВар} \quad (4.4)$$

$$\Delta Q_{тр.ГПП} = 2 \cdot \left(\frac{0,4}{100} \cdot 10000 + \frac{10,5}{100} \cdot 10000 \cdot 0,58^2 \right) = 786,44 \text{ кВар}$$

Определим потери электрической энергии в трансформаторах ГПП по формуле (4.5):

$$\Delta W_{тр.ГПП} = 2 \cdot (\Delta P_{xx} \cdot T_{вкл} + \Delta P_{кз} \cdot \tau \cdot K_3^2), \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{тр.ГПП} &= 2 \cdot (10 \cdot 4000 + 58 \cdot 1574,8 \cdot 0,58^2) = \\ &= 141452,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

где $T_{\text{вкл}}$ – продолжительность включения оборудования в часах, для двухсменного режима работы $T_{\text{вкл}} = 4000$ ч

τ – число часов использования максимальных потерь, которое определяется в зависимости от продолжительности использования максимальной нагрузки по формуле (4.6):

$$T = \left(0,124 + \frac{T_{\text{м}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760, \text{ ч} \quad (4.6)$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{3000}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 1574,8 \text{ ч}$$

где $T_{\text{м}} = 3000$ ч – количество часов использования максимума.

Определим полную мощность, рабочий ток и аварийный ток, проходящих по ЛЭП 110 кВ в соответствии с формулами (4.7), (4.8), (4.9):

$$S_{\text{РЛЭП}} = \sqrt{(P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{тр.ГПП}})^2 + Q_{\text{э}}^2}, \text{ кВА} \quad (4.7)$$

$$S_{\text{РЛЭП}} = \sqrt{(11433,4 + 59)^2 + 2591,1^2} = 11780,8 \text{ кВА},$$

$$I_{\text{РЛЭП}} = \frac{S_{\text{ЛЭП}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}, \text{ А} \quad (4.8)$$

$$I_{\text{РЛЭП}} = \frac{11780,8}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 115} = 29,6 \text{ А},$$

$$I_{\text{ав}} = 2 \cdot I_{\text{РЛЭП}}, \text{ А} \quad (4.9)$$

$$I_{\text{ав}} = 2 \cdot 29,6 = 59,2 \text{ А}$$

Найдем сечение по экономической плотности тока по формуле (4.10):

Для определения $j_{\text{эк}}$ ссылаемся на справочные данные. Выберем экономическую плотность тока для алюминиевых проводников, данные из [9] при $T_{\text{м}} = 3000$ ч, тогда $j_{\text{эк}} = 1,3 \text{ А/мм}^2$.

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{I_{\text{РЛЭП}}}{j_{\text{ЭК}}}, \text{ мм}^2 \quad (4.10)$$

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{29,6}{1,3} = 22,76 \text{ мм}^2$$

Принимаем АС–70 с $I_{\text{доп}} = 165$ А. Удельное сопротивление $r_0=0,46$ мОм/м; $x_0=0,34$ мОм/м, по справочным данным [10].

Капитальные вложения в ЛЭП (одна цепная, стальные опоры): $K_{\text{ЛЭП}} = 2,5$ млн.тг/км.

Проведем проверку по пропускной способности: $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}} [165 \text{ А} > 29,6 \text{ А}]; 1,3 \cdot I_{\text{доп. ав.}} \geq I_{\text{ав}} [214,5 \text{ А} > 59,2 \text{ А}]$.

Определим потери электроэнергии в ЛЭП по формулам (4.11) и (4.12):

$$R_{\text{ЛЭП}} = r_0 \cdot l, \text{ Ом}, \quad (4.11)$$

$$R_{\text{ЛЭП}} = 0,46 \cdot 13 = 6 \text{ Ом},$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}} = 2 \cdot (3 \cdot I_{\text{рЛЭП}}^2 \cdot R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} \cdot \tau), \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (4.12)$$

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}} = 2 \cdot (3 \cdot 29,6^2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1574,8) = 49671,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

4.1.1 Расчет токов КЗ. ЛЭП 110 кВ

$S_6 = 1000$ МВА; $U_6 = 115$ кВт;

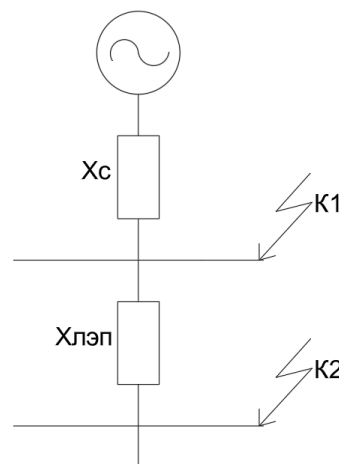


Рисунок 4.2 – Схема замещения для расчета токов КЗ в точках К1 и К2

Найдем базисный ток по формуле (4.13):

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}, \text{ кА} \quad (4.13)$$

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5 \text{ кА}$$

Определим сопротивление системы из формулы (4.14):

$$X_c = \frac{S_6}{S_{кз}}, \text{ о. е.} \quad (4.14)$$

$$X_c = \frac{1000}{1000} = 1 \text{ о. е.}$$

Определим трехфазный ток КЗ в точке К1 из формулы (4.15):

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{I_6}{X_c}, \text{ кА} \quad (4.15)$$

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{5}{1} = 5 \text{ кА}$$

Определим ударный ток в точке К1 из формулы (4.16):

$$I_{удк1} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{к1}^{(3)}, \text{ кА} \quad (4.16)$$

$$I_{удк1} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 5 = 12,69 \text{ кА}$$

Определим сопротивление ЛЭП из формулы (4.17):

$$X_{ЛЭП} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2}, \text{ о. е.} \quad (4.17)$$

$$X_{ЛЭП} = 0,35 \cdot 13 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,344 \text{ о. е.}$$

Определим трехфазный ток КЗ в точке К2 из формулы (4.18):

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{I_6}{X_c + X_{ЛЭП}}, \text{ кА} \quad (4.18)$$

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{5}{1 + 0,344} = 3,72 \text{ кА}$$

Определим ударный ток в точке К2 из формулы (4.19):

$$I_{удк2} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{к2}^{(3)}, \text{ кА} \quad (4.19)$$

$$I_{удк2} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 3,72 = 9,44 \text{ кА}$$

4.1.2 Выбор оборудования на 110 кВ

Выбор выключателей В1; В2.

Сделаем выбор выключателя типа ВГТ-110, стоимостью 8.5 млн. тг. Расчетный данные используем по ЛЭП 110 кВ.

Расчетные данные: $I_n = 29,6$ А, $I_{ав} = 59,2$ А, $I_{уд1} = 12,69$ кА; $I_{к1} = 5$ кА.

Паспортные параметры выключателя: $I_n = 2000$ А, $I_{отк} = 31,5$ кА, $I_{дин} = 80$ кА.

Проверим наш выбор по условиям: $U_n \geq U_{н.с.}$ [$110 \geq 110$ кВ]; $I_n \geq I_{авар.}$ [$630 \geq 59,2$ А]; $I_{дин.} \geq I_{уд. к1}$ [$52 \geq 12,69$ кА]; $I_{отк.} \geq I_{к1}$ [$20 \geq 5$ кА].

Выбор разъединителей Р1; Р2:

Сделаем выбор разъединителя типа: РНД(3) - 110/630Т1, стоимостью 175 тыс тг.

Расчетные данные: $I_{р.лэп} = 29,6$ А; $I_{ав.лэп} = 59,2$ А; $I_{к2} = 3,72$ кА; $I_{уд. к2} = 9,44$ кА.

Паспортные данные разъединителя: $I_n = 630$ А, $I_{дин} = 100$ кА, $I_{терм} = 40$ кА.

Проверим наш выбор по условиям: $U_{н.раз.} \geq U_{н.с.}$ [$110 \geq 110$ кВ]; $I_{н.сис.} \geq I_{авар.лэп}$ [$630 \geq 59,2$ А]; $I_{тер.} \geq I_{к2}$ [$40 \geq 3,72$ кА]; $I_{дин.} \geq I_{уд. к2}$ [$100 \geq 9,44$ кА].

Выбор выключателей В3 и В4:

Сделаем выбор выключателя типа ВГТ-110, стоимостью 8.5 млн. тг.

Расчетные данные: $I_{р.лэп} = 29,6$ А; $I_{ав.лэп} = 59,2$ А; $I_{уд1} = 12,69$ кА; $I_{к1} = 5$ кА.

Паспортные данные выключателя: $I_n = 2000$ А, $I_{отк} = 31,5$ кА, $I_{дин} = 80$ кА.

Так же выберем ограничители перенапряжения типа ОПН-110 УХЛ1. Стоимостью 115 тыс. тг.

4.1.3 Определение капитальных затрат на выбранное оборудование

Определим капитальные затраты на ЛЭП из формулы (4.20):

$$K_{ЛЭП110} = l \cdot K_{лэп}, \text{ млн. тг.} \quad (4.20)$$

$$K_{ЛЭП110} = 13 \cdot 2,5 = 32,5 \text{ млн. тг.}$$

Определим капитальные затраты на выключатели В1, В2 из формулы (4.21):

$$K_{В1,В2} = 2 \cdot K_{В}, \text{ млн. тг.} \quad (4.21)$$

$$K_{В1,В2} = 2 \cdot 8,5 \text{ млн. тг} = 17 \text{ млн. тг.}$$

Определим капитальные затраты на разъединители Р1 и Р2 из формулы (4.22):

$$K_{Р1,Р2} = 2 \cdot K_{Р}, \text{ млн. тг.} \quad (4.22)$$

$$K_{Р1,Р2} = 2 \cdot 175 = 0,35 \text{ млн. тг.}$$

Определим капитальные затраты на выключатели В3, В4 из формулы (4.21):

$$K_{В3,В4} = 2 \cdot K_{В}, \text{ млн. тг.} \quad (4.21)$$

$$K_{В3,В4} = 2 \cdot 8,5 \text{ млн. тг} = 17 \text{ млн. тг.}$$

Определим капитальные затраты на ограничители перенапряжения ОПН из формулы (4.23):

$$K_{ОПН1,2} = n \times K_{ОПН}, \text{ млн. тг.} \quad (4.23)$$

$$K_{ОПН1,2} = 2 \times 115 \text{ тыс. тг.} = 0,23 \text{ млн. тг.}$$

Определим капитальные затраты на трансформаторы (2 шт.) из формулы (4.24):

$$K_{тр.ГПП} = n \cdot K_{тр.} \text{ млн. тг.} \quad (4.24)$$

$$K_{тр.ГПП} = 2 \cdot 63 \text{ млн. тг} = 126 \text{ млн. тг.}$$

Определим суммарные капитальные вложения на оборудование из формулы (4.25):

$$\Sigma K = K_{тр.ГПП} + K_{ЛЭП110} + K_{В1,В2} + K_{Р1,Р2} + K_{В3,В4} + K_{ОПН1,2}, \text{ млн. тг.,} \quad (4.25)$$

$$\Sigma K = 126 + 32,5 + 17 + 0,35 + 17 + 0,23 = 193,08 \text{ млн. тг.}$$

Определение годовых издержек производства:

Расчет амортизационных издержек на ЛЭП из формулы (4.26):

$$U_a = E_a \cdot K_{ЛЭП}, \text{ млн. тг.,} \quad (4.26)$$

$$U_{алэп} = 0,028 \cdot 32,5 = 0,91 \text{ млн. тг.,}$$

$$U_{аобор} = 0,063 \cdot 160,58 = 10,11 \text{ млн. тг.}$$

где E_a – нормативный коэффициент капиталовложений (меняется от процента конкретной издержки) [3].

Расчет издержек на эксплуатацию из формулы (4.27):

$$U_a = E_э \cdot K, \text{ млн. тг.,} \quad (4.27)$$

$$U_{элэп} = 0,004 \cdot 32,5 = 0,13 \text{ млн. тг.,}$$

$$U_{\text{зобор}} = 0,03 \cdot 160,58 = 4,81 \text{ млн. тг.}$$

Расчет издержек на потерю электроэнергии из формулы (4.28):

$$U_{\pi} = C_0 \cdot (\Delta W_{\text{ТГПП}} + \Delta W_{\text{ЛЭП110}}), \text{ млн. тг.} \quad (4.28)$$

$$U_{\pi} = 3,52 \cdot (141452,4 + 49671,9) = 0,672 \text{ млн. тг.}$$

где C_0 - стоимость потерь электроэнергии, $C_0 = 3,52$ тг/кВт× ч.

Расчет суммарных издержек в соответствии с формулой (4.29):

$$\sum U = U_{\text{алэп}} + U_{\text{аобор}} + U_{\text{элэп}} + U_{\text{зобор}} + U_{\pi}, \text{ млн. тг.} \quad (4.29)$$

$$\sum U = 0,91 + 10,11 + 0,13 + 4,81 + 0,672 = 16,63 \text{ млн. тг.}$$

Расчет суммарных затрат по 1 варианту электроснабжения в соответствии с формулой (4.30):

$$Z_1 = E \cdot K + U, \text{ млн. тг.} \quad (4.30)$$

$$Z_1 = 0,15 \cdot 193,08 + 16,63 = 45,49 \text{ млн. тг.}$$

4.2 Второй вариант электроснабжения ЛЭП 35 кВ

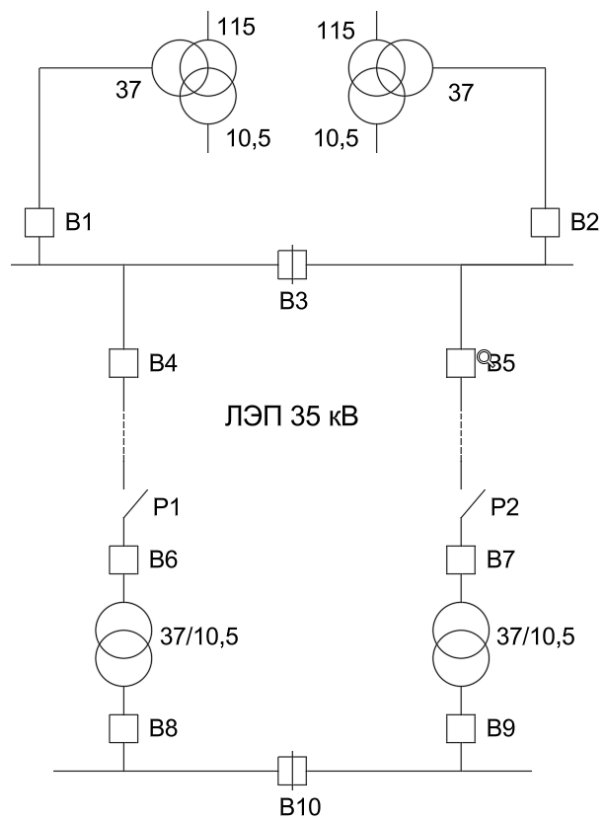


Рисунок 4.3 – Второй вариант электроснабжения

Определим мощность проходящей по ЛЭП 35 кВ:

Расчет полной мощности ЛЭП согласно формуле (4.7):

$$S_{\text{ЛЭП}} = \sqrt{(11433,4 + 57,36)^2 + 2591,1^2} = 11779,2 \text{ кВА}$$

Расчет рабочего тока согласно формуле (4.8):

$$I_{\text{ЛЭП}} = \frac{11779,2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 37} = 91,9 \text{ А}$$

Расчет аварийного тока согласно формуле (4.9):

$$I_{\text{ав}} = 2 \cdot 91,9 = 183,8 \text{ А}$$

Определим сечение по экономической плотности тока:

Расчет экономической плотности согласно формуле (4.10):

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{91,9}{1,3} = 70,7 \text{ мм}^2$$

Принимаем АС - 95 с $I_{\text{доп}} = 260 \text{ А}$. Удельное сопротивление $r_0 = 0,33 \text{ мОм/м}$; $x_0 = 0,33 \text{ мОм/м}$, по справочным данным [10]

Капитальные вложения в ЛЭП (одна цепная, стальные опоры): $K_{\text{ЛЭП}} = 2,5 \text{ млн. тг. /км}$

Проверим по пропускной способности: $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}} [260 \text{ А} > 91,9 \text{ А}]$; $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ав}} [260 \text{ А} > 183,8 \text{ А}]$; $1,3 \cdot I_{\text{доп. ав.}} \geq I_{\text{ав}} [338 \text{ А} > 183,8 \text{ А}]$.

Рассчитаем потери ЭЭ в ЛЭП:

Сопротивление ЛЭП согласно формуле (4.11)

$$R_{\text{ЛЭП}} = 0,33 \cdot 13 = 4,29 \text{ Ом}$$

Потери в ЛЭП согласно формуле (4.12):

$$\Delta W_{\text{ЛЭП}35} = 2 \cdot (3 \cdot 91,9^2 \cdot 4,29 \cdot 10^{-3} \cdot 1574,8) = 342345,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Определим полную расчетную мощность ГПП $S_{\text{трГПП}}$ из формулы (4.1):

$$S_{\text{трГПП}} = \sqrt{11433,4^2 + 2591,1^2} = 11723,3 \text{ кВА}$$

$P_{\text{р.зав}}$ и Q_3 берем для расчета из таблицы 3.1.

Выбираем два трансформатора мощностью 10000 кВА. Коэффициент загрузки согласно формуле (4.2):

$$K_3 = \frac{11723,3}{2 \cdot 10000} = 0,58$$

Принимаем 2 трансформатора $2 \times 10000 \text{ кВА}$, типа ТДНС-10000/35 [11].

Паспортные данные трансформатора: $U_{\text{ВН}} = 37 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ}$; $\Delta P_{\text{xx}} = 8,5 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{кз}} = 60 \text{ кВт}$; $i_{\text{xx}} = 0,3 \%$; $u_{\text{кз}} = 8 \%$.

Капитальные вложения в 1 трансформатор 60 млн.тг.

Расчет потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах ГПП согласно формулам (4.3) и (4.4):

$$\Delta P_{\text{тр.ГПП}} = 2 \cdot (8,5 + 60 \cdot 0,58^2) = 57,36 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{\text{тр.ГПП}} = 2 \cdot \left(\frac{0,3}{100} \cdot 10000 + \frac{8}{100} \cdot 10000 \cdot 0,58^2 \right) = 598,24 \text{ кВар}$$

Расчет потерь электрической энергии в трансформаторах ГПП согласно формуле (4.5):

$$\Delta W_{\text{тр.ГПП}} = 2 \times (8,5 \times 4000 + 60 \times 1574,8 \times 0,58^2) = 131571,5 \text{ кВт} \times \text{ч}$$

Выберем трансформаторы энергосистемы:

Примем два трансформатора типа ТДТН-63000/110/35/10,5. Паспортные данные трансформаторов:

$U_{\text{ВН}} = 115 \text{ кВ}$; $U_{\text{СН}} = 37 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН}} = 10,5 \text{ кВ}$; $\Delta P_{\text{xx}} = 53 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{кз}} = 290 \text{ кВт}$; $i_{\text{xx}} = 0,55 \%$; $u_{\text{кВ-Н}} = 18 \%$; $u_{\text{кС-Н}} = 7 \%$; $u_{\text{кВ-С}} = 10,5 \%$.

Капитальные вложения для одного трансформатор – 65 млн. тг.

Определим коэффициент долевого участия завода тяжелого машиностроения в мощности трансформаторов энергосистемы из формулы (4.31):

$$\gamma_{31} = \frac{S_{\text{ргпп}}}{2 \cdot S_{\text{н.т.}}} \quad (4.31)$$

$$\gamma_{31} = \frac{11723,3}{2 \cdot 63000} = 0,09$$

Определим потери ЭЭ в трансформаторах энергосистемы из формулы (4.32):

$$\Delta W_{\text{тр.ЭС}} = 2 \cdot (\Delta P_{\text{xx}} \cdot T_{\text{вкл}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot \tau \cdot \gamma_1^2), \text{ кВт} \times \text{ч} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{тр.ЭС}} &= 2 \cdot (53 \cdot 4000 + 290 \cdot 1574,8 \cdot 0,09^2) = \\ &= 431400 \text{ кВт} \times \text{ч} \end{aligned}$$

Долевым участием в потерях ΔP и ΔQ в трансформаторах энергосистемы не учитываем.

4.2.1 Расчет токов КЗ ЛЭП 35 кВ

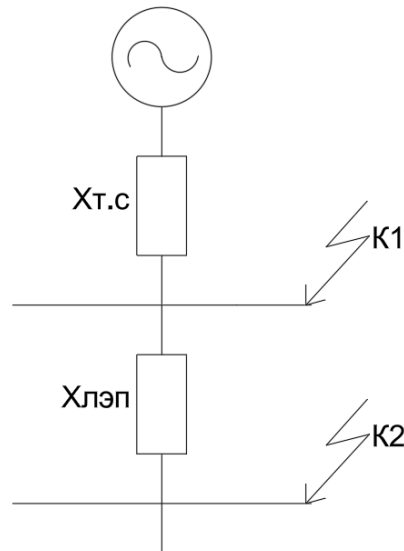


Рисунок 4.4 – Схема замещения для расчета токов КЗ в точках К1 и К2

$S_6 = 1000$ МВА; $U_6 = 37$ кВ.

Рассчитаем базисный ток согласно формуле (4.13)

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 15,6 \text{ кА}$$

Определим сопротивление трансформатора согласно формуле (4.14):

$$X_{\text{тр гпп}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,6 \text{ о. е.}$$

Определим трехфазный ток КЗ в точке К1 из формулы (4.15):

$$I_{\text{к1}}^{(3)} = \frac{15,6}{1,6} = 9,75 \text{ кА}$$

Расчет ударного тока в точке К1 согласно формуле (4.16)

$$I_{\text{удк1}} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 9,75 = 24,74 \text{ кА}$$

Расчет индуктивного сопротивления согласно формуле (4.17)

$$X_{\text{лэп}} = 0,33 \cdot 13 \cdot \frac{1000}{37^2} = 3,13 \text{ о. е.}$$

Расчет тока КЗ в точке К2 согласно формуле (4.18)

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{15,6}{1,6 + 3,13} = \frac{15,6}{4,73} = 3,29 \text{ кА}$$

Расчет ударного тока согласно формуле (4.19)

$$I_{удк2} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 3,29 = 8,35 \text{ кА}$$

4.2.2 Выбор оборудования на 35 кВ

Выключатели В1, В2, В4, В5, В6, В7:

Расчет рабочего тока согласно формуле (4.13) и расчет аварийного тока (4.9)

$$I_{p \text{ В1,В2,В4,В5,В6,В7}} = \frac{11779,2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 37} = 91,9 \text{ А}$$

$$I_{авар} = 2 \cdot 91,9 = 183,8 \text{ А}$$

Сделаем выбор выключателя типа ВГБ – 35 – 12/630, стоимостью 6 млн. тг.

Расчетные данные: $I_p = 91,9 \text{ А}$, $I_{ав} = 183,8 \text{ А}$, $I_{уд1} = 8,35 \text{ кА}$; $I_{к1} = 9,75 \text{ кА}$.

Паспортные данные выключателя: $I_n = 630 \text{ А}$, $I_{отк} = 12,5 \text{ кА}$, $I_{дин} = 35 \text{ кА}$.

Проверим наш выбор по условиям: $U_n \geq U_{н.с.}$ [$35 \geq 35 \text{ кВ}$]; $I_n \geq I_{авар.}$ [$630 \geq 183,9 \text{ А}$]; $I_{дин.} \geq I_{уд. к1}$ [$35 \geq 8,35 \text{ кА}$]; $I_{отк.} \geq I_{к1}$ [$12,5 \geq 9,75 \text{ кА}$].

Секционный выключатель В3:

Рабочий и аварийный ток будет аналогичным, других выключателей на 35 кв. Выбираем выключатель типа С - 35М - 630 - 10У1, стоимостью 6 млн. тг.

Расчетные данные: $I_p = 91,9 \text{ А}$, $I_{ав} = 183,8 \text{ А}$, $I_{уд1} = 8,35 \text{ кА}$; $I_{к1} = 9,75 \text{ кА}$.

Паспортные данные выключателя: $I_n = 630 \text{ А}$, $I_{отк} = 10 \text{ кА}$, $I_{дин} = 26 \text{ кА}$.

Проверим наш выбор по условиям: $U_n \geq U_{н.с.}$ [$35 \geq 35 \text{ кВ}$]; $I_n \geq I_{раб.}$ [$630 \geq 91,9 \text{ А}$]; $I_{дин.} \geq I_{уд. к1}$ [$26 \geq 24,74 \text{ кА}$]; $I_{отк.} \geq I_{к1}$ [$10 \geq 9,75 \text{ кА}$].

Разъединители Р1, Р2 выбираем аналогично рабочему и аварийному току выключателей.

Сделаем выбор разъединителя типа: РНД(3) – 35/1000У1, стоимостью 105 тыс. тг.

Расчетные данные: $I_p = 91,9 \text{ А}$, $I_{ав} = 183,8 \text{ А}$, $I_{уд2} = 8,35 \text{ кА}$; $I_{к2} = 3,29 \text{ кА}$.

Паспортные данные разъединителя: $I_n = 1000 \text{ А}$, $I_{дин} = 63 \text{ кА}$, $I_{терм} = 25 \text{ кА}$.

Проверим наш выбор по условиям: $U_{н.раз.} \geq U_{н.с.}$ [$35 \geq 35 \text{ кВ}$]; $I_{н.сис.} \geq I_{авар.лэп}$ [$1000 \geq 183,8 \text{ А}$]; $I_{тер.} \geq I_{к2}$ [$25 \geq 3,29 \text{ кА}$]; $I_{дин.} \geq I_{уд. к2}$ [$63 \geq 8,35 \text{ кА}$].

Долевое участие выключателей В1, В2 в мощности проектируемого завода определим коэффициенты по формулам (4.33) и (4.34) соответственно:

$$\gamma_{32} = \frac{I_{ав.ЛЭП}}{I_{н.В1,В2}}, \quad (4.33)$$

$$\gamma_{32} = \frac{183,8}{630} = 0,29$$

$$\gamma_{33} = \frac{I_{р.ЛЭП}}{I_{н.В1,В2}}, \quad (4.34)$$

$$\gamma_{33} = \frac{91,9}{630} = 0,14$$

Сделаем выбор ограничителя перенапряжения: ОПН-35/400/40,5-10 УХЛ1.
Стоимость вложения в 1 ОПН - 150 тыс. тг.

Определение капитальных затрат на выбранное оборудование:

Согласно формуле (4.24), определяем капитальные затраты на трансформаторы ГПП

$$K_{тр.гпп} = 2 \cdot 55 = 110 \text{ млн. тг.}$$

Согласно формуле, определяем капитальные затраты на ЛЭП 35 кВ из формулы (4.20), также определим и другие капитальные затраты согласно формулам (4.35), (4.36), и (4.37) соответственно:

$$K_{ЛЭП35} = 13 \cdot 2,5 = 32,5 \text{ млн. тг.,}$$

$$K_{тр.сис.} = 2 \cdot K_{тр.} \cdot \gamma_{31}, \text{ млн. тг.,} \quad (4.35)$$

$$K_{тр.сис.} = 2 \cdot 55 \cdot 0,09 = 9,9 \text{ млн. тг.,}$$

$$K_{В1,В2} = 2 \cdot K_{В} \cdot \gamma_{32}, \text{ млн. тг.,} \quad (4.36)$$

$$K_{В1,В2} = 2 \cdot 6 \cdot 0,29 = 3,48 \text{ млн. тг.,}$$

$$K_{В3} = K_{В} \cdot \gamma_{33}, \text{ млн. тг.,} \quad (4.37)$$

$$K_{В3} = 6 \cdot 0,14 = 0,84 \text{ млн. тг.}$$

Согласно формуле (4.21), определяем капитальные затраты на высоковольтные выключатели

$$K_{В4,В5,В6,В7} = 2 \cdot 12 = 24 \text{ млн. тг.}$$

Согласно формуле (4.22), определяем капитальные затраты на разъединители

$$K_{P1,P2} = 2 \cdot 105 = 0,21 \text{ млн. тг.}$$

Согласно формуле (4.23), определяем капитальные затраты на ограничители перенапряжения:

$$K_{OPH3,4} = 2 \cdot 0,15 = 0,3 \text{ млн. тг.}$$

Согласно формуле (4.25), определим суммарные затраты:

$$\begin{aligned} \Sigma K = & K_{тр.гпп} + K_{ЛЭП35} + K_{тр.сис.} + K_{B1,B2} + K_{B3} + K_{P1,P2} + K_{B4,B5,B6,B7} \\ & + K_{OPH3,4}, \text{ млн. тг.} \end{aligned}$$

$$\Sigma K = 110 + 32,5 + 9,9 + 3,48 + 0,84 + 0,21 + 24 + 0,3 = 181,23 \text{ млн. тг.}$$

Определение годовых издержек производства:

Расчет амортизационных издержек согласно формуле (4.26):

$$U_{алэп} = 0,028 \cdot 32,5 = 0,91 \text{ млн. тг.,}$$

$$U_{аобор} = 0,063 \cdot 148,73 = 9,36 \text{ млн. тг.}$$

Расчет издержек на эксплуатацию согласно формуле (4.27):

$$U_{эобор} = 0,03 \cdot 32,5 = 0,975 \text{ млн. тг.}$$

$$U_{элэп} = 0,004 \cdot 148,73 = 0,59 \text{ млн. тг.}$$

Расчет издержек на потерю электроэнергии согласно формуле (4.28):

$$U_{\Pi} = C_0 \cdot (\Delta W_{тр.гпп} + \Delta W_{ЛЭП35} + \Delta W_{тр.эс}), \text{ млн. тг.}$$

$$U_{\Pi} = 3,52 \cdot (131571,5 + 342345,7 + 431400) = 3,2 \text{ млн. тг.}$$

где C_0 - стоимость потерь электроэнергии, $C_0 = 3,52 \text{ тг/кВт} \times \text{ч.}$

Расчет суммарных издержек согласно формуле (4.29):

$$\Sigma U = 0,91 + 9,36 + 0,975 + 0,59 + 3,2 = 15,03 \text{ млн. тг.}$$

Расчет суммарных затрат по 2 варианту согласно формуле (4.30):

$$З_1 = 0,15 \cdot 181,23 + 15,03 = 42,21 \text{ млн. тг}$$

где $E = 0,15$ - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Составим сравнительную таблицу по вариантам 1 и 2

Таблица 4.2 – Исходные результаты по полученным расчетам

Вариант	U_n , кВ	$\sum K$, млн.тг.	$\sum U$, млн.тг.	$З$, млн.тг.
1	110	193,08	16,63	45,49
2	35	181,23	15,03	42,21

Вывод: при сравнении 1 и 2 вариантов мы видим, что вариант 2 имеет меньшие затраты, но для дальнейших расчетов примем первый вариант, так как выбор системы на 110 кВ является более эффективным решением. Она обеспечивает высокую надёжность электроснабжения, меньшие потери энергии при передаче, имеет резерв по мощности для будущего развития (потенциал для будущего роста нагрузки), имеет более длительный срок службы и лучше подходит для подключения крупных потребителей.

Таким образом, 1 вариант предпочтительнее с точки зрения долгосрочной надёжности, энергоэффективности и перспектив роста.

5 Выбор оборудования и расчет токов КЗ на стороне 10 кВ

5.1 Расчет токов короткого замыкания

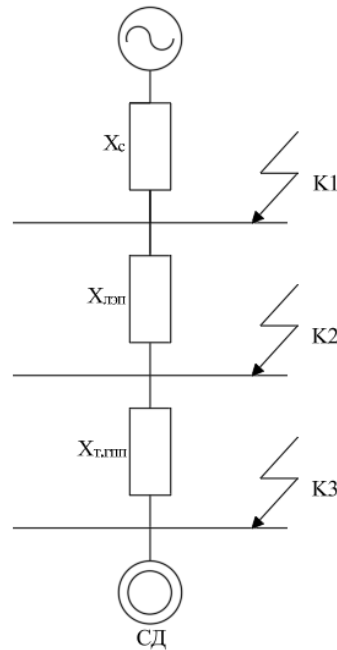


Рисунок 5.1 – Схема замещения для расчета токов КЗ на стороне 10 кВ

Токи КЗ в точках К₁ и К₂ рассчитаны выше:

Расчет тока КЗ в точке К₁ согласно формуле (4.15):

$$I_{к1}^{(3)} = \frac{5}{1} = 5 \text{ кА}$$

Расчет ударного тока в точке К₁ согласно формуле (4.16):

$$I_{удк1} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 5 = 12,69 \text{ кА}$$

Расчет тока КЗ в точке К₂ согласно формуле (4.18):

$$I_{к2}^{(3)} = \frac{5}{1 + 0,344} = 3,72 \text{ кА}$$

Расчет ударного тока в точке К₂ согласно формуле (4.19):

$$I_{удк2} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 3,72 = 9,44 \text{ кА}$$

Расчет экономической плотности согласно формуле (4.10)

$$S_6 = 1000 \text{ МВА}, U_6 = 10,5 \text{ кВ},$$

Расчет базисного тока согласно формуле (4.13):

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА}$$

Расчет индуктивного сопротивления трансформатора согласно формуле (4.14) и расчет тока короткого замыкания на шине 10 кВ из формулы (5.4):

$$X_{\text{тр.гпп}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{16} = 6,56 \text{ о. е.}$$

$$I_{\text{кз шина 10 кВ}} = \frac{I_6}{X_c + X_{\text{лэп}} + X_{\text{тр.гпп}}}, \text{ кА} \quad (5.4)$$

$$I_{\text{кз шина 10 кВ}} = \frac{55}{1 + 0,344 + 6,56} = 6,95 \text{ кА}$$

Расчет ударного тока в точке на шине 10 кВ из формулы (4.19):

$$I_{\text{удкз}} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 6,95 = 17,63 \text{ кА}$$

5.2 Выбор выключателей

Выбираем вводные и СВ на стороне 10 кВ. Выбор производим по полной мощности завода: $S_{\text{р.завода}} = 12680,4 \text{ КВА}$ (из таблицы 3.1.)

Расчет рабочего тока согласно формуле (4.8):

$$I_p = \frac{12680,4}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 348,6 \text{ А}$$

Расчет аварийного тока согласно формуле (4.9)

$$I_{\text{ав.}} = 2 \cdot 348,6 = 697,2 \text{ А}$$

Выбираем выключатель типа ВВР-10-20/1000

Технические параметры вводных выключателей:

Расчетные данные: $U = 10,5 \text{ кВ}$; $I_{\text{ав}} = 697,2 \text{ А}$; $I_{\text{кз}} = 6,95 \text{ кА}$; $I_{\text{удз}} = 17,63 \text{ кА}$.

Паспортные параметры: $U_n = 10,5 \text{ кВ}$; $I_n = 1000 \text{ А}$; $I_{\text{откл}} = 20 \text{ кА}$; $I_{\text{терм}} = 52 \text{ кА}$; $I_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$.

Секционный выключатель:

Расчет рабочего тока согласно формуле (4.8):

$$I_p = \frac{12680,4}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 348,6 \text{ A}$$

Принимаем выключатель типа ВВР-10-20/ 630

Технические параметры секционного выключателя:

Расчетные данные: $U = 10,5 \text{ кВ}$; $I_p = 347,3 \text{ A}$; $I_{кз} = 6,95 \text{ кА}$; $I_{удз} = 17,63 \text{ кА}$.

Паспортные параметры: $U_n = 10,5 \text{ кВ}$; $I_n = 630 \text{ A}$; $I_{откл} = 20 \text{ кА}$; $I_{терм} = 52 \text{ кА}$; $I_{дин} = 52 \text{ кА}$.

Выбор выключателей отходящих линий ГПП ТП1÷ТП3

Определим полную расчетную мощность из формулы (5.5):

$$S_p = \sqrt{(P_p + \Delta P_T)^2 + (Q_p + \Delta Q_T)^2}, \text{ кВА} \quad (5.5)$$

$$S_p = \sqrt{(5706,9 + 58,15)^2 + (1602,6 + 357,2)^2} = 6089 \text{ кВА}$$

Расчет рабочего тока согласно формуле (4.8):

$$I_p = \frac{6089}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 167,4 \text{ A}$$

Расчет аварийного тока согласно формуле (4.9):

$$I_{авар} = 2 \cdot 167,4 = 334,8 \text{ A}$$

Выбираем выключатель типа ВВР-10-20/ 630

Технические параметры выключателя:

Расчетные данные: $U = 10,5 \text{ кВ}$; $I_{ав} = 334,8 \text{ A}$; $I_{кз} = 6,95 \text{ кА}$; $I_{удз} = 17,63 \text{ кА}$.

Паспортные параметры: $U_n = 10,5 \text{ кВ}$; $I_n = 630 \text{ A}$; $I_{откл} = 20 \text{ кА}$; $I_{терм} = 52 \text{ кА}$; $I_{дин} = 52 \text{ кА}$.

Рассчитаем и выберем выключатели для остальных магистралей и заполним таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Выбор выключателей для магистралей

Магистраль	S_p , кВА	I_p , А	$I_{ав}$, А	Выключатель
ГПП-ТП4÷ТП6	5329,7	146,5	293	ВВР-10-20/630
ГПП-ВБК	1000 кВар	27,5		ВВР-10-20/630
СД	472,2	13		ВВР-10-20/630

5.3 Выбор сечений и типов силовых кабелей отходящих линий

Выбираем кабель к магистрали для ГПП-ТП1÷ТП3: $S_{p. ТП1÷ТП3} = 6089$ кВА; $I_p = 167,4$ А; $I_{авар} = 334,8$ А; $N=2$.

Расчет экономического сечения согласно формуле (4.10):

$$F_{эк} = \frac{167,4}{1,3} = 128,8 \text{ мм}^2$$

Принимаем кабель марки ААШв - 10 - (3 × 185); $I_{доп}=275$ А; [12].

Проверка кабеля по допустимому току и аварийному току: $I_{доп.каб.} \geq I_{раб.} / K_p$ [275 ≥ 167,4/0,9=186 А]; $1,3 \cdot I_{доп ав} \geq I_{ав.ТП1}$ [357,5 ≥ 334,8 А].

где $K_p = 0,9$ – поправочный коэффициент, учитывающий количество кабелей, проложенных совместно в траншее ($N=2$).

Все последующие расчетные данные кабелей занесем в таблицу 5.2 – Выбор кабелей.

Таблица 5.2 – Выбор кабелей

Наименование участка	Sp, кВА	Кол-во кабелей в траншее	Кп	Нагрузка		По экономической плотности тока, мм ²		Выбранный кабель	Идоп, А
				Ip, А	Iав, А	jэ	Фэ		
ГПП-ТП1÷ТП3	6089	2	0,9	167,4	334,8	1,3	128,8	ААШВ - 10 - (3 * 185)	275
ТП1÷ТП2	4059,3	2	0,9	111,6	223,2	1,3	85,8	ААШВ - 10 - (3 * 95)	192
ТП2÷ТП3	2029,7	2	0,9	55,8	111,6	1,3	42,9	ААШВ - 10 - (3 * 50)	134
ГПП-ТП4÷ТП6	5329,7	2	0,9	146,5	293,1	1,3	112,7	ААШВ - 10 - (3 * 150)	246
ТП4÷ТП5	3197,8	2	0,9	87,9	175,8	1,3	67,6	ААШВ - 10 - (3 * 70)	162
ТП5÷ТП6	1065,9	1	1	29,3	58,6	1,3	22,5	ААШВ - 10 - (3 * 35)	110
ГПП-СД	472,2	7	0,7	26,0	-	1,3	20,0	ААШВ - 10 - (3 * 25)	91
ГПП-ВБК	1000	2	0,9	55,0	-	1,3	42,3	ААШВ - 10 - (3 * 50)	134

6 Выбор трансформаторов тока

Для выбора ТТ нужно учитывать такие условия, как: номинальное напряжение установки: $U_{\text{ном ТТ}} \geq U_{\text{ном уст-ки}}$; номинальный ток: $I_{\text{ном ТТ}} \geq I_{\text{расч}}$; электродинамическую стойкость: $K_{\text{дин}} \geq \frac{I_{\text{уд}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном ТТ}}}$; вторичную нагрузку: $S_{\text{н2}} \geq S_{\text{нагр расч}}$; термическую стойкость: $K_{\text{тс}} \geq \frac{I_{\text{об}} \cdot \sqrt{t}}{I_{\text{ном ТТ}} \cdot t_{\text{нт}}}$; конструкцию и класс точности.

6.1 Выбор трансформаторов тока на вводах и на СВ

Таблица 6.1 – Измерительные приборы, подключающиеся ко вторичной обмотке трансформатора тока - ТЛМ-10 - 1У3

Прибор	Тип	А, ВА	В, ВА	С, ВА
Wh	САЗ-И681	2,5	2,5	2,5
Varh	СРУ-И689	2,5	2,5	2,5
А	Э-350	0,5	0,5	0,5
W	Д-355	0,5	-	0,5
Var	Д-395	0,5	-	0,5
Итого		6,5	5,5	6,5

Выполним расчёт вторичной нагрузки трансформаторов тока. Суммарное сопротивление вторичной цепи включает в себя сопротивление измерительных приборов, соединительных проводов, а также контактные переходные сопротивления. Общее значение сопротивления определяется по соответствующей формуле (6.1):

$$Z_{\text{н.расч}} = r_{\text{приб}} + r_{\text{пров}} + r_{\text{конт}} \quad (6.1)$$

Сопротивление приборов рассчитаем из формулы (6.2):

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_p^2} \quad (6.2)$$

где $S_{\text{приб}}$ – мощность, потребляемая приборами, ВА;

I_2 – ном. значение тока во вторичной цепи измерительного прибора, А.

$$r_{\text{приб}} = \frac{6,5}{5^2} = 0,26 \text{ Ом}$$

Сопротивление вторичной нагрузки определим в соответствии с формулой (6.3):

$$r_{2н} = \frac{S_{2н\text{ ТТ}}}{I_2^2} \quad (6.3)$$

$$r_{2н} = \frac{30}{5^2} = 1,2 \text{ Ом}$$

Допустимое сопротивление проводов по формуле (6.4):

$$r_{\text{доп пр}} = r_{2н} - r_{\text{приб}} - r_{\text{конт}} \quad (6.4)$$

$$r_{\text{доп пр}} = 1,2 - 0,26 - 0,1 = 0,84 \text{ Ом}$$

Определяется сечение провода по формуле (6.5):

$$F_{\text{пров}} = \frac{L}{r_{\text{доп пр}} \cdot \gamma} \quad (6.5)$$

где γ – удельная проводимость, м/Ом мм² (для алюминия - 35) из [14];
L- длина линии, м;

$$F_{\text{пров}} = \frac{5}{0,84 \cdot 35} = 0,17 \text{ мм}^2$$

Принимаем провод АКРВГ; F=2,5 мм²;

$$r_{\text{пров}} = \frac{L}{F_{\text{пров}} \cdot \gamma} \quad (6.6)$$

$$r_{\text{пров}} = \frac{5}{2,5 \cdot 35} = 0,035 \text{ Ом}$$

Рассчитаем нагрузку вторичной цепи по формуле (6.7) и сопротивление вторичной нагрузки в соответствии с формулой (6.1):

$$S_2 = r_2 \cdot I_2^2, \quad (6.7)$$

$$S_2 = 0,395 \cdot 5^2 = 9,8 \text{ ВА},$$

$$Z_{\text{расч}} = 0,26 + 0,035 + 0,1 = 0,395 \text{ Ом}$$

По полученным данным выберем трансформатор тока типа ТЛМ-10 - 1У3: $I_H = 1000 \text{ А}$; $U_H = 10 \text{ кВ}$; $S_H = 30 \text{ ВА}$.

Сравнение расчетных данных и паспортных ТТ типа ТЛМ-10-1У3

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_{ав} = 697,2$ А; $I_{уд3} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 9,8$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 1000$ А; $I_{дин} = 51$ кА; $S_{2н} = 30$ ВА.

Таблица 6.2 – Выбор ТТ для линий ГПП

Линия	$I_{ав}, А$	$I_p, А$	ТТ	Класс точности	Провод	$F, мм^2$
СВ		347,3	ТЛМ-10-1У3	0,5	АКР ТВ	2,5
ГПП-ТП1÷ТП3	334,8		ТЛМ-10-1	0,5	АКР ТВ	2,5
ГПП-ТП4÷ТП6	293,1		ТЛМ-10-1У3	0,5	АКР ТВ	2,5
ГПП – СД		26	ТЛМ-10-1	0,5	АКР ТВ	2,5
ГПП - Q _{ВБК}		55	УКЛ-10,5-1000	0,5	АКР ТВ	2,5

Выбор трансформатора тока на секционном выключателе шин ГПП:

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_p = 348,6$ А; $I_{уд3} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 9,8$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 600$ А; $I_{дин} = 52$ кА; $S_{2н} = 15$ ВА.

Выбор трансформатора тока для ГПП÷ТП1÷ТП3:

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_{ав} = 334,8$ А; $I_{уд3} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 8,3$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 400$ А; $I_{дин} = 81$ кА; $S_{2н} = 15$ ВА.

Выбор трансформатора тока для ГПП÷ТП4÷ТП6:

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_{ав} = 293,1$ А; $I_{уд3} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 8,3$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 300$ А; $I_{дин} = 81$ кА; $S_{2н} = 15$ ВА.

Выбор трансформатора тока для на линии ГПП СД:

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_p = 26$ А; $I_{уд3} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 7,37$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 100$ А; $I_{дин} = 51$ кА; $S_{2н} = 15$ ВА.

Выбор ТТ для линии главной понижающей подстанции – Q_{ВБК}:

Расчетные данные: $U = 10$ кВ; $I_p = 55$ А; $I_{уд} = 17,63$ кА; $S_{2р} = 7,37$ ВА.

Паспортные параметры: $U_n = 10$ кВ; $I_n = 100$ А; $I_{дин} = 51$ кА; $S_{2н} = 15$ ВА.

6.2 Выбор трансформаторов собственных нужд и ТН

Питание потребителей собственных нужд ПС должно осуществляться от двух взаимно независимых источников. Основными источниками питания, как правило, являются трансформаторы собственных нужд. Заполним таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Основные потребители собственных нужд ТП.

Наименование потребителя	Р _{уст} , кВт	n	КПД	cosφ	tgφ	Расчетная нагрузка		
						К _с	Р, кВт	Q, квар
Силовые трансформаторы	1,5-3	4	0,85	0,85	0,62	1	8	5
ОРУ	0,06-4,5	120	0,9	0,9	0,48	0,1	15	7,3
ОПУ	0,04-28	80	1	0,95	0,33	0,3	50	16,4
ЗРУ, КРУН	0,01-4	60	1	0,9	0,48	0,2	10	4,8
Прочее	0,01-8,8	15	0,8	0,85	0,62	1	15	9,3
Сварочная сеть	13	1	0,9	0,8	0,75	1	14,4	10,8
Итого							112,4	53,6
S _p , кВА	124,53							

Мощность ТСН находим по формуле (6.8):

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}, \text{ кВА} \quad (6.8)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{112,4^2 + 53,6^2} = 124,53 \text{ кВА}$$

Активная нагрузка отдельного потребителя находится по формуле (6.9):

$$P = \frac{P_{уст} \cdot n \cdot K_c}{\eta}, \text{ кВт} \quad (6.9)$$

Реактивная нагрузка определяется по формуле (6.10):

$$Q = P \cdot \text{tg}\varphi, \text{ квар} \quad (6.10)$$

Выберем два трансформатора собственных нужд ТСН-150

6.2.1 Выбор трансформаторов напряжения

Для выбора ТН нужно учитывать такие условия, как: номинальное напряжение установки: $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{ном уст-ки}}$; вторичную нагрузку: $S_{\text{н2}} \geq S_{\text{нагр расч}}$; класс точности; конструкцию и схему соединения.

Нагрузку, присоединённую к трансформатору напряжения первой секции, занесём в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Расчетная вторичная нагрузка

Прибор	Тип	$S_{\text{об,}}$ ВА	Число об-ок	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	N приборов	P, Вт	Q, Вар
V	Э-335	2,5	2	1	0	2	5	-
W	Д-335	2	2	1	0	1	2	-
Var	И-335	2	2	1	0	1	2	-
Wh	СА3-И681	4 Вт	2	0,4	0,917	5	40	91,7
Varh	СР4-И689	4 Вар	2	0,4	0,917	5	40	91,7
Итого							89	183,4

Расчетная вторичная нагрузка определяется по формуле (6.11):

$$S_{2P} = \sqrt{P_{\text{сум}}^2 + Q_{\text{сум}}^2} \text{ ВА} \quad (6.11)$$

$$S_{2P} = \sqrt{89^2 + 183,4^2} = 203,9 \text{ ВА}$$

Принимаем трансформатор напряжения типа ТМГ-250-10:

Условие выбора трансформатора напряжения ТМГ-250-10:

Расчетные данные: $U = 10 \text{ кВ}$; $S_{2P} = 203,9 \text{ ВА}$.

Паспортные параметры: $U_{\text{н}} = 10 \text{ кВ}$; $S_{2\text{н}} = 250 \text{ кВА}$

Схема соединения обмоток: треугольник-треугольник

6.3 Выбор шин ГПП

Сечение шин определяется исходя из длительно допустимого тока и экономической целесообразности их применения. При этом проводится проверка шин на электродинамическую и термическую стойкость к токам короткого замыкания.

Произведем выбор на твердотянутых алюминиевых шинах прямоугольного сечения марки АТ-80х6; $I_{\text{доп}}=1170 \text{ А}$ (одна полоса на фазу), $I_{\text{ав}}=697,2 \text{ А}$; $i_{\text{уд}}=17,63 \text{ кА}$. (данные взяты из расчетов с пункта 5.2).

а) Проверка по току

$$I_{\text{доп}} = 1170 \text{ A} \geq I_{\text{ав}} / K_{\text{п}} = 871,5 \text{ A};$$
$$1170 \text{ A} \geq 697,2 / 0,8 = 871,5 \text{ A}.$$

где $K_{\text{п}} = 0,8$ – поправочный коэффициент, учитывающий количество кабелей, проложенных совместно в траншее ($N=4$).

б) выполним проверку по термической стойкости к току КЗ по формуле (6.12):

$$F_{\text{min}} = \alpha \cdot I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{пр}}}, \text{ мм}^2 \quad (6.12)$$

$$F_{\text{min}} = 12 \cdot 6,95 \cdot \sqrt{1} = 84,48 \text{ мм}^2 < 480 \text{ мм}^2 (80 \times 6)$$

где $\alpha = 12, \sqrt{t_{\text{пр}}} = 1$ – время отключения.

в) выполним проверку по динамической стойкости при $\sigma_{\text{доп}} = 650 \text{ кгс/см}^2$

$$f = \frac{1,75 \cdot 10^{-2} \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot L}{a}, \text{ кгс}, \quad (6.13)$$

$$f = \frac{1,75 \cdot 10^{-2} \cdot 6,95^2 \cdot 120}{80} = 1,3$$

$$W = 0,167 \cdot b^2 \cdot h^2, \text{ см}^3, \text{ см}^3 \quad (6.14)$$

$$W = 0,167 \cdot 0,8^2 \cdot 8^2 = 6,84 \text{ см}^3$$

где L – расстояние между точками крепления изоляторов (100 см);

a – межфазное расстояние (80 см);

b – толщина одной токоведущей полосы (0,8 см);

h – высота (ширина) шины (8 см).

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{f \cdot L}{10 \cdot W}, \frac{\text{кгс}}{\text{см}^3} \quad (6.15)$$

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{1,3 \cdot 120 \cdot 120}{10 \cdot 6,84} = 273,68 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^3} \leq 650 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^3}$$

Согласно расчетам, шины главной понизительной подстанции являются динамически устойчивыми и соответственно выполняют условие проверок.

6.3.1 Выбор изоляторов

Жесткие шины устанавливаются на опорных изоляторах, выбор которых осуществляется на основании следующих критериев:

а) по номинальному напряжению: $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{уст}}$;

б) по допустимой нагрузке: $F_{\text{доп}} \geq F_{\text{расч}}$.

г) по динамической стойкости $F_{\text{доп}} \geq F_{\text{расч}}$

где $F_{\text{расч}}$ – расчетное усилие, воздействующее на изолятор, которое находится по формуле (6.16);

$F_{\text{доп}}$ – предельно допустимая нагрузка на головку изолятора, $F_{\text{доп}} = 0,6 \cdot F_{\text{разруш}}$;

$F_{\text{разруш}}$ – разрушающая нагрузка на изгиб.

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-1} \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot L}{a}, \text{ кгс} \quad (6.16)$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-1} \cdot 6,95^2 \cdot 60}{40} = 12,86 \text{ кгс}$$

Производим выбор изолятора типа ОНШ-10-400У2, $F_{\text{разруш}} = 400$ кгс. Выполним проверку:

$$F_{\text{доп}} = 0,6 \cdot F_{\text{разруш}} = 0,6 \cdot 400 = 240 \text{ кгс} > 12,86 \text{ кгс}$$

Условие выполняется.

Согласно расчетам и выбранным электрооборудованиям, составим однолинейную схему электроснабжения механического завода, изображена в приложении А.

7 Специальный раздел. ТТ в устройствах релейной защиты

7.1 Выбор трансформатора тока для схем релейной защиты

Точность трансформаторов тока, применяемых в релейной защите, определяется их погрешностью ε . Основным критерием служит предельная кратность k_{10} , отражающая максимальное соотношение между расчётным первичным током $I_{1рсч}$ и номинальным первичным током $I_{1ном}$, при котором полная погрешность трансформатора остаётся в пределах $\varepsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке.

Следовательно, подбор трансформатора тока для релейной защиты сводится к определению $I_{1рсч}$ и максимально допустимого сопротивления вторичной нагрузки $Z_{н,доп}$, при которых обеспечивается требуемая точность (не более 10% погрешности). Для этого используются так называемые кривые предельной кратности на рисунке 7.1 из [14], отражающие зависимость между сопротивлением нагрузки Z_n и кратностью тока $k_{10} = I_{1рсч}/I_{1ном}$ при $\varepsilon = 10\%$. Типовые значения первичных токов $I_{1рсч}$ для различных видов защит приведены в таблице 7.1 из [14].

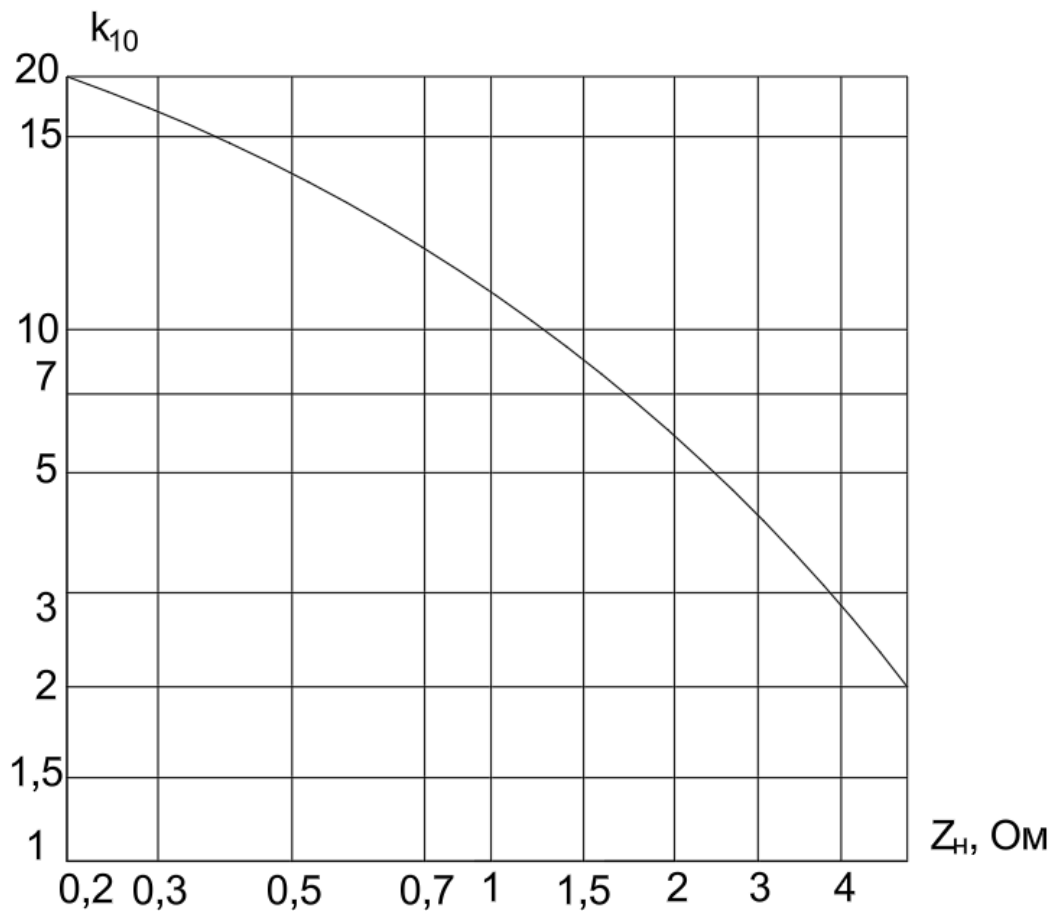


Рисунок 7.1 – Кривая предельной кратности трансформатора тока

Таблица 7.1 – Значения тока расчетного первичного тока для различных защит

Наименование защиты	Расчетный первичный ток
Токовая отсечка и макс. токовая защита с независ. выдержкой времени	$1,1 \cdot I_{с.з}$
Макс. токовая защита с огранич. завис. выдержкой времени	$1,1 \cdot I_{сог}$, где $I_{сог} = I^{(3)}_{к.вн.мах}$
Токовая направленная защита	$I^{(3)}_{к.вн.мах}$
Продольная дифференциальная защита	$I^{(3)}_{к.вн.мах}$
В защитах на переменном оперативном токе для дешунтируемых электромагнитов отключения УАТ	$(1,4...1,8) I_{с.уат} \cdot K_I / k^{(3)}_{сх}$, где $I_{с.уат}$ - ток срабатывания электромагнита, равный 1,5–3,0А. Если для этой цели использовано реле РТМ, то $I_{с.уат} = 5А$.

7.2.1 Порядок выбора ТТ в устройствах релейной защиты

Определяем максимальный рабочий ток, по макс. рабочему току и ном. напряжению защищаемого элемента, выбираем трансформатор тока с подходящим первичным номинальным током $I_{1ном}$, определяем расчетный первичный ток $I_{1рч}$, пользуясь табл. 7.1., определяем предельную кратность $k_{10} = I_{1рч} / I_{1ном}$, согласно кривым предельной кратности, приведённым для выбранного трансформатора тока, определяем доп. значение на вторичной нагрузке $Z_{н.доп.}$.

Затем рассчитывается фактическое значение вторичной нагрузки $Z_{н.рч}$, которое должно быть меньше или равно допустимому, то есть должно выполняться условие: $Z_{н.рч} \leq Z_{н.доп.}$

Расчётная нагрузка $Z_{н.рч}$ включает в себя: сопротивления реле Z_r , сопротивление соединительных проводов $R_{пр}$, а также переходное сопротивление в контактных соединениях, которое принимается ориентировочно $R_{конт} \approx 0,1$ Ом из [14].

7.2 Схемы соединения трансформаторов тока и реле

В зависимости от назначения защиты и предъявляемых к ней требований применяются различные схемы соединения измерительных трансформаторов тока и токовых цепей измерительных органов. Схемы используются, в том числе, для построения максимальной токовой защиты (МТЗ).

7.2.1 Трёхфазная трехрелейная схема соединения в полную звезду

В этой схеме три трансформатора тока (ТА1, ТА2, ТА3) подключены к трём фазам (L1, L2, L3). Вторичные обмотки трансформаторов соединены в звезду, и каждая фаза имеет своё индивидуальное реле (КА1, КА2, КА3). Такая

схема обеспечивает максимальный контроль за всеми фазами и позволяет реализовать чувствительную и избирательную защиту. Она широко применяется в системах МТЗ, где важна высокая надёжность и точность при коротких замыканиях на любую фазу. Изображена на рисунке 7.2 из [14].

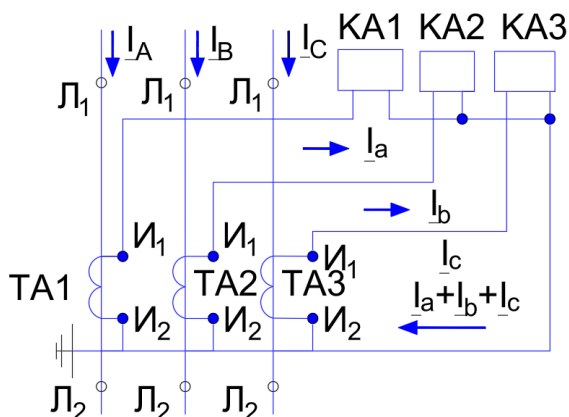


Рисунок 7.2 – Трёхфазная трехрелейная схема соединения в полную звезду

7.2.2 Двухфазная двухрелейная схема соединения в неполную звезду

Здесь используются только два трансформатора тока (ТА1 и ТА3), подключенные к фазам Л1 и Л3. Выходные сигналы подаются на три реле, при этом учитывается разность токов между фазами. За счёт этого создаётся виртуальный контроль и над средней фазой (Л2), даже несмотря на отсутствие отдельного трансформатора на ней. Эта схема позволяет снизить количество трансформаторов тока и может быть применена для упрощённых МТЗ, особенно в условиях, где возможны перекосы токов и необходимо контролировать относительные отклонения. Изображена на рисунке 7.3 из [14].

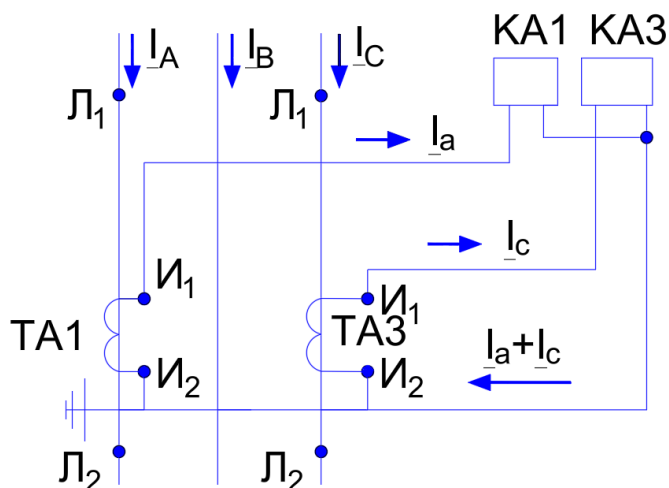


Рисунок 7.3 – Двухфазная двухрелейная схема соединения в неполную звезду

7.2.3 Трехфазная схема соединения трансформаторов тока в полный треугольник, а реле - в полную звезду

В этой схеме трансформаторы фиксируют разность токов между фазами, обеспечивая контроль линейных токов. Сигналы затем поступают на релейные элементы, соединённые в звезду. Такая схема хорошо подходит для МТЗ в сетях без нейтрали и обеспечивает эффективную защиту при межфазных коротких замыканиях. Она также повышает помехоустойчивость и может применяться на объектах с высокой электромагнитной активностью. Изображена на рисунке 7.4 из [14].

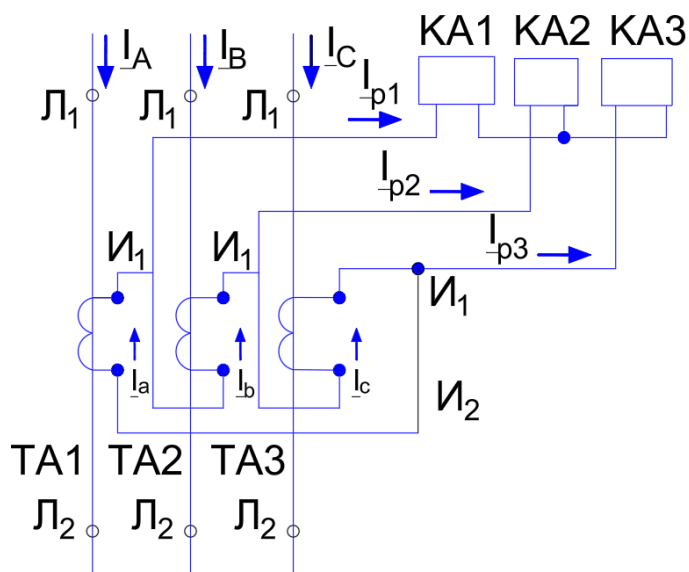


Рисунок 7.4 – Трехфазная схема соединения трансформаторов тока в полный треугольник, а реле - в полную звезду

7.2.4 Двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз).

Она использует только два трансформатора тока (ТА1 и ТА3), подключённых к фазам Π_1 и Π_3 , и одно реле (КА1), подключённое к выходу разностного сигнала. Эта схема проста и экономична, применима для резервной или минимальной защиты, где контроль необходим только между двумя фазами. Несмотря на ограниченный охват, она может использоваться для МТЗ на менее ответственных участках сети или в системах с ограниченными возможностями установки оборудования. Изображена на рисунке 7.5 из [14].

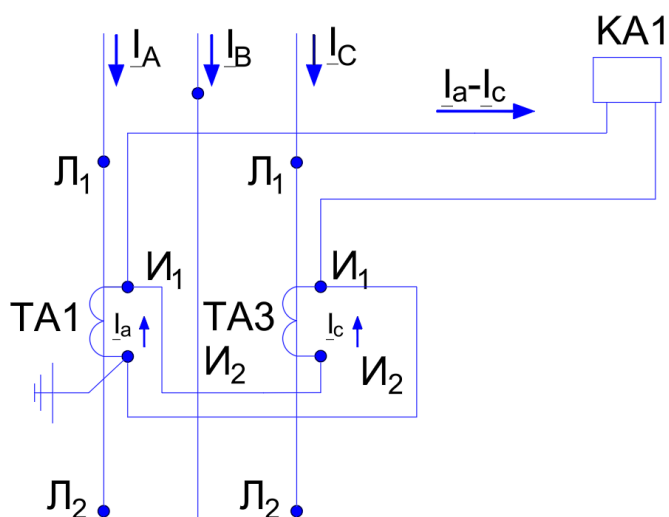


Рисунок 7.5 – Двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз).

7.3 Устройства релейной защиты от повреждения трансформаторов

7.3.1 Устройства релейной защиты от повреждения трансформаторов

1) Токовая отсечка. Применяется для трансформаторов мощностью менее 6,3 МВА. Является простой и быстрой формой токовой защиты, срабатывающей при достижении заданного порога тока, без выдержки времени.

2) Защита от КЗ на землю. Предназначена для выявления однофазных замыканий на землю на выводах низковольтной обмотки трансформатора. Обеспечивает селективное отключение повреждённого участка.

3) Дифференциальная защита трансформатора. Обеспечивает селективное отключение трансформатора при внутренних повреждениях, включая межвитковые и межфазные короткие замыкания. Основана на сравнении токов, поступающих на вход и выход трансформатора.

7.3.2 Устройства релейной защиты от ненормальных режимов работы трансформатора

1) Токовая защита от многофазных коротких замыканий. Для трансформаторов до 1 МВА применяется максимальная токовая защита с действием на отключение. Она, вместе с токовой отсечкой, является основной. Для трансформаторов свыше 1 МВА используется: максимальная токовая защита с комбинированным пуском (по току и напряжению) или без него, либо защита обратной последовательности с приставкой для симметричных КЗ.

2) Токовая защита от перегрузок. Срабатывает при длительных токах, превышающих номинальные. Работает с выдержкой времени, предотвращает перегрев обмоток трансформатора.

7.4 Виды погрешностей в трансформаторах тока

Существуют три вида погрешности: токовая, угловая и полная погрешность. Рассмотрим каждую из них. Из [13], рисунок 7.7.

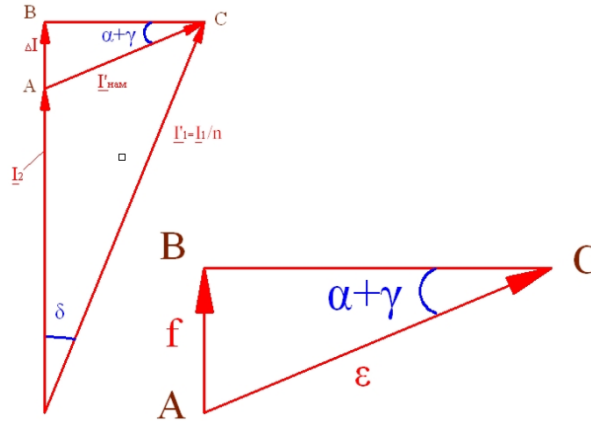


Рисунок 7.7 – Векторная диаграмма погрешностей

7.4.1 Токовая погрешность

На рисунке 7.7 значится, как f (ΔI) или δ_I . Токовая погрешность характеризует отклонение: отношение между вторичным и приведенного ко вторичной стороне первичным током соответственно к приведенному первичному току. По формуле (7.7):

$$\delta_I = \frac{(n_{\text{ТТ}} \cdot I_2 - I_1)}{I_1} = \frac{(I_2 - I_1')}{I_1'} \times 100, \% \quad (7.7)$$

Она считается отрицательной или, наоборот, в зависимости от знака выражения.

7.4.2 Угловая погрешность

По рисунку 7.7 из [13]. Данная погрешность – это угол между первичным и вторичным токами. Значится буквой δ_φ . По формуле (7.8):

$$\delta_\varphi = \varphi_2 - \varphi_1', \% \quad (7.8)$$

При токовой погрешности $\delta_I < 10\%$ то так же $\delta_I < 10^\circ$. При ненормальных режимах работы, из-за сильного насыщения ТТ, угловая погрешность может сильно увеличиваться. Это может приводить к срабатыванию направленных реле.

7.4.3 Полная погрешность

Она вычисляется как отношение действующих значений тока намагничивания и приведенного первичного тока. Полная погрешность обозначается буквой ε . Для синусоидального тока данный вид погрешности определяется по формуле (7.9):

$$\varepsilon = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_\varphi^2}, \% \quad (7.9)$$

Общим для погрешностей будет тот факт, что при увеличении вторичной нагрузки трансформатора тока, будут увеличиваться его погрешности. И уменьшаться при уменьшении.

Трансформаторы тока, предназначенные для питания схем релейной защиты, работают в режиме коротких замыканий или перегрузок оборудования, когда первичные токи значительно превышают номинальные. Такие условия работы связаны с увеличенным значением погрешностей. И хотя сердечники трансформаторов тока для устройств релейной защиты выполняют из высококачественной электротехнической стали, насыщающейся при больших кратностях тока, обязательным условием возможности использования трансформатора тока является его проверка на допустимую погрешность. Согласно нормативным требованиям, погрешность трансформаторов тока в режиме работы защиты не должна превышать 10%.

7.5 Расчет погрешностей трансформатора тока

Для расчета примем трансформатор тока на вводах к шинам первой и второй секции ТЛМ-10-1У3

Паспортные данные: $U_n = 10$ кВ; $I_1 = 1000$ А; $I_2 = 5$ А; $I_{дин} = 51$ кА; $S_{2н} = 30$ ВА, класс точности 0,5.

Определим номинальный коэффициент трансформации в соответствии с формулой (7.10):

$$n_{ТТ} = \frac{I_1}{I_2} \quad (7.10)$$
$$n_{ТТ} = \frac{1000}{5} = 200$$

Измеренный вторичный ток примем $I_2 = 4,98$ А.

Рассчитаем идеальный вторичный ток по формуле (7.11):

$$I_{ид} = \frac{I_1}{n_{ТТ}}, \text{ А}$$

$$I_{ид} = \frac{1000}{200} = 5 \text{ А}$$
(7.11)

Определим токовую погрешность по формуле (7.7):

$$\delta_I = \frac{(200 \cdot 4,98 - 1000)}{1000} \cdot 100 = -0,4 \%$$

Определим угловую погрешность в соответствии через ток намагничивания по формуле (7.12):

$$\tan \varphi = \frac{I_{\mu}}{I_2}$$

$$\tan \varphi = \frac{0,01}{4,98} = 0,00202$$
(7.12)

$$\varphi = \arctg(0,00202) = 0,116^{\circ} = 6,96 \text{ мин}$$

тогда $\tan \varphi \cdot 100\% = 0,202 \%$

где I_{μ} - ток намагничивания указан в паспорте ТТ при номинальном I_1 при различных нагрузках. [4].

Определим полную погрешность в соответствии с формулой (7.9):

$$\varepsilon = \sqrt{-0,4^2 + 0,202^2} = 0,45\%$$

Согласно [1] (таблице 7.2), токовая погрешность не должна превышать 0,5 %, угловая погрешность не должна превышать 30 мин, и полная погрешность не должна превышать 10%. Значит трансформатор тока выбран верно.

Так же проверим правильность выбора ТТ в соответствии с пунктом 7.1

Для начала в соответствии с формулой (7.13) определим предельную кратность:

$$k_{10} = \frac{1,1 \cdot I_{кЗ \text{ шина } 10 \text{ кв}}}{I_{ном}}$$
(7.13)

$$k_{10} = \frac{1,1 \cdot 6,9 \cdot 10^3}{1000} = 7,59$$

Теперь по рисунку 7.1 находим $Z_{н.доп}$, которая равна 1,61 Ом. На рисунке 7.8 можем наблюдать пунктирными линиями $Z_{н.доп}$. По условию из пункта 7.1 $Z_{н.р\text{сч}} \leq Z_{н.доп}$ ($0,394 \leq 1,61$), где 0,395 Ом из пункта 6.1 для ТЛМ-10-1УЗ. Условия выполняются.

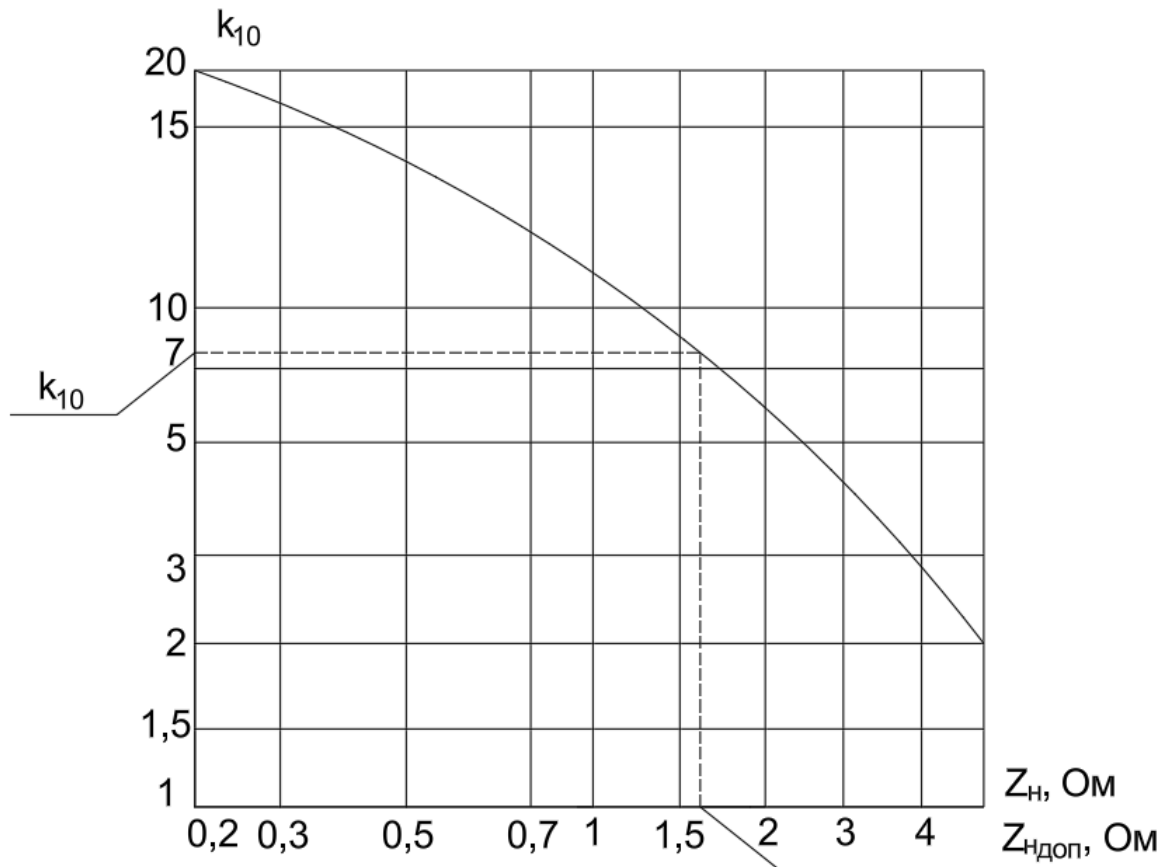


Рисунок 7.8 – Кривая предельной кратности трансформатора тока ТЛМ-10-1УЗ

Так же сравним наши погрешности с предельными значениями ТЛМ-10-1УЗ при классе точности 0,5 по таблице 7.2 из [1].

Таблица 7.2 – Предельные значения погрешности трансформаторов тока для различных классов точности

Класс точности	Первичный ток, % номинального	Предельное значение погрешности			Пределы вторичной нагрузки, % номинальной, при $\cos\varphi_2 = 0,8$
		токовой, %	угловой		
			мин	10^{-2} рад	
0,5	5	1,5	90	2,7	25-100
	10	1	60	1,8	
	20	0,75	45	1,35	
	100-120	0,5	30	0,9	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе разработана система электроснабжения механического завода с учетом особенностей технологического процесса. В рамках проекта были выбраны выключатели, трансформаторы напряжения и тока, трансформаторы собственных нужд, а также провода, кабели и другое оборудование. Определена нагрузка завода на шинах главной понизительной подстанции (ГПП) с напряжением 10 кВ.

В ходе разработки были рассмотрены два варианта схемы внешнего электроснабжения. На основании технико-экономического сравнения выбран наиболее рациональный вариант, предусматривающий передачу электроэнергии по линии электропередачи (ЛЭП) 110 кВ.

Для выбранного варианта предусмотрено следующее высоковольтное оборудование: вводные и секционные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели отходящих линий и собственных нужд (СД), силовые кабели. Так же выполнен подбор измерительных приборов.

Специальный раздел работы посвящен исследованию трансформаторов тока в устройствах релейной защите. Особое внимание уделено анализу различных схем подключения трансформаторов тока в релейных цепях – полной и неполной звезды, полного и неполного треугольника. Рассмотрены особенности и область применения каждой схемы, что позволяет оптимально подбирать вариант подключения в зависимости от условий работы оборудования.

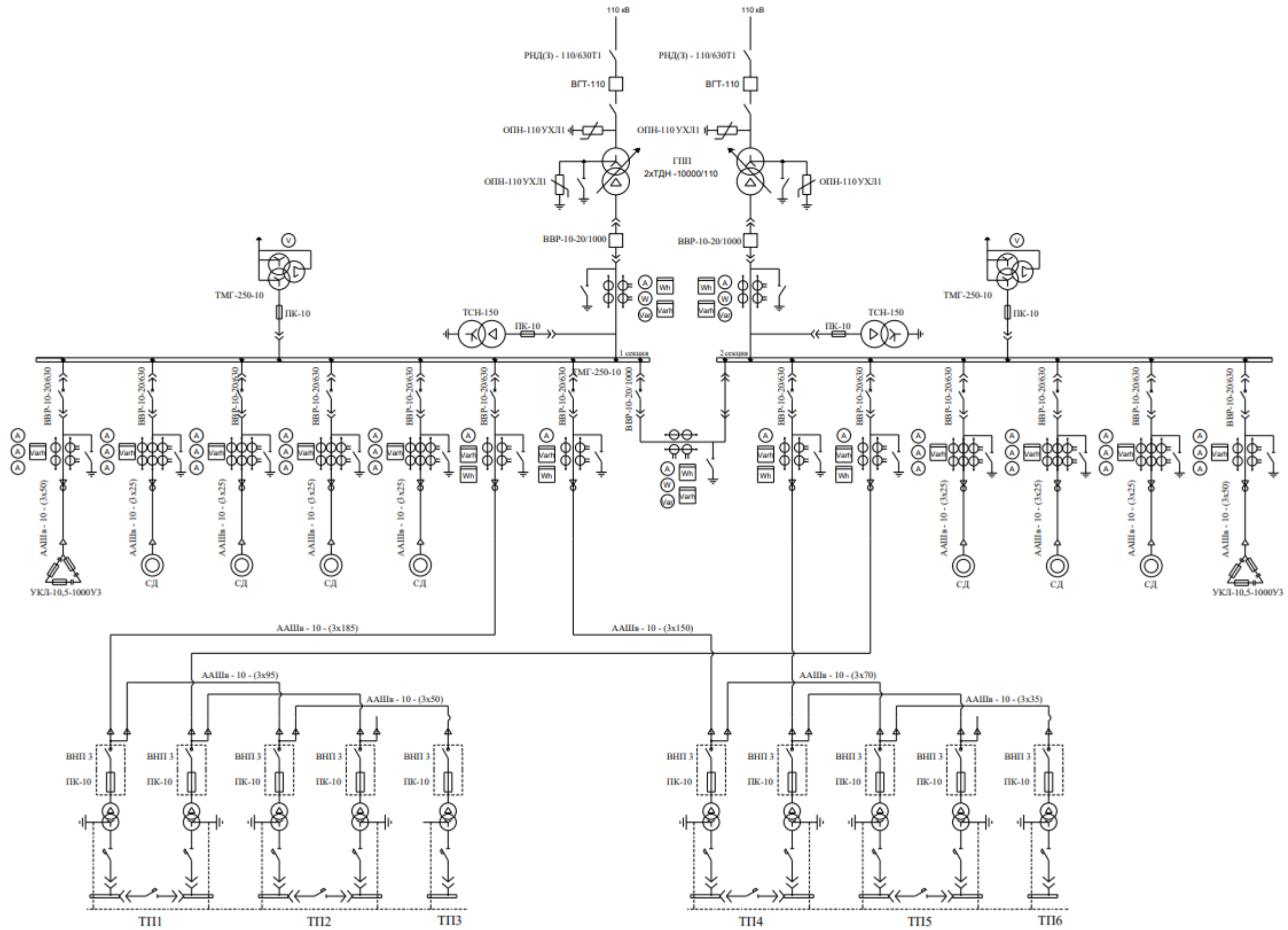
Подробно рассмотрены характеристики точности трансформаторов тока, включая классы точности и виды погрешностей: токовую, угловую и полную. Выполнены расчёты, на примере выбранного трансформатора тока ТЛМ–10–1УЗ, демонстрирующие влияние указанных погрешностей на работу релейной защиты, что особенно важно для обеспечения её надёжного функционирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кабышев А.В., Обухов С.Г. «Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок»
- 2 Барыбин Ю.Г., Смирнов А.Г., Зименков М.Г., Федоров Л.Е. «Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования»
- 3 Липкин Б.Ю. «Электроснабжение промышленных предприятий»
- 4 Шабад М.А. «Трансформаторы тока в схемах релейной защиты»
- 5 Андреев В.А. «Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения»
- 6 <https://transform74.ru/tr/transformatory-tm/206/>
- 7 <https://kvar.nt-rt.ru/price/product/658177>
- 8 <https://powertrans.nt-rt.ru/images/manuals/tdn-10000-110.pdf>
- 9 <https://sudact.ru/law/pravila-ustroistva-elektrostanovok-pue-shestoe-izdanie-utv/pravila/razdel-1/glava-1.3/vybor-secheniya-provodnikov-po-ekonomicheskoi-tablitsa-1.3.36/>
- 10 https://eti.su/articles/spravochnik-cable/spravochnik-cable_57.html
- 11 <https://kaztransformator.kz/catalog/transformatory-tdns-10000-25000kv/transformatory-tdns-10000-16000-35-trdns-25000-35/>
- 12 <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-bumajnoi-izolyaciei/>
- 13 <https://electricalblog.tech/electricheskie-apparaty/pogreshnosti-tt.php>
- 14 Андреев В.А. «Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах»

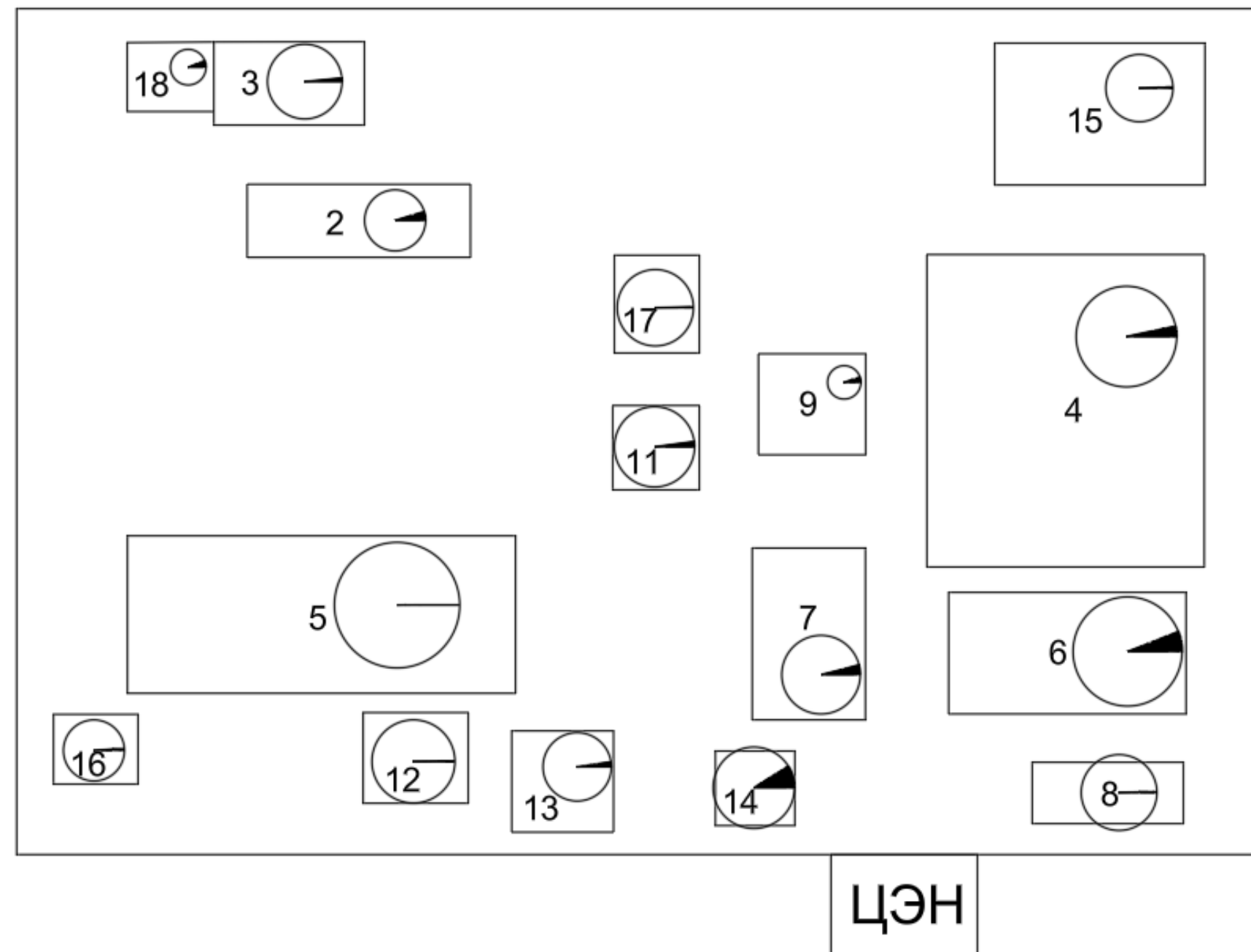
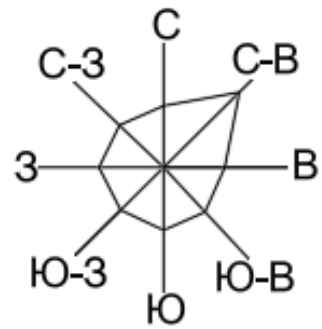
Приложение А

Однолинейная схема электроснабжения механического завода



Приложение Б

Картограмма электрических нагрузок механического завода



ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на дипломную работу «Трансформатор тока в устройствах релейной защиты»

Куржиди Богдана Николаевича

6B07101 – «Энергетика»

В дипломной работе студент Куржиди Богдан выполнил расчеты системы электроснабжения механического завода с учётом технологических особенностей производства. Работа охватывает все основные этапы проектирования: от расчёта нагрузок до выбора оборудования и построения схем внешнего питания.

В основной части рассчитаны электрические нагрузки цехов, определено количество и тип трансформаторов, выполнено их распределение по цехам. Выбраны трансформаторы на ГПП и питающие линии, рассчитаны потери электроэнергии, произведён обоснованный выбор защитного и коммутационного оборудования: выключателей, трансформаторов тока и напряжения, трансформаторов собственных нужд, кабелей и измерительных приборов.

В экономической части рассмотрены два варианта внешнего электроснабжения. Проведён технико-экономический расчет, в результате которого выбрана наиболее рациональная схема электроснабжения завода питанием по ВЛЭП 110 кВ с точки зрения надежности и затрат.

Специальный раздел посвящён трансформаторам тока в устройствах релейной защиты. Студент показал отличное понимание принципа выбора трансформаторов тока, схем подключения, влияния погрешностей и класса точности. На примере трансформатора ТЛМ-10-1У3 выполнены расчёты погрешностей, а также по допустимому значению вторичной нагрузки и расчетному значению, провел проверку в соответствии с условием выбора в релейной защите. Были небольшие замечания при выборе цеховых трансформаторов.

Студент продемонстрировал высокий уровень подготовки, грамотное изложение материала и аргументированные решения. Работа структурирована, изложена грамотно и заслуживает оценки «отлично» (90 баллов). Куржиди Богдан достоин присвоения степени бакалавра по направлению 6B07101 – «Энергетика».

Научный руководитель

PhD, ст.преподаватель

кафедры «Энергетика»

 **Р.Ш. Абитаева**

(подпись)

«26» мая 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

(наименование вида работы)

Куржиди Богдана Николаевича

(Ф.И.О. обучающегося)

6B07101 - Энергетика

(шифр и наименование специальности)

На тему: **«Трансформатор тока в устройствах релейной защиты»**

В дипломной работе выполнены расчеты электроснабжения механического завода. Был произведён расчет электрических нагрузок по цехам, расчеты числа и мощности трансформаторов ГПП и цехов, а так их распределение с учетом надежности и загрузки, выполнен расчет токов КЗ и произведён выбор защитного оборудования, включая высоковольтные выключатели, трансформаторы напряжения и тока, сечения ВЛЭП и кабели.

В экономической части дана оценка эффективности двух вариантов внешнего электроснабжения предприятия. На основании технико-экономического сравнения выбран наиболее рациональный вариант, предусматривающий питание по ЛЭП 110 кВ.

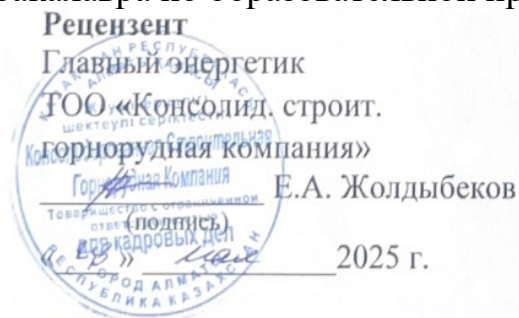
В специальной части было исследовано применение трансформаторов тока в устройствах релейной защиты, что является важным элементом обеспечения надёжности и селективности защитных функций. Рассмотрены схемы подключения трансформаторов тока – полная и неполная звезда, полный и неполный треугольник – с анализом их особенностей и области применения. Проведён анализ характеристик точности трансформаторов тока, включая токовую, угловую, полную погрешности и класса точности. В качестве примера выполнен расчёт погрешностей трансформатора тока ТЛМ-10-1У3.

Замечания к работе

При проведении расчетов по погрешностям трансформаторов тока можно было в качестве примера взять трансформаторы тока на ГПП. В общем, дипломная работа написана в соответствии с требованиями, и тема раскрыта.

Оценка работы

Дипломная работа Куржиди Богдана Николаевича заслуживает оценки «отлично» (95 баллов), а сам студент присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6B07101 – «Энергетика».



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Куржиди Богдан Николаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты

Научный руководитель: Рахимаш Абитаева

Коэффициент Подобия 1: 12.1

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 281

Интервалы: 0

Белые знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата 5.06.2025

Заведующий кафедрой Энергетики
Арсенбаев Е.А.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Куржиди Богдан Николаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты

Научный руководитель: Рахимаш Абитаева

Коэффициент Подобия 1: 12.1

Коэффициент Подобия 2: 1

Микропробелы: 4

Знаки из других алфавитов: 281

Интервалы: 0

Белые знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата

5.06.2025

проверяющий эксперт