

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Электроснабжение и электротехника

(наименование)

13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Цифровые технологии в электроэнергетике

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Реконструкция релейной защиты трансформаторной подстанции 110 кВ
химического предприятия с применением отечественной микропроцессорной защиты

Обучающийся

К.С. Павлов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент С.В. Шаповалов

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

Консультант

А.В. Прошина

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

Тольятти 2025

Аннотация

Темой ВКР является «Реконструкция релейной защиты трансформаторной подстанции 110 кВ химического предприятия с применением отечественной микропроцессорной защиты».

Цель работы: повышение надежности работы системы электроснабжения химического предприятия, путем реконструкции релейной защиты трансформаторной подстанции (ПС).

Достижение цели заключается в разрешении перечня задач, а именно расчетом:

- нагрузок электропотребителей;
- силовых трансформаторов и воздушных линий, электрических потерь;
- токов КЗ и выбором силового защитно-коммутационного электрооборудования;
- релейной защиты и автоматики;
- технических данных для установки молниеприемников.

ВКР содержит 48 страниц, 10 таблиц, 4 рисунка, шесть чертежей, выполненных на форматах листа А1.

Abstract

The topic of the final qualifying work is "Reconstruction of relay protection of a 110 kV transformer substation of a chemical plant using domestic microprocessor protection".

Objective of the work: Increasing the reliability of the power supply system of a chemical plant by implementing relay protection of a transformer substation (PS).

Achieving the goal consists in solving the list of tasks, namely, calculating:

- compliance of electrical consumers;
- power transformers and overhead lines, electrical losses;
- short-circuit currents and selection of power protective and switching electrical equipment;
- relay protection and automation;
- grounding, technical data for installing lightning rods.

The final qualifying work contains 48 pages, 10 tables, 4 figures, six drawings, made in A1 sheet format.

Содержание

Введение	5
1 Анализ ситуации и расчет электрических нагрузок	6
1.1 Анализ действующей схемы релейной защиты	6
1.2 Анализ электропотребления химического предприятия	7
1.3 Расчет электрических нагрузок	8
2 Выбор оборудования	15
2.1 Выбор трансформаторов, компенсирующих устройств, построение картограммы электрических нагрузок	15
2.2 Схема электроснабжения	26
2.3 Расчет токов КЗ и выбор коммутационного оборудования	30
3 Расчет релейной защиты и автоматики	40
4 Расчет молниезащиты	43
Заключение	45
Список используемых источников	46

Введение

Реконструкция релейной защиты на микропроцессорной базе на ПС для химического предприятия – это не просто обновление устаревшего оборудования, а стратегически важный шаг, направленный на повышение надежности электроснабжения, снижение рисков аварий, улучшение управляемости и контроля, снижение эксплуатационных затрат и обеспечение соответствия современным требованиям безопасности и нормативным документам.

Микропроцессорная защита отечественного производства позволит повысить надежность химического производства, что важно, поскольку рассматриваемый объект требует непрерывности электроснабжения. Остановившийся из-за аварии технологический процесс может привести к значительным финансовым потерям (порча сырья, остановка оборудования, срыв контрактов), а также к экологическим последствиям и угрозе безопасности персонала. Надежная релейная защита и автоматика – ключевой элемент защиты от таких рисков.

Цель ВКР состоит в следующем: повышение надежности работы системы электроснабжения химического предприятия, путем реконструкции релейной защиты ПС.

«Электрические сети предприятий должны обеспечивать:

- надежность электроснабжения;
- качество передаваемой электроэнергии;
- безопасность электротехнического и неэлектротехнического персонала при эксплуатации сетей и электроустановок;
- экономичность, т.е. снижение затрат при сооружении и эксплуатации сетей и установок;
- снижение потерь электроэнергии в сетях;
- экологичность, т.е. отсутствие вредного влияния на окружающую среду» [22].

1 Анализ ситуации и расчет электрических нагрузок

1.1 Анализ действующей схемы релейной защиты

На ГПП 220/110 кВ осуществляющей электроснабжение химического предприятия используется устаревшая релейная защита, выполненная на основе электромеханических реле. Однако, учитывая низкую себестоимость, наглядное и простое исполнение, данное решение имеет определенные недостатки:

- «износ механических узлов в ходе эксплуатации;
- большое количество резервных реле;
- применение открытых токовых цепей, которые снижают электробезопасность;
- ремонт и замена элементов защиты, корректировка уставок требует соблюдения требований безопасности;
- большие габариты» [8].

Микропроцессорная защита отечественного производства позволит повысить надежность химического производства, что важно, поскольку рассматриваемый объект требует непрерывности электроснабжения. Остановившийся из-за аварии технологический процесс может привести к значительным финансовым потерям (порча сырья, остановка оборудования, срыв контрактов), а также к экологическим последствиям и угрозе безопасности персонала. Надежная релейная защита и автоматика – ключевой элемент защиты от таких рисков.

В связи с этим, проведем расчет нагрузок химического предприятия, для проведения реконструкции релейной защиты ГПП 220/110 кВ.

1.2 Анализ электропотребления химического предприятия

На химическом предприятии осуществляется электроснабжение следующих цехов:

- измельчения, просеивания и растворения химической продукции
- основной производственный;
- выделения и очистки химической продукции;
- сушки;
- гранулирования, формования и экструзии;
- транспорта и грузовых машин;
- производства и сжатого воздуха для производства продукции и собственных нужд;
- конверсии и абсорбции химической продукции;
- обслуживания и ремонта электрооборудования;
- энергетический;
- упаковочный и отгрузочный.

Также помимо цехов химического предприятия осуществляется электроснабжение вспомогательных зданий:

- склад сырья и исходных материалов;
- склад изготовленной химической продукции;
- сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода;
- химическая и аналитическая лаборатории.

«Поскольку вышеперечисленные потребители в подавляющем большинстве относятся к первой и второй категориям надежности, на ПС 220/110 кВ предусматривается использование двух силовых трансформаторов» [19].

1.3 Расчет электрических нагрузок

Расчет нагрузок проведем методом коэффициента спроса [14].
Параметры цехов и сооружений приведены в таблице 1.

«Активная и реактивная расчетные силовые нагрузки:

$$P_p = K_c \cdot P_y, \quad (1)$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где P_y – суммарная установленная активная мощность всех электроприемников, кВт;

K_c – коэффициент спроса;

$\operatorname{tg} \varphi$ – средневзвешенное значение коэффициента реактивной мощности, найденное из справочного значения коэффициента мощности $\cos \varphi$ » [14].

«Расчетная активная нагрузка освещения здания:

$$P_{p.o} = K_{c.o} \cdot P_{y.o}, \quad (3)$$

где $P_{p.o}$ – установленная мощность осветительных электроприемников, кВт;

$K_{c.o}$ – коэффициент спроса осветительной нагрузки» [14],[22].

«Номинальная осветительная нагрузка:

$$P_{p.o} = S \cdot P_{y.o}, \quad (4)$$

где $P_{y.o}$ – удельная осветительная нагрузка (0,013 кВт/м²);

S – площадь здания, м²» [4],[6],[16].

Расчеты нагрузок внесены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Расчет силовой и осветительной нагрузок

Здание по ГП	Наименование	Силовое оборудование						Освещение						
		P_y	K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_p	Q_p	F	$P_{y.o}$	$K_{c.o}$	$\cos\varphi_o$	$\operatorname{tg}\varphi_o$	$P_{p.o}$	$Q_{p.o}$
		кВт	–	–	–	кВт	квар	м ²	кВт	–	–	–	кВт	квар
10.1.1	Цех измельчения, просеивания и растворения химической продукции	211	0,88	0,93	0,40	185,7	74,3	3251	42,26	0,87	0,95	0,33	36,77	12,13
10.1.2	Основной производственный цех	37131	0,69	0,53	1,60	25620,4	40992,6	41411	538,34	0,87	0,95	0,33	468,36	154,56
10.1.3	Цех выделения и очистки химической продукции	12511	0,63	0,63	1,23	7881,9	9694,7	68771	894,02	0,87	0,95	0,33	777,80	256,67
10.1.4	Цех сушки	25611	0,63	0,58	1,40	16134,9	22588,9	24851	323,06	0,87	0,95	0,33	281,06	92,75
10.1.5	Цех гранулирования, формования и экструзии	811	0,48	0,78	0,80	389,3	311,4	65351	849,56	0,62	0,96	0,29	526,73	152,75
10.1.6	Упаковочное и отгрузочное отделения цеха	1011	0,93	0,98	0,20	940,2	188,0	20351	264,56	0,92	0,94	0,36	243,40	87,62

Продолжение таблицы 1

Здание по ГП	Наименование	Силовое оборудование						Освещение						
		P_y	K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_p	Q_p	F	$P_{y.o}$	$K_{c.o}$	$\cos\varphi_o$	$\operatorname{tg}\varphi_o$	$P_{p.o}$	$Q_{p.o}$
		кВт	—	—	—	кВт	квар	м ²	кВт	—	—	—	кВт	квар
10.1.7	Склад сырья и исходных материалов	3011	0,83	0,93	0,40	2499,1	999,6	27731	360,50	0,92	0,94	0,36	331,66	119,40
10.1.8	Склад изготовленной химической продукции	4211	0,93	0,98	0,20	3916,2	783,2	42131	547,70	0,92	0,94	0,36	503,88	181,40
10.1.9	Цех обслуживания и ремонта электрооборудования	4721	0,53	0,68	1,08	2502,1	2702,3	25751	334,76	0,87	0,95	0,33	291,24	96,11
10.1.10	Энергетический цех и тепловое энергооборудование	1511	0,43	0,63	1,23	649,7	799,1	27011	351,14	0,62	0,96	0,29	217,71	63,14
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода	37131	0,69	0,53	1,60	25620,4	40992,6	40781	530,15	0,92	0,94	0,36	487,74	175,59
10.1.12	Химическая и аналитическая лаборатории	12211	0,63	0,68	1,08	7692,9	8308,3	77231	1004,00	0,92	0,94	0,36	923,68	332,52

Продолжение таблицы 1

Здание по ГП	Наименование	Силовое оборудование						Освещение						
		P_y	K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_p	Q_p	F	$P_{y.o}$	$K_{c.o}$	$\cos\varphi_o$	$\operatorname{tg}\varphi_o$	$P_{p.o}$	$Q_{p.o}$
		кВт	—	—	—	кВт	квар	м ²	кВт	—	—	—	кВт	квар
10.1.1 3	Цех транспорта и грузовых машин	32211	0,65	0,73	0,94	20937,2	19681,0	44561	579,29	0,92	0,94	0,36	532,95	191,86
10.1.1 4	Цех производства и сжатого воздуха для производства продукции и собственных нужд	2511	0,78	0,78	0,80	1958,6	1566,9	14411	187,34	0,87	0,95	0,33	162,99	53,79
10.1.1 5	Цех конверсии и абсорбции химической продукции	6011	0,78	0,78	0,80	4688,6	3750,9	14411	187,34	0,62	0,96	0,29	116,15	33,68
—	—	180815	0,672605	0,62	1,26	121617	153433,80	538005	6994	0,84	0,95	0,34	5902,12	2003,97

Таблица 2 – Расчетные электрические нагрузки

Здание по ГП	Наименование	Силовое оборудование		Освещение		Расчетная нагрузка		
		P_p	Q_p	$P_{p.o}$	$Q_{p.o}$	$P_{p\Sigma}$	$Q_{p\Sigma}$	$S_{p\Sigma}$
		кВт	квар	кВт	квар	кВт	квар	кВА
10.1.1	Цех измельчения, просеивания и растворения химической продукции	185,7	74,3	36,77	12,13	222,47	86,43	238,67
10.1.2	Основной производственный цех	25620,4	40992,6	468,36	154,56	26088,76	41147,16	48720,76
10.1.3	Цех выделения и очистки химической продукции	7881,9	9694,7	777,80	256,67	8659,70	9951,37	13191,67
10.1.4	Цех сушки	16134,9	22588,9	281,06	92,75	16415,96	22681,65	27998,95
10.1.5	Цех гранулирования, формования и экструзии	389,3	311,4	526,73	152,75	916,03	464,15	1026,91
10.1.6	Упаковочное и отгрузочное отделения цеха	940,2	188,0	243,40	87,62	1183,60	275,62	1215,27
10.1.7	Склад сырья и исходных материалов	2499,1	999,6	331,66	119,40	2830,76	1119,00	3043,91
10.1.8	Склад изготовленной химической продукции	3916,2	783,2	503,88	181,40	4420,08	964,60	4524,11
10.1.9	Цех обслуживания и ремонта электрооборудования	2502,1	2702,3	291,24	96,11	2793,34	2798,41	3953,97
10.1.10	Энергетический цех и тепловое энергооборудование	649,7	799,1	217,71	63,14	867,41	862,24	1223,05

Продолжение таблицы 2

Здание по ГП	Наименование	Силовое оборудование		Освещение		Расчетная нагрузка		
		P_p	Q_p	$P_{p.o}$	$Q_{p.o}$	$P_{p\Sigma}$	$Q_{p\Sigma}$	$S_{p\Sigma}$
		кВт	квар	кВт	квар	кВт	квар	кВА
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода	25620,4	40992,6	487,74	175,59	26108,14	41168,19	48748,90
10.1.12	Химическая и аналитическая лаборатории	7692,9	8308,3	923,68	332,52	8616,58	8640,82	12202,84
10.1.13	Цех транспорта и грузовых машин	20937,2	19681,0	532,95	191,86	21470,15	19872,86	29255,73
10.1.14	Цех производства и сжатого воздуха для производства продукции и собственных нужд	1958,6	1566,9	162,99	53,79	2121,59	1620,69	2669,79
10.1.15	Цех конверсии и абсорбции химической продукции	4688,6	3750,9	116,15	33,68	4804,75	3784,58	6116,26
—	—	121617	153433,80	5902,12	2003,97	127519,32	155437,77	201052,42

«Расчетная реактивная нагрузка осветительных приёмников:

$$Q_{p.o} = Q_{p.o} \cdot tg\varphi. \quad (5)$$

Расчетная полная мощность силовой и осветительной нагрузки:

$$S_{p\Sigma} = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + Q_{p\Sigma}^2} = \sqrt{(P_p + P_{p.o})^2 + (Q_p + Q_{p.o})^2}. \quad (6)$$

Итоговая расчетная мощность необходима для выбора силовых трансформаторов ПС 220/110 кВ» [16],[23].

Выводы по разделу

Полная мощность химического предприятия составляет 201 МВА, активная мощность – 128 МВт, соответственно коэффициент мощности равен 0,64.

2 Выбор оборудования

2.1 Выбор трансформаторов, компенсирующих устройств, построение картограммы электрических нагрузок

«С целью определения места расположения главного распределительного пункта (ГРП) строим картограмму электрических нагрузок. Картограмма представляет собой размещение на генплане завода окружностей, являющиеся расчетными активными нагрузками. Радиусы окружности для каждого круга, размещенные по координатам x и y , представлены в таблице 3:

$$r = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}}{\pi m}}. \quad (7)$$

Центр электрических нагрузок (ЦЭН) принимается совпадающим с центром тяжести района, нагрузка – равномерно распределенной по площади района. Доля осветительной нагрузки показывается в виде сектора. Угол сектора:

$$\alpha_{\tau} = \frac{P_{p.o}}{P_{\Sigma}} \cdot 360^{\circ}. \quad (8)$$

Площадь окружностей соответствует масштабу: $m = 0,7 \text{ кВт/мм}^2$ » [13].

Определим напряжение для электроснабжения химического предприятия по формуле Вейкерта:

$$U = 3\sqrt{S_k} + 0,5l, \quad (9)$$
$$U = 3\sqrt{201502,42} + 0,5 \cdot 141 = 113,04 \text{ кВ}.$$

Таблица 3 – Расчетные данные для построения картограммы нагрузок

Здание по ГП	Наименование	P_p	$P_{y.o}$	$P_{p\Sigma}$	$Q_{p\Sigma}$	$S_{p\Sigma}$	r	a_t	x	y	$S_{p\Sigma} \cdot x$	$S_{p\Sigma} \cdot y$
		кВт	кВт	кВт	квар	кВА	мм	%	м	м	кВА·м	кВА·м
10.1.1	Цех измельчения, просеивания и растворения химической продукции	185,7	42,26	222,47	86,43	238,67	3,18	59,50	101	3351	24106	799783
10.1.2	Основной производственный цех	25620,4	538,34	26088,76	41147,16	48720,76	34,44	6,46	761	2751	37076498	134030811
10.1.3	Цех выделения и очистки химической продукции	7881,9	894,02	8659,70	9951,37	13191,67	19,84	32,33	2401	2861	31673200	37741368
10.1.4	Цех сушки	16134,9	323,06	16415,96	22681,65	27998,95	27,32	6,16	3391	2941	94944439	82344912
10.1.5	Цех гранулирования, формования и экструзии	389,3	849,56	916,03	464,15	1026,91	6,45	207,01	4461	3091	4581046	3174179
10.1.6	Упаковочное и отгрузочное отделения цеха	940,2	264,56	1183,60	275,62	1215,27	7,34	74,03	91	2181	110590	2650504

Продолжение таблицы 3

Здание по ГП	Наименование	P_p	$P_{y.o}$	$P_{p\Sigma}$	$Q_{p\Sigma}$	$S_{p\Sigma}$	r	a_t	x	y	$S_{p\Sigma} \cdot x$	$S_{p\Sigma} \cdot y$
		кВт	кВт	кВт	квар	кВА	мм	%	м	м	кВА·м	кВА·м
10.1.7	Склад сырья и исходных материалов	2499,1	360,50	2830,76	1119,00	3043,91	11,35	42,18	1311	2031	3990566	6182181
10.1.8	Склад изготовленной химической продукции	3916,2	547,70	4420,08	964,60	4524,11	14,18	41,04	2611	2021	11812451	9143226
10.1.9	Цех обслуживания и ремонта электрооборудования	2502,1	334,76	2793,34	2798,41	3953,97	11,27	37,53	4451	1761	17599120	6962941
10.1.10	Энергетический цех и тепловое энергооборудование	649,7	351,14	867,41	862,24	1223,05	6,28	90,36	161	801	196911	979663
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода	25620,4	530,15	26108,14	41168,19	48748,90	34,46	6,73	1011	1101	49285138	53672539
10.1.12	Химическая и аналитическая лаборатории	7692,9	1004,00	8616,58	8640,82	12202,84	19,79	38,59	2611	1121	31861615	13679384

Продолжение таблицы 3

Здание по ГП	Наименование	P_p	$P_{y.o}$	$P_{p\Sigma}$	$Q_{p\Sigma}$	$S_{p\Sigma}$	r	a_t	x	y	$S_{p\Sigma} \cdot x$	$S_{p\Sigma} \cdot y$
		кВт	кВт	кВт	квар	кВА	мм	%	м	м	кВА·м	кВА·м
10.1.13	Цех транспорта и грузовых машин	20937,2	579,29	21470,15	19872,86	29255,73	31,25	8,94	3631	801	106227556	23433840
10.1.14	Цех производства и сжатого воздуха для производства продукции и собственных нужд	1958,6	187,34	2121,59	1620,69	2669,79	9,82	27,66	4421	1141	11803142	3046230
10.1.15	Цех конверсии и абсорбции химической продукции	4688,6	187,34	4804,75	3784,58	6116,26	14,78	8,70	4421	561	27039985	3431222
—	—	121617	6994	127519,32	155437,77	201052,42	—	—	—	—	428226363	381272783

«Принимаем напряжение 110 кВ. Теперь необходимо определить места расположения трансформаторных подстанций (ТП).

На основании координат и нагрузок находим координаты ЦЭН:

$$x_0 = \frac{S_{p\Sigma} \cdot x}{S_{p\Sigma}}, \quad (10)$$

$$y_0 = \frac{S_{p\Sigma} \cdot y}{S_{p\Sigma}}, \quad (11)$$

где x_0, y_0 – координаты центра нагрузок завода и отдельных ПС, м;

x и y – координаты центра нагрузок отдельного потребителя, м;

$S_{p\Sigma}$ – расчетная нагрузка отдельного потребителя, кВА.

Поскольку при компенсации реактивной мощности изменяется полная мощность, проведем расчет компенсирующих устройств.

«Выбранные конденсаторные батареи представлены в таблице 4» [9].

«Полная мощность с учетом компенсации реактивной мощности определяется по формуле:

$$S'_p = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + (Q_{p\Sigma} - Q_{УКРМ})^2}. \quad (12)$$

Мощность трансформатора:

$$S_{тр} = \frac{S'_p}{n_{тр} \cdot k_3}. \quad (13)$$

Поскольку полученные значения координат x и y ТП отражают их размещение внутри зданий, то скорректируем координаты x_ϕ и y_ϕ на ближайшие возможные и внесем их в таблицу 4» [14].

Таблица 4 – Расчет ЦЭН ТП

Здание по ГП	Потребитель	P_p	Q_p	$Q_{УКРМ}$	S_p	$S_{тр}$	$n_{тр}$	k_3	x	y	x_{ϕ}	y_{ϕ}
		кВт	квар	квар	кВА	кВА	шт	—	м	м	м	м
220.3.1(ГПП)		127519,31	152125,63	—	127519,85	125000	2	0,51	2282	1886	1831	2391
110.2.1(ТП)		12063,46	13825,20	6500	12063,49	10000	2	0,60	812	2537	731	2561
10.1.1	Цех измельчения, просеивания и растворения химической продукции	222,47	86,43	—	—	—	—	—	101	3351	—	—
10.1.2	Основной производственный цех (часть)	7826,63	12344,15	—	—	—	—	—	761	2751	—	—
10.1.6	Цех выделения и очистки химической продукции	1183,60	275,62	—	—	—	—	—	91	2181	—	—
10.1.7	Склад сырья и исходных материалов	2830,76	1119,00	—	—	—	—	—	1311	2031	—	—
110.2.2(ТП)		13044,38	20573,58	9500	13044,44	10000	2	0,65	761	2751	961	2561
10.1.2	Основной производственный цех (часть)	13044,38	20573,58	—	—	—	—	—	761	2751	—	—

Продолжение таблицы 4

Здание по ГП	Потребитель	P_p	Q_p	$Q_{УКРМ}$	S_p	$S_{тр}$	$n_{тр}$	k_3	x	y	$x_{ф}$	$y_{ф}$
		кВт	квар	квар	кВА	кВА	шт	—	м	м	м	м
110.2.3(ТП)		5217,75	8229,43	4000	5217,77	4000	2	0,65	761	2751	1191	2561
10.1.2	Основной производственный цех (часть)	5217,75	8229,43	—	—	—	—	—	761	2751	—	—
110.2.4(ТП)		8659,70	9951,37	4500	8659,75	6300	2	0,69	2401	2861	2421	2561
10.1.3	Цех выделения и очистки химической продукции	8659,70	9951,37	—	—	—	—	—	2401	2861	—	—
110.2.5(ТП)		14269,66	14573,59	7000	14269,68	10000	2	0,71	3149	2656	3291	2561
10.1.4	Цех сушки (часть)	9849,58	13608,99	—	—	—	—	—	3391	2941	—	—
10.1.8	Склад изготовленной химической продукции	4420,08	964,60	—	—	—	—	—	2611	2021	—	—
110.2.6(ТП)		10275,75	12335,22	6000	10275,77	10000	2	0,51	3775	2634	3481	2561
10.1.4	Цех сушки (часть)	6566,38	9072,66	—	—	—	—	—	3391	2941	—	—
10.1.5	Цех гранулирования, формования и экструзии	916,03	464,15	—	—	—	—	—	4461	3091	—	—
10.1.9	Цех обслуживания и ремонта электрооборудования	2793,34	2798,41	—	—	—	—	—	4451	1761	—	—

Продолжение таблицы 4

Здание по ГП	Потребитель	P_p	Q_p	$Q_{УКРМ}$	S_p	$S_{тр}$	$n_{тр}$	k_3	x	y	$x_{ф}$	$y_{ф}$
		кВт	квар	квар	кВА	кВА	шт	—	м	м	м	м
110.2.7(ТП)		9570,12	14584,97	7000	9570,15	6300	2	0,76	934	1074	961	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—
10.1.10	Энергетический цех и тепловое энергооборудование	867,41	862,24	—	—	—	—	—	161	801	—	—
110.2.8(ТП)		8702,71	13722,73	6000	8702,81	6300	2	0,69	1011	1101	1191	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—
110.2.9(ТП)		8702,71	13722,73	6000	8702,81	6300	2	0,69	1011	1101	1421	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—

Продолжение таблицы 4

Здание по ГП	Потребитель	P_p	Q_p	$Q_{УКРМ}$	S_p	$S_{тр}$	$n_{тр}$	k_3	x	y	$x_{ф}$	$y_{ф}$
		кВт	квар	квар	кВА	кВА	шт	—	м	м	м	м
110.2.7(ТП)		9570,12	14584,97	7000	9570,15	6300	2	0,76	934	1074	961	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—
10.1.10	Энергетический цех и тепловое энергооборудование	867,41	862,24	—	—	—	—	—	161	801	—	—
110.2.8(ТП)		8702,71	13722,73	6000	8702,81	6300	2	0,69	1011	1101	1191	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—
110.2.9(ТП)		8702,71	13722,73	6000	8702,81	6300	2	0,69	1011	1101	1421	1291
10.1.11	Сооружения водоочистки и водоподготовки химического завода (часть)	8702,71	13722,73	—	—	—	—	—	1011	1101	—	—

Продолжение таблицы 4

Здание по ГП	Потребитель	P_p	Q_p	$Q_{УКРМ}$	S_p	$S_{тр}$	$n_{тр}$	k_3	x	y	x_{ϕ}	y_{ϕ}
		кВт	квар	квар	кВА	кВА	шт	—	м	м	м	м
110.2.10(ТП)		8616,58	8640,82	4000	8616,62	6300	2	0,68	2611	1121	2431	1331
10.1.12	Химическая и аналитическая лаборатории	8616,58	8640,82	—	—	—	—	—	2611	1121	—	—
110.2.11(ТП)		14313,43	9936,43	4500	14313,46	10000	2	0,72	3631	801	3631	1331
10.1.13	Цех транспорта и грузовых машин (часть)	14313,43	9936,43	—	—	—	—	—	3631	801	—	—
110.2.12(ТП)		14083,06	12029,56	5500	14083,10	10000	2	0,70	4020	770	3901	881
10.1.13	Цех транспорта и грузовых машин (часть)	7156,72	6624,29	—	—	—	—	—	3631	801	—	—
10.1.14	Цех производства и сжатого воздуха для производства продукции и собственных нужд	2121,59	1620,69	—	—	—	—	—	4421	1141	—	—
10.1.15	Цех конверсии и абсорбции химической продукции	4804,75	3784,58	—	—	—	—	—	4421	561	—	—

«Аналогичные расчеты проведем для расчета ГПП. Результаты представлены в таблице 5» [21].

Таблица 5 – Расчет ЦЭН

Здание по ГП	Наименование	P_p	Q_p	x	y	$n_{тр}$	k_3
		кВт	квар	м	м	шт	—
ГПП-220.3.1	2×АТДЦТН 125000/220/110	127519,31	152125,63	2282	1886	2	0,51
ТП-110.2.1	2×ТДН 10000/110/10	12063,46	13825,20	731	2561	2	0,60
ТП-110.2.2	2×ТДН 10000/	13044,38	20573,58	961	2561	2	0,65
ТП-110.2.3	2×ТМН 4000/	5217,75	8229,43	1191	2561	2	0,65
ТП-110.2.4	2×ТМН 6300/	8659,70	9951,37	2421	2561	2	0,69
ТП-110.2.5	2×ТДН 10000/	14269,66	14573,59	3291	2561	2	0,71
ТП-110.2.6	2×ТМН 10000/	10275,75	12335,22	3481	2561	2	0,51
ТП-110.2.7	2×ТМН 6300/	9570,12	14584,97	961	1291	2	0,76
ТП-110.2.8	2×ТМН 6300/	8702,71	13722,73	1191	1291	2	0,69
ТП-110.2.9	2×ТМН 6300/	8702,71	13722,73	1421	1291	2	0,69
ТП-110.2.10	2×ТМН 6300/	8616,58	8640,82	2431	1331	2	0,68
ТП-110.2.11	2×ТДН 10000/	14313,43	9936,43	3631	1331	2	0,72
ТП-110.2.12	2×ТДН 10000/	14083,06	12029,56	3901	881	2	0,70

«Теперь необходимо выбрать схему электроснабжения потребителей» [21].

2.2 Схема электроснабжения

Упрощенная схема электроснабжения от ПС 220/110 кВ представлена на рисунке 1.

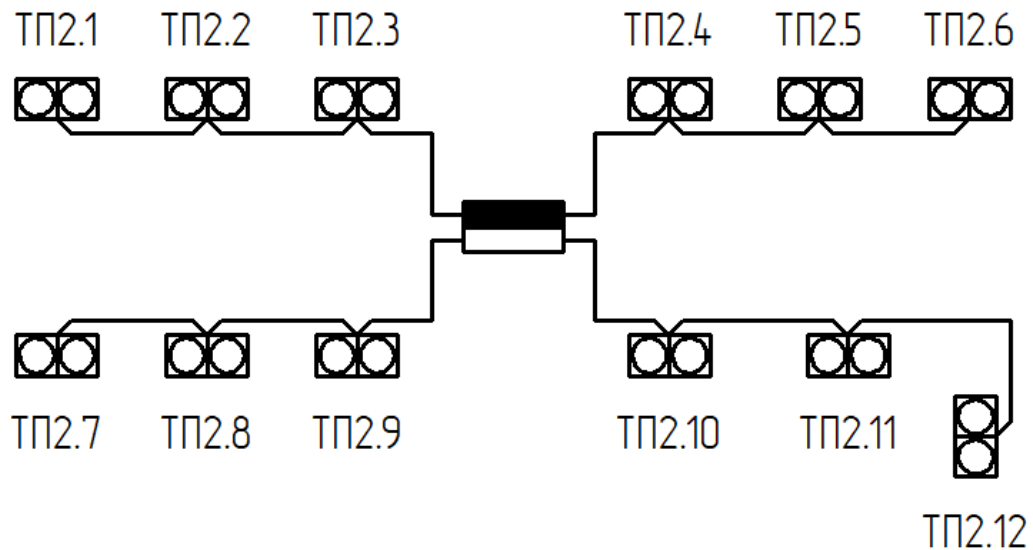


Рисунок 1 – Упрощенная схема электроснабжения

«Расчет токов, возникающих в нормальном и аварийном режимах:

$$I_p = \frac{S_{p\Sigma}}{\sqrt{3}U \cdot n}, \quad (14)$$

где n – количество линий» [12].

«Сечение воздушной линии:

$$F_p = \frac{I}{j_{\text{ЭК}}}, \quad (15)$$

где I – расчетный ток в час максимума энергосистемы, А;

$j_{\text{ЭК}}$ – нормированное значение экономической плотности тока, А/мм², для заданных условий работы, выбираемое по табл. 1.3.36» [12].

«Для выбранной марки линии $j_{\text{эк}} = 1,6 \text{ А/мм}^2$, поскольку принимаем, что число часов использования максимума нагрузки более 5000 часов» [12].

«Понижение напряжения у потребителя по сравнению с нормальным сказывается на работе токоприемника, будь то силовая или осветительная нагрузка. Поэтому при расчете любой линии электропередачи отклонения напряжений не должны превышать допустимых норм, сети, выбранные по току нагрузки и рассчитанные на нагрев, как правило, проверяют по потере напряжения» [3].

«Потери напряжения в линиях определим по следующему выражению:

$$\Delta U = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0)}{U_n} l, \quad (16)$$

где r_0, x_0 – активное и индуктивное сопротивление, Ом/км;

l – длина, км;

P, Q – активная и реактивная мощность» [13].

Расчетные токи и потери напряжения схемы электроснабжения химического предприятия приведены в таблицах 6 и 7 соответственно [20].

Таблица 6 – Токи схемы электроснабжения цехов

КЛ	P_p	Q_p	S_p	I_p	$I_{па}$	F_p	F_n	$I_{спр}$	$I_{др}$	$I_{д.па}$
	кВт	квар	кВА	А	А	мм ²	мм ²	А	А	А
2 × 110.3.1 - 110.2.3	30325,59	42628,21	52314,49	137,29	274,58	85,81	95	309	241,07	271,20
110.2.3 - 110.2.2	25107,84	34398,78	42587,32	223,53	447,06	139,71	150	435	339,37	381,79
110.2.2 - 110.2.1	12063,46	13825,20	18348,38	96,30	192,60	60,19	70	245	191,14	215,03
110.3.1 - 110.2.4	22929,36	24524,96	33574,23	176,22	352,44	110,14	120	368	287,10	322,99
110.2.4 - 110.2.5	24545,41	26908,81	36421,99	191,17	382,34	119,48	120	368	287,10	322,99
110.2.5 - 110.2.6	10275,75	12335,22	16054,55	84,26	168,52	52,66	70	245	191,14	215,03
110.3.1 - 110.2.9	26975,54	42030,43	49942,33	262,13	524,26	163,83	150	435	339,37	381,79
110.2.9 - 110.2.8	18272,83	28307,70	33693,06	176,84	353,68	110,53	120	368	287,10	322,99
110.2.8 - 110.2.7	9570,12	14584,97	17444,44	91,56	183,12	57,23	70	245	191,14	215,03
110.3.1 - 110.2.10	37013,07	30606,81	48028,58	252,08	504,16	157,55	150	435	339,37	381,79
110.2.10 - 110.2.11	28396,49	21965,99	35900,77	188,43	376,86	117,77	120	368	287,10	322,99
110.2.11 - 110.2.12	14083,06	12029,56	18521,42	97,21	194,42	60,76	70	245	191,14	215,03

Таблица 7 – Потери напряжения

2 × КЛ	P_p	Q_p	S_p	F_H	r_i	x_i	l	ΔU_p	$\Delta U_{па}$
	кВт	квар	кВА	мм ²	Ом/км	Ом/км	м	%	%
110.3.1 - 110.2.3	30325,59	42628,21	52314,49	95	0,032	0,074	1767	3,31%	6,62%
110.2.3 - 110.2.2	25107,84	34398,78	42587,32	150	0,020	0,071	231	0,62%	1,24%
110.2.2 - 110.2.1	12063,46	13825,20	18348,38	70	0,043	0,076	231	0,33%	0,66%
110.3.1 - 110.2.4	22929,36	24524,96	33574,23	120	0,025	0,073	815	1,75%	3,50%
110.2.4 - 110.2.5	24545,41	26908,81	36421,99	120	0,025	0,073	871	2,04%	4,08%
110.2.5 - 110.2.6	10275,75	12335,22	16054,55	70	0,043	0,076	191	0,24%	0,48%
110.3.1 - 110.2.9	26975,54	42030,43	49942,33	150	0,020	0,071	1457	4,67%	9,34%
110.2.9 - 110.2.8	18272,83	28307,70	33693,06	120	0,025	0,073	231	0,53%	1,06%
110.2.8 - 110.2.7	9570,12	14584,97	17444,44	70	0,043	0,076	231	0,32%	0,64%
110.3.1 - 110.2.10	37013,07	30606,81	48028,58	150	0,020	0,071	705	1,87%	3,74%
110.2.10 - 110.2.11	28396,49	21965,99	35900,77	120	0,025	0,073	1201	2,53%	5,06%
110.2.11 - 110.2.12	14083,06	12029,56	18521,42	70	0,043	0,076	721	1,00%	2,00%

«Из таблиц видно, что потери напряжения в воздушных линиях не превышают допустимые (5%) и предельно-допустимые (10%)» [12].

2.3 Расчет токов КЗ и выбор коммутационного оборудования

Составим схему замещения (рисунок 2).

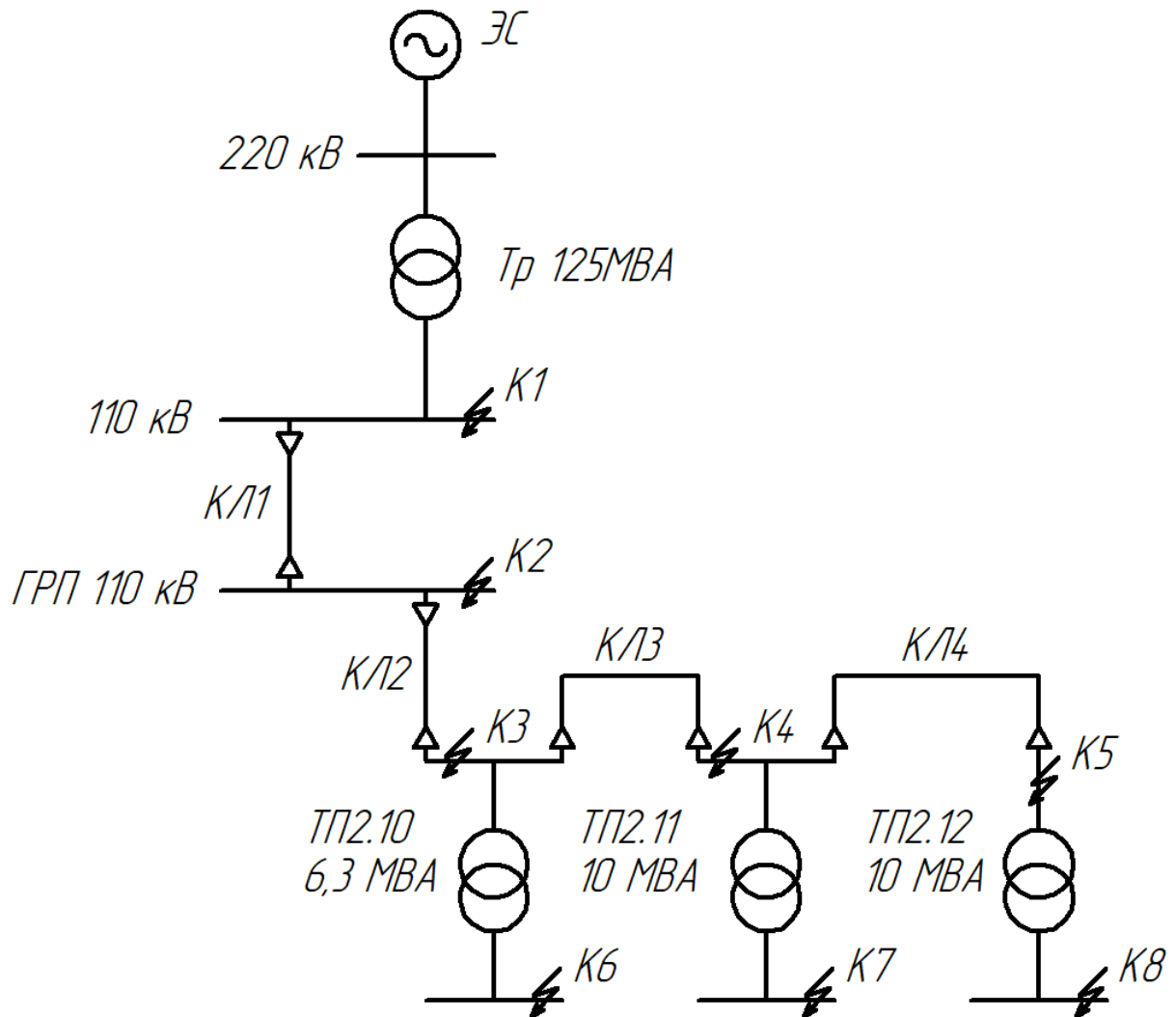


Рисунок 2 – Расчетная схема

Составим схему замещения (рисунок 3).

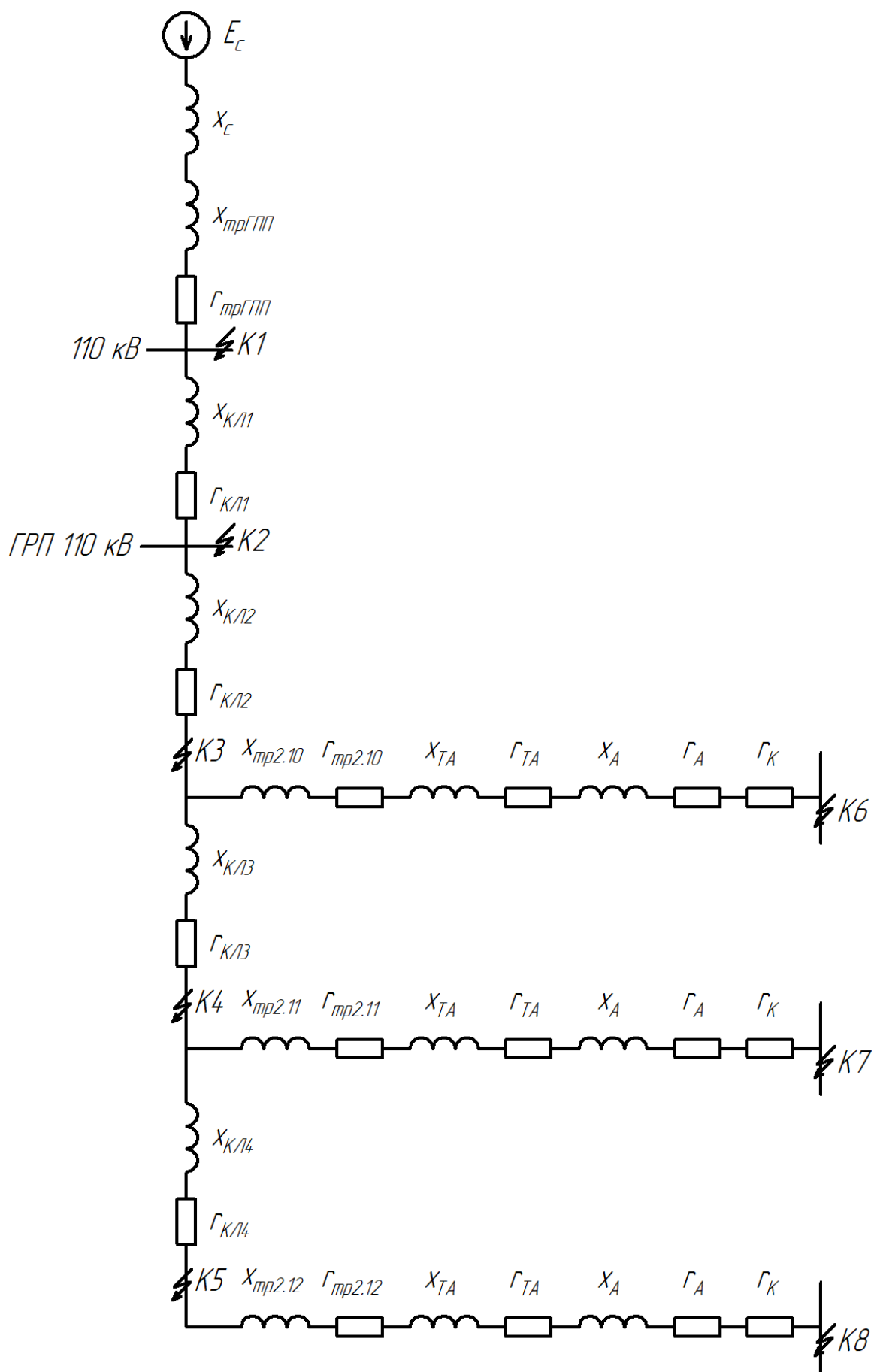


Рисунок 3 – Схема замещения

«Проведем расчет в относительных единицах» [19].

«Сопротивление силового трансформатора базисное в относительных единицах:

$$x_{*тр(б)} = \frac{u_k \% \cdot S_б}{100 \cdot S_{тр}}. \quad (17)$$

Сопротивление линии базисное в относительных единицах:

$$x_{*л(б)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_H^2}. \quad (18)$$

где U_H – напряжение рассматриваемого участка цепи, кВ.

Расчет активных сопротивлений с использованием перерасчета реактивных сопротивлений.

Базисный ток ступени:

$$I_{*б} = \frac{S_б}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (19)$$

Полный сверхпереходный ток:

$$I'' = I_{*(б)}'' \cdot I_{*б} = \frac{E_{*(б)}}{x_{*\Sigma}} \cdot I_{*б}. \quad (20)$$

Рассчитаем токи в именованных единицах на стороне до 1 кВ» [2],[5].

«Сопротивление линии:

$$x_l = x_0 \cdot l, \quad (21)$$

$$r_l = r_0 \cdot l. \quad (22)$$

Сопротивления трансформатора:

$$r_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тр}}^2} \cdot 10^6, \quad (23)$$

$$x_{\text{тр}} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{100 \cdot P_{\text{кз}}}{S_{\text{тр}}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{т}}} \cdot 10^4. \quad (24)$$

Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ без учета подпитки от электродвигателей:

$$I_{n0} = \frac{U_{\text{нн}}}{\sqrt{3 \cdot (r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2)}}. \quad (25)$$

Угол сдвига по фазе напряжения (ЭДС источника) и периодической составляющей тока КЗ:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} \right). \quad (26)$$

Время от начала КЗ до появления ударного тока:

$$t_{\text{уд}} = 0,01 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi}{\pi}. \quad (27)$$

Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ:

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma} \cdot \omega_c}. \quad (28)$$

Ударный коэффициент:

$$K_{уд} = \left(1 + \sin\varphi \cdot e^{\frac{-t_{уд}}{T_a}} \right). \quad (29)$$

Ударный ток КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I''. \quad (30)$$

Результаты расчетов токов КЗ представлены в таблице 8» [2].

«На их основе далее будет обоснован выбор токоведущих элементов и коммутационных аппаратов по рабочему току и предельной коммутационной способности» [19].

Поскольку реконструкция осуществляется для ПС 220/110 кВ, то на стороне ниже 1 кВ расчет токов КЗ не требуется.

Таблица 8 – Расчет токов КЗ

Точка	Элемент цепи	$U_{н.ср}$	S	l	u_k	$r^{*(б)}$	$x^{*(б)}$	I''	T_a	φ	$t_{уд}$	$K_{уд}$	$i_{уд}$
		кВ	МВА	м	%	о.е.	о.е.	кА	10^{-3} с	рад	10^{-3} с	—	кА
К-1	Система	230	7000	—	—	0,004	0,143	—	—	—	—	—	—
	ВЛ от системы до ГПП	230	—	141000	—	0,200	0,800	—	—	—	—	—	—
	ГПП	230/115	125	—	3	0,014	0,240	—	—	—	—	—	—
	Итого	115	—	—	—	0,218	1,183	4,174	275,054	1,389	9,421	1,950	11,511
К-2	ВЛ (ГПП-ГРП)	115	—	81000	—	0,459	1,837	—	—	—	—	—	—
	Итого	115	—	—	—	0,677	3,020	1,622	226,104	1,350	9,297	1,936	4,441
К-3	ВЛ (ГРПЗ.1-ТП2.10)	115	—	705	—	0,003	0,013	—	—	—	—	—	—
	Итого	115	—	—	—	0,680	3,033	1,615	226,076	1,350	9,297	1,936	4,422
К-4	ВЛ (ТП2.10-ТП2.11)	115	—	1201	—	0,006	0,023	—	—	—	—	—	—
	Итого	115	—	—	—	0,686	3,056	1,603	225,798	1,350	9,297	1,936	4,389
К-5	ВЛ (ТП2.11-ТП2.12)	115	—	721	—	0,004	0,014	—	—	—	—	—	—
	Итого	115	—	—	—	0,690	3,070	1,596	225,517	1,350	9,297	1,936	4,370
К-6	Приведенное сопротивление точки КЗ	10,5	—	—	—	5,669	25,285	—	—	—	—	—	—
	ТП2.10	115/10,5	0,63	0,0076	5,5	2111,111	9390,625	—	—	—	—	—	—
	ТТ	10,5	—	—	—	0,340	0,150	—	—	—	—	—	—

Продолжение таблицы 8

Точка	Элемент цепи	$U_{н.ср}$	S	l	u_k	$r^*(б)$	$x^*(б)$	I''	T_a	φ	$t_{уд}$	$K_{уд}$	$i_{уд}$
		кВ	МВА	м	%	о.е.	о.е.	кА	10^{-3} с	рад	10^{-3} с	—	кА
К-6	Контакт	10,5	—	—	—	14,500	—	—	—	—	—	—	—
	Катушка выключателя	10,5	—	—	—	0,055	0,040	—	—	—	—	—	—
	Итого	10,5	—	—	—	2131,675	9416,100	0,628	223,893	1,348	9,291	1,936	1,719
К-7	Приведенное сопротивление точки К4	10,5	—	—	—	5,719	25,476	—	—	—	—	—	—
	ТП2.11	115/10,5	1	0,0097	5,5	1069,425	5968,701	—	—	—	—	—	—
	ТТ	10,5	—	—	—	0,340	0,150	—	—	—	—	—	—
	Контакт	10,5	—	—	—	14,500	—	—	—	—	—	—	—
	Катушка выключателя	10,5	—	—	—	0,055	0,040	—	—	—	—	—	—
	Итого	10,5	—	—	—	1090,039	5994,367	0,995	278,735	1,391	9,428	1,951	2,745
К-8	Приведенное сопротивление точки К4	10,5	—	—	—	5,752	25,593	—	—	—	—	—	—
	ТП2.12	115/10,5	1	0,0097	5,5	1069,425	5968,701	—	—	—	—	—	—
	ТТ	10,5	—	—	—	0,340	0,150	—	—	—	—	—	—
	Контакт	10,5	—	—	—	14,500	—	—	—	—	—	—	—
	Катушка выключателя	10,5	—	—	—	0,055	0,040	—	—	—	—	—	—
	Итого	10,5	—	—	—	1090,072	5994,484	0,995	278,732	1,391	9,428	1,951	2,745

Выберем электрооборудование по расчетным параметрам.

«Ток термической стойкости точки КЗ:

$$B_{\text{kt}} = I_{n0}^2 (T_a + t_{\text{п.в}}), \quad (31)$$
$$B_{\text{kt}} = 4,174^2 \cdot (275,054 + 30) \cdot 10^{-3} = 5,315 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем время действия релейной защиты:

$$\sigma = t_{\text{рз}} + t_{\text{сво}}, \quad (32)$$
$$\sigma = 0,01 + 0,04 = 0,05 \text{ с},$$

где $t_{\text{рз}}$ – время срабатывания релейной защиты, с;

$t_{\text{сво}}$ – время срабатывания выключателя на отключение, с» [14].

«Максимальное значение аperiodической составляющей тока КЗ:

$$i_{\text{а}\sigma} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot e^{\frac{-0,05}{T_a}}, \quad (33)$$
$$i_{\text{а}\sigma} = \sqrt{2} \cdot 4,174 \cdot 2,72^{\frac{-0,05}{275,054}} = 5,902 \text{ кА}.$$

Номинальное значение аperiodической составляющей:

$$i_{\text{ан}} = \sqrt{2} \cdot I_{\mu} \cdot (1 + e^{-22,5 \cdot \sigma}), \quad (34)$$
$$i_{\text{ан}} = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot (1 + 2,72^{-22,5 \cdot 0,05}) = 74,934 \text{ кА},$$

где I_{μ} – ток отключения выключателя, кА» [1],[14].

Выбор оборудования представлен в таблице 9 [1],[10],[18].

Таблица 9 – Проверка параметров оборудования

Точ ка	$r^{*(6)}$	$x^{*(6)}$	I''	T_a	φ	$t_{уд}$	$K_{уд}$	$i_{уд}$	B_{kt}	$i_{a\sigma}$	I_μ	$i_{ан}$	I_p	$I_{па}$	Электрообору дование
	о.е.	о.е.	кА	10^{-3} с	рад	10^{-3} с	—	кА	кА ² с	кА	кА	кА	А	А	
К-1	0,218	1,183	4,174	275,05 4	1,389	9,421	1,950	11,511	5,315	5,902	40	74,934	252,08	504,16	ВГТ-110/2000 РГП-110/2000 ТОГФ-110/600
К-2	0,677	3,020	1,622	226,10 4	1,350	9,297	1,936	4,441	0,674	2,293	40	74,934	252,08	504,16	
К-3	0,680	3,033	1,615	226,07 6	1,350	9,297	1,936	4,422	0,668	2,283	40	74,934	252,08	504,16	
К-4	0,686	3,056	1,603	225,79 8	1,350	9,297	1,936	4,389	0,657	2,266	40	74,934	188,43	376,86	ВГТ-110/2000 РГП-110/2000 ТОГФ-110/400
К-5	0,690	3,070	1,596	225,51 7	1,350	9,297	1,936	4,370	0,651	2,257	40	74,934	97,21	194,42	ВГТ-110/2000 РГП-110/2000 ТОГФ-110/200
К-6	2131,6 75	9416,1 00	0,628	223,89 3	1,348	9,291	1,936	1,719	0,100	0,888	20	37,467	236,90	473,79	ВВ- TEL10/20/1000 PB3/10/1000 ТОЛ-10/600
К-7	1090,0 39	5994,3 67	0,995	278,73 5	1,391	9,428	1,951	2,745	0,306	1,407	20	37,467	393,52	787,04	ВВ- TEL10/20/1000 PB3/10/1000 ТОЛ-10/800
К-8	1090,0 72	5994,4 84	0,995	278,73 2	1,391	9,428	1,951	2,745	0,306	1,407	20	37,467	387,18	774,37	

Для ступени 110 кВ приняты трансформаторы тока ТОГФ-110 [17].

Выводы по разделу

Для электроснабжения предприятия по изготовлению химической продукции принято 12 ТП с трансформаторами мощностью 4000-10000 кВА.

ПС приняты двухтрансформаторными.

«В ходе расчетов было выбрано и проверено оборудование ТП и ГПП:

- элегазовые выключатели ВГТ-110-2000 на стороне 110 кВ;
- разъединители РГП-110-2000 на стороне 110 кВ;
- трансформаторы тока ТОГФ-110 с номинальными токами 200 А, 400 А и 600 А на стороне 110 кВ;
- вакуумные выключатели ВВ/TEL-10-20/1000 на стороне 10 кВ;
- разъединители РВЗ-10/1000 на стороне 10 кВ;
- трансформаторы тока ТОЛ-10 с номинальными токами 600 А и 800 А на стороне 10 кВ» [1],[10],[17],[18].

Выбранное электрооборудование прошло требуемые проверки.

3 Расчет релейной защиты и автоматики

«Основными видами повреждения в трансформаторе являются: замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток; замыкания в обмотках между витками одной фазы (витковые замыкания); замыкания на землю обмоток или их наружных выводов, повреждения магнитопровода трансформатора, приводящие к появлению местного нагрева пожара» [11].

«Максимальное время защиты линий, отходящих от шин НН трансформатора, приравняем к собственному времени отключения выключателей $t_{\text{макс}}=0,03$ с» [8].

Релейную защиту трансформаторов выполним на базе микропроцессорной защиты Сириус-ТЗ.

«Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-ТЗ» предназначено для выполнения функций основной защиты трехобмоточного (либо двухобмоточного с расщепленной обмоткой) трансформатора или автотрансформатора с высшим напряжением 6-220 кВ..

Также возможно использование в качестве дифференциальной защиты сдвоенного реактора, мощного синхронного двигателя или в качестве продольной дифференциальной защиты ошиновки с тремя присоединениями. Содержит подменную МТЗ ВН и МТЗ НН с внешним комбинированным пуском напряжения» [15].

Первичный ток определим по формуле 14:

$$I_{\text{р.ВН}} = \frac{127520}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 2} = 167 \text{ A},$$

$$I_{\text{р.ВН}} = \frac{127520}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2} = 335 \text{ A},$$

Вторичный ток плеч защиты:

$$I_{H2.CT} = \frac{I_{H1.CT}}{K_T}, \quad (35)$$

$$I_{H2.BH} = \frac{167}{400/5} = 2,1 \text{ A},$$

$$I_{H2.HH} = \frac{335}{700/5} = 2,4 \text{ A}.$$

«Ток небаланса:

$$I_{H6.p} = K_{пер} \cdot K_{одн} \cdot \varepsilon + \Delta U_{ppH} + \Delta f_{доб}, \quad (36)$$

$$I_{H6.p} = 2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04 = 0,37 \text{ о. е.},$$

Уставка срабатывания:

$$I_{уст.ср} = K_{отс} \cdot I_{H6.p}, \quad (37)$$

$$I_{уст.ср} = 1,2 \cdot 0,37 = 0,444.$$

Принимаем значение 0,5.

Коэффициент снижения тормозного тока:

$$K_{сн.т} = 1 - 0,5 \cdot I_{H6.p}, \quad (38)$$

$$I_{уст.ср} = 1 - 0,5 \cdot 0,37 = 0,815.$$

Коэффициент торможения:

$$K_{торм} = \frac{100 \cdot K_{отс} \cdot I_{H6.p}}{K_{сн.т}}, \quad (39)$$

$$I_{уст.ср} = \frac{100 \cdot 1,2 \cdot 0,37}{0,815} = 54\%.$$

Расчетный ток максимального внешнего КЗ, приведенный к номинальному току трансформатора:

$$I'_{\text{кз.внеш.макс}} = \frac{I_{\text{кз.внеш.макс}}}{I_{\text{н1}}}, \quad (40)$$

$$I'_{\text{кз.внеш.макс}} = \frac{18616}{328} = 57,$$

где $I_{\text{кз.внеш.макс}}$ – наибольший ток КЗ приведенный к стороне ВН, А» [8].

Расчетные токи КЗ для определения уставки:

$$I_{\text{кз.внеш.макс}} = I'' \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} \right)^2, \quad (41)$$

$$I_{\text{кз.внеш.макс}} = 4,174 \cdot \left(\frac{220}{110} \right)^2 = 16696 \text{ А.}$$

Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{\text{нб}} = K_{\text{отс.р}} \cdot (K_{\text{пер.р}} \cdot K_{\text{одн.р}} \cdot \varepsilon + \Delta U_{\text{рпн.р}} + \Delta f_{\text{доб.р}}) \cdot \frac{I_{\text{кз.внеш.макс}}}{I_{\text{н1}}}, \quad (42)$$

$$I_{\text{нб}} = 1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \cdot \frac{16696}{167} = 70,5.$$

Принимаем значение 70.

Выводы по разделу

Микропроцессорная защита Сириус-ТЗ обеспечивает защиту ПС с требуемой чувствительностью.

4 Расчет молниезащиты

Рассчитаем параметры молниезащиты питающей ПС для химического предприятия.

«Активная высота молниеотвода:

$$\begin{aligned}h_A &= h - h_x, \\h_A &= 30 - 7 = 23,\end{aligned}\tag{43}$$

где h – высота молниеотвода, м;

h_x – высота установки молниеотвода от уровня земли, м» [12].

«Зона защиты молниеотвода:

$$\begin{aligned}r_x &= h_A \cdot \frac{1,60 \cdot P}{1 + h_x/h_A}, \\r_x &= 23 \cdot \frac{1,60 \cdot 1}{1 + 7/30} = 29,838 \text{ м}.\end{aligned}\tag{44}$$

Наибольшая сторона зоны защиты:

$$\begin{aligned}h_0 &= h - \frac{a}{7}, \\h_0 &= 30 - \frac{53}{7} = 22,5 \text{ м},\end{aligned}\tag{45}$$

где a – расстояние между молниеотводами, м» [12].

«Ширина зоны защиты:

$$\begin{aligned}b_x &= 3 \cdot (h_0 - 1,25h_x), \\b_x &= 3 \cdot (22,5 - 1,25 \cdot 7) = 41 \text{ м}.\end{aligned}\tag{46}$$

Изобразим графически зону защиты на рисунке 4» [12].

Система заземления выполнена с помощью металлической сетки.

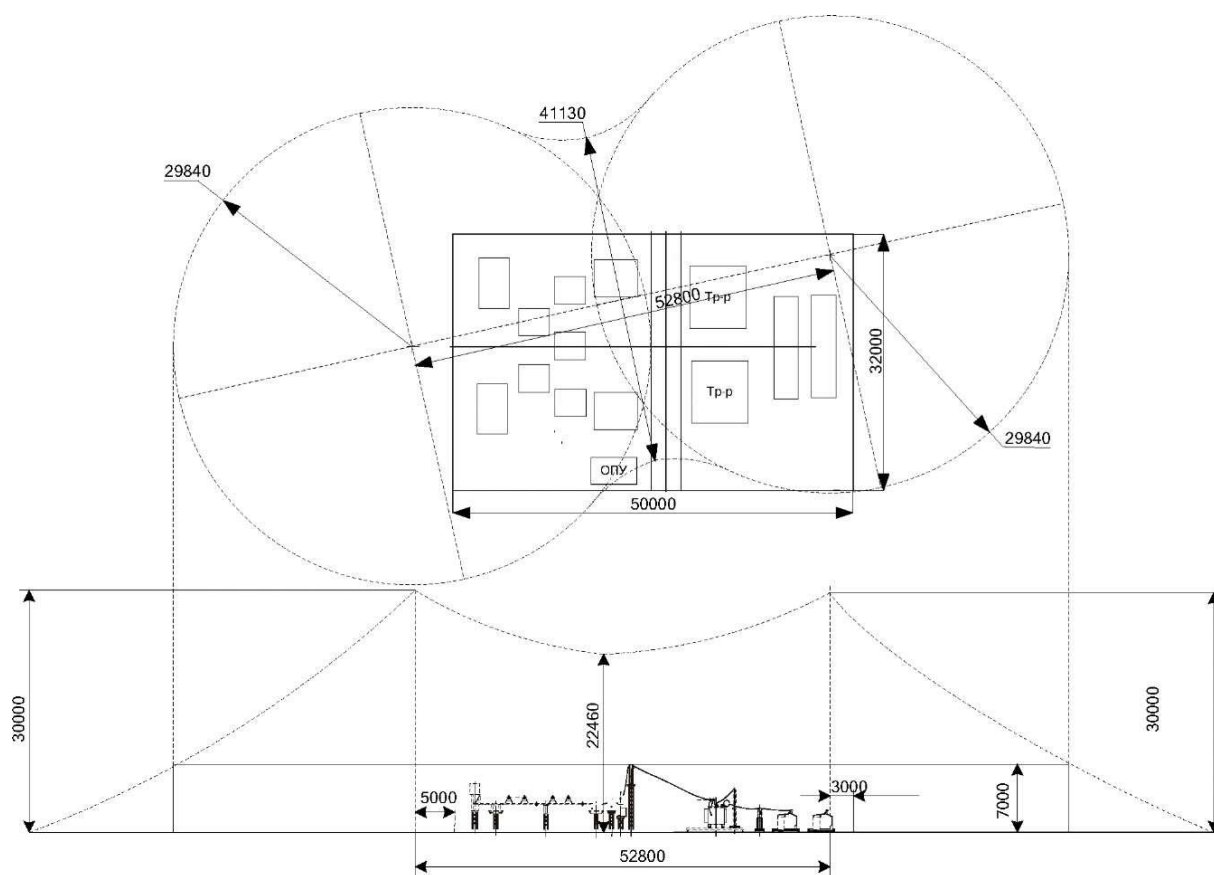


Рисунок 4 – Схема молниезащиты

«Токоведущие части электроустановки не должны быть доступны для случайного прикосновения, а доступные прикосновению открытые и сторонние проводящие части не должны находиться под напряжением, представляющим опасность поражения электрическим током как в нормальном режиме работы электроустановки, так и при повреждении изоляции» [7].

Выводы по разделу

Рассчитанная схема молниезащиты удовлетворяет требованиям электробезопасности.

Заключение

В данной ВКР проведена реконструкция релейной защиты подстанции 220/110 кВ химического предприятия с использованием микропроцессорной защиты.

В качестве исходных данных представлены сведения о потребителях, которые получают электроснабжение от подстанции 220/110 кВ, включая суммарные коэффициенты мощности и спроса, а также план размещения цехов и зданий предприятия. На основе этих данных были определены общие электрические нагрузки для силовой и осветительной сети. Компенсация реактивной мощности осуществляется с помощью конденсаторных батарей.

В соответствии со схемой электроснабжения используются трансформаторы следующих типов: ТДН 10000 110/10 (12 трансформаторов), ТМН 6300 110/10 (10 трансформаторов) и ТМН 4000 110/10 (2 трансформатора). Для питания подстанций с двумя трансформаторами каждая применяется ГПП 220/110 кВ с двумя трансформаторами АДЦТН 125000 220/110.

Расчет потерь напряжения в данной схеме электроснабжения показал, что допустимые потери напряжения в воздушных линиях составляют менее 5%, а предельно допустимые – менее 10%. Для расчета токов КЗ были выбраны восемь расчетных точек на стороне выше 1 кВ (пять на стороне 110 кВ и три на стороне 10 кВ). Наибольший ток КЗ был зафиксирован на стороне 110 кВ, ближе к энергосистеме. Электрооборудование соответствует необходимым параметрам, а релейная защита подстанции реализована на основе микропроцессорной защиты Сириус-ТЗ.

На заключительном этапе были рассчитаны система молниезащиты подстанции 220/110 кВ с двумя трансформаторами АДЦТН 125000 220/110. В результате расчета молниезащиты было принято решение о установке двух молниеотводов, а система заземления выполнена с использованием металлической сетки.

Список используемых источников

1. Выключатель элегазовый колонковый ВГТ-110 [Электронный ресурс] : Официальный сайт поставщика электротехнического оборудования ООО «Курс». URL: <https://zaokurs.ru/katalog/elektrotexnicheskoe-oborudovanie/vyisokovoltное-oborudovanie> (дата обращения: 03.03.2025).
2. «ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением ниже 1 кВ [Электронный ресурс] : утв. приказом от 21.10.1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28249-93> (дата обращения: 03.03.2025).
3. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс] : введен в действие Приказом Росстандарта от 22.07.2013 N 400-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 03.03.2025).
4. ГОСТ 55706-2013 Освещение наружное утилитарное. Классификация и нормы (Переиздание) [Электронный ресурс] : утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1360-ст. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105703> (дата обращения: 03.03.2025).
5. ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия [Электронный ресурс] : утв. приказом №60-ст от 09.04.2007. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200050072> (дата обращения: 03.03.2025).
6. ГОСТ Р 55710-2013 Освещение рабочих мест внутри зданий [Электронный ресурс]: утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 N 1364-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105707> (дата обращения: 03.03.2025).
7. Защитные меры в электроустановках [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «РесурсПромАльянс». URL: <https://www.ess-ltd.ru/elektrobezopasnost/zashchitnye-mery-v-elektroinstallatsiyakh/> (дата обращения: 03.03.2025)» [2].

8. Куксин А.В. Релейная защита электроэнергетических систем : учебное пособие / А.В. Куксин. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.

9. «Нерегулируемые конденсаторные установки типа УКЛ(П) [Электронный ресурс]: Официальный сайт ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод». URL: <https://www.ukkz.com/ru/catalog/u-k/visokogo-napryazheniya/modernizirovannye.html> (дата обращения: 03.03.2025).

10. Номенклатурный каталог электрооборудования высокого, среднего и низкого напряжения [Электронный ресурс] : Каталог ПКФ «Автоматика». URL: <http://www.tulaavtomatika.ru/pdf/Nomenkl2014.pdf> (дата обращения: 03.03.2025)» [9].

11. Привалов Е.Е., Ефанов А.В., Ястребов С.С., Ярош В.А. Эксплуатация оборудования электрических подстанций и сетей: учебное пособие. Ставрополь: Изд-во Параграф, 2020. 171 с.

12. «Правила устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. Л.Л. Жданова, Н. В. Олышанская. М.: НЦ ЭНАС, 2013. 104 с.

13. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : интернет-сайт. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-po-poterjam-napryazhenija.html> (дата обращения: 03.03.2025).

14. РТМ 36.18.32.4-92 Указания по расчету электрических нагрузок [Электронный ресурс] : Руководящий технический материал утв. техническим циркуляром ВНИПИ Тяжпромэлектропроект от 30.07.1992 N 359-92. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032239> (дата обращения: 03.03.2025).

15. Сибикин Ю.Д. Современные электрические подстанции : учебное пособие Ю.Д. Сибикин. 2-е изд., доп. Москва : ИНФРА-М, 2023. 417 с.

16. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]: Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 утв. Приказом Минстроя России от 07.11.2016 N 777/пр. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 03.03.2025)» [16].

17. «Трансформатор тока ТОГФ-110 [Электронный ресурс] : ТОО Группа компаний «Savoir Faire». URL: <https://www.sf.kz/index.php/2022-04-13-08-47-46> (дата обращения: 03.03.2025).

18. Трансформаторы тока ТОЛ-10-III [Электронный ресурс] : Официальный сайт ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». URL:» [17] <https://www.cztt.ru/catalog/transformatory-toka/transformatory-toka-naruzhnoy-ustanovki/opornye1/10-kv-1/tol10iii/> (дата обращения: 03.03.2025).

19. «Benthaus M. A Coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. Energy, Sustainability and Society Vol. 9, №1. 2019. p.1-16.

20. Donoso P., Schurch R., Ardila J., Orellana L. Analysis of Partial Discharges in Electrical Tree Growth Under Very Low Frequency (VLF) Excitation Through Pulse Sequence and Nonlinear Time Series Analysis. IEEE Access Vol. 8. 2020. p.673-684.

21. Escrivá-Escrivá G., Roldán-Blay C., Roldán-Porta C., Serrano-Guerrero X. Occasional Energy Reviews from an External Expert Help to Reduce Building Energy Consumption at a Reduced Cost. Energies Vol. 12, №15. 2019. 14 p.

22. Shabdin N.H., Padfield R. Sustainable Energy Transition, Gender and Modernisation in Rural Sarawak. Chemical Engineering Transactions vol.56, 2018. p.259-264.

23. Xiao Han, Jing Qiu, Lingling Sun, Wei Shen, Yuan Ma, Dong Yuan. Low-carbon energy policy analysis based on power energy system modeling. Energy Conversion and Economics. Energy Conversion and Economics. 2020. p.34-44» [20].