

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

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование)

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроснабжение

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Проектирование системы электроснабжения завода композитных материалов

Обучающийся

М. Ю. Федоров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.п.н., доцент, М. Н. Третьякова

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

Тольятти 2025

Аннотация

Темой ВКР является «Проектирование системы электроснабжения завода композитных материалов».

В данной работе рассчитаны электрические нагрузки:

- производственных цехов (стеклопластика, углепластика, органопластика, боропластика, древесно-полимерного композита, бетона с композитными материалами, сэндвич-панелей с использованием композитов, композитной арматуры, эпоксидных композитов с нанонаполнителями, текстолита, гетинакса, полимеров и базальтопластика, керамических композитов, огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани);
- административного здания;
- здание учета тепловой энергии и воды;
- складское отделение и приемка.

Далее выбраны силовые трансформаторы и установки компенсации реактивной мощности, рассчитаны токи короткого замыкания (ТКЗ).

Затем выбрано электрооборудование трансформаторных подстанций (ТП) и главной понизительной подстанции (ГПП) по заводу композитных материалов, кабельные линии (КЛ).

На последнем этапе ВКР проведем расчет заземления и молниезащиты завода.

Содержание

Введение.....	4
1 Анализ исходных данных и расчет электрических нагрузок предприятия ...	6
1.1 Данные о предприятии	6
1.2 Расчет электрических нагрузок	7
1.3 Расчет освещения	14
2 Выбор схемы электроснабжения	21
2.1 Расчет числа и мощности трансформаторов	21
2.2 Технико-экономический расчет схем электроснабжения.....	26
3 Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования	36
3.1 Определение токов короткого замыкания точек цепи	36
3.2 Выбор силового электрооборудования.....	45
4 Расчет заземления и молниезащиты.....	47
Заключение	50
Список используемой литературы и используемых источников.....	51

Введение

Актуальность производства композитных материалов обусловлена их способностью обеспечивать улучшенные характеристики продукции, снижать затраты на производство и эксплуатацию, а также решать задачи, недоступные традиционным материалам. Это делает их ключевым элементом современной промышленности и перспективным направлением развития материаловедения.

Производство композитных материалов играет ключевую роль в развитии высокотехнологичных отраслей государства. На предприятиях по производстве систем кондиционирования и климатических систем производятся товары следующего типа:

- композитные пластмассы (стеклопластик, углепластик, органопластик, боропластика);
- древесно-полимерного композита;
- бетона с композитными материалами;
- сэндвич-панелей с использованием композитов;
- композитной арматуры;
- эпоксидных композитов с нанонаполнителями;
- текстолита;
- гетинакса;
- полимеров и базальтопластика;
- керамических композитов;
- огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани.

Композитные материалы играют огромную роль в современном мире благодаря своим уникальным свойствам. Их польза заключается, прежде всего, в сочетании легкости и прочности, что делает их незаменимыми в авиационной и космической промышленности, где снижение веса конструкции критически важно для экономии топлива и повышения

эффективности. В автомобилестроении композиты помогают создавать более легкие и экономичные автомобили, а также улучшают их безопасность. В строительстве они используются для возведения прочных и долговечных конструкций, устойчивых к коррозии и воздействию окружающей среды. Композитные материалы находят широкое применение в спортивном инвентаре, таком как велосипеды, лыжи и клюшки, обеспечивая высокую производительность и долговечность. В медицине они используются для создания протезов и имплантатов, обладающих биосовместимостью и прочностью. В энергетике композиты востребованы при производстве лопастей ветрогенераторов, позволяя получать экологически чистую энергию. Благодаря своей устойчивости к химическим воздействиям, они применяются в химической промышленности для изготовления резервуаров и трубопроводов. В электротехнике композиты используются в качестве изоляционных материалов. В целом, применение композитных материалов позволяет создавать более легкие, прочные, долговечные и эффективные изделия, что способствует развитию различных отраслей промышленности и повышению качества жизни.

Цель работы: проектирование системы электроснабжения завода по производству композитных материалов.

Данная цель достигается путем решения задач по расчету и выбору электрооборудования для питания цехов и вспомогательных зданий, а также схемы электроснабжения завода.

1 Анализ исходных данных и расчет электрических нагрузок предприятия

1.1 Данные о предприятии

Завод по производству композитных материалов состоит из цехов по производству:

- стеклопластика;
- углепластика;
- органопластика;
- боропластика;
- древесно-полимерного композита;
- бетона с композитными материалами;
- сэндвич-панелей с использованием композитов;
- композитной арматуры;
- эпоксидных композитов с нанонаполнителями;
- текстолита;
- гетинакса;
- полимеров и базальтопластика;
- керамических композитов;
- огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани.

К потребителям собственных нужд завода по производству композитных материалов относятся:

- административное здание;
- складские помещения и цех приема материалов;
- тепловой узел и электрооборудование подачи воды.

На заводе изготавливаются комплектующие композитных материалов, а также оборудование в различных исполнениях.

1.2 Расчет электрических нагрузок

«Воспользуемся методом расчетных коэффициентов и нагрузками электроприемников завода.

Все электроприемники (ЭП) группируются по характерным категориям с одинаковыми коэффициентами использования $K_{\text{И}}$ и мощности. В каждой строке указываются ЭП одинаковой мощности» [17].

«При наличии в справочных материалах интервальных значений $K_{\text{И}}$ следует для расчета принимать наибольшее значение. Значения $K_{\text{И}}$ должны быть определены из условия, что вероятность превышения фактической средней мощности над расчетной для характерной категории ЭП должна быть не более 0,05» [6],[17].

«Для группы, состоящей из ЭП различных категорий (т. е. с разными $K_{\text{И}}$), средневзвешенный коэффициент использования определяется по формуле:

$$K_{\text{Иср}} = \frac{\sum_1^n K_{\text{И}} \cdot P_{\text{Н}}}{\sum_1^n P_{\text{Н}}}, \quad (1)$$

где n – число характерных категорий ЭП, входящих в данную группу;

$P_{\text{Н}}$ – групповая номинальная (установленная) активная мощность» [17].

«Эффективное число электроприемников:

$$n_{\text{Э}} = \frac{(\sum P_{\text{Н}})^2}{\sum n p_{\text{Н}}^2}, \quad (2)$$

где $p_{\text{Н}}$ – номинальная (установленная) мощность одного электроприемника.

Расчетное значение эффективного числа электроприемников округляется до ближайшего меньшего целого числа» [17],[25].

Таблица 1 – Нагрузка завода по производству композитных материалов

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.1	Установка перемешивания эпоксидной смолы	12	13,1	25,1	193	0,55	0,87	0,57	106,15	60,51	—	—	—	—	—	—
	Установка перемешивания полимерной смолы	5	5,1	7,1	28	0,57	0,84	0,65	15,96	10,37	—	—	—	—	—	—
	Отделение по производству полимерной матрицы	2	5,1	7,1	11	0,57	0,84	0,65	6,27	4,08	—	—	—	—	—	—
	Отделение по производству стекловолокна	4	5,1	9,1	24	0,57	0,84	0,65	13,68	8,89	—	—	—	—	—	—
	Смесительная установка	5	5,1	9,1	31	0,27	0,54	1,56	8,37	13,06	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству стеклопластика	28	—	—	287	0,52	0,84	0,64	150,43	96,91	30	1	149,24	95,51	177,19	269
1.2	Тепловой узел и электрооборудование подачи воды	22	5,1	11,1	145	0,71	0,82	0,7	102,95	72,07	22	1	102,95	72,07	125,67	191
1.3	Отделение по обработке углеродных волокон	12	4,1	28,1	121	0,63	0,84	0,65	76,23	49,55	—	—	—	—	—	—
	Участок по производству полимерной матрицы	15	6,1	35,1	200	0,63	0,82	0,7	126	88,2	—	—	—	—	—	—
	Установка заливки смолы	15	6,1	35,1	200	0,16	0,55	1,52	32	48,64	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству углепластика	42	—	—	521	0,45	0,78	0,80	234,23	186,39	36	1	234,45	187,56	300,24	456

Продолжение таблицы 1

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.4	Отделение по обработке арамидных волокон	21	9,1	86,1	595	0,84	0,51	1,69	67,5	114,75	—	—	—	—	—	—
	Участок по производству полимерной матрицы	16	10,1	16,1	186	0,82	0,72	0,96	100	90	—	—	—	—	—	—
	Установка заливки смолы	12	10,1	16,1	139	0,16	0,51	1,69	100	90	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству органопластика	49	—	—	920	0,29	0,67	1,10	267,5	294,75	49	1	266,80	293,48	396,63	603
1.5	Отделение по обработке борных волокон	13	5,1	18,1	109	0,57	0,81	0,72	62,13	44,73	—	—	—	—	—	—
	Отделение по производству полимерной матрицы	30	8,1	13,1	281	0,21	0,61	1,3	59,01	76,71	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству боропластика	43	—	—	390	0,31	0,71	1,00	121,14	121,44	15	1	120,90	120,90	170,98	260
1.6	Отделение обработки древесной муки	8	6,1	24,1	85	0,73	0,73	0,94	62,05	58,33	—	—	—	—	—	—
	Установка по обработке полимерной матрицы	23	15,1	103,1	853	0,33	0,49	1,78	281,49	501,05	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству древесно-полимерного композита	31	—	—	938	0,37	0,52	1,63	343,54	559,38	43	1	347,06	565,71	663,69	1008

Продолжение таблицы 1

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.7	Участок производства фибробетона	29	8,1	108,1	960	0,65	0,82	0,7	624	436,8	—	—	—	—	—	—
	Участок производства полимербетона	59	10,1	52,1	1215	0,17	0,55	1,52	206,5	313,9	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству бетона с композитными материалами	88	—	—	2175	0,38	0,74	0,90	830,5	750,7	47	1	826,5	743,8	1111,94	1689
1.8	Участок обработки облицовочных слоев	95	10,1	182,1	5045	0,81	0,82	0,7	4086,45	2860,52	—	—	—	—	—	—
	Отделение установки утеплителя	60	8,1	66,1	1356	0,36	0,71	0,99	488,1	483,2	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству сэндвич-панелей с использованием композитов	155	—	—	6401	0,71	0,81	0,73	4574,61	3343,8	73	1	4544,71	3317,64	5626,82	8549
1.9	Участок обработки композитных материалов	87	9,1	108,1	2945	0,72	0,76	0,86	2120,4	1823,54	—	—	—	—	—	—
	Формовочный участок	147	10,1	27,1	2109	0,21	0,47	1,88	442,8	832,6	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству композитной арматуры	234	—	—	5054	0,51	0,69	1,04	2563,29	2656,17	45	1	2577,54	2680,64	3718,81	5650

Продолжение таблицы 1

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.10	Установка заливки смолы	97	6,1	121,1	3380	0,65	0,81	0,72	2197	1581,84	—	—	—	—	—	—
	Участок внедрения наночастиц	142	6,1	54,1	2570	0,22	0,56	1,48	565,4	836,79	—	—	—	—	—	—
	Цех эпоксидных композитов с нанонаполнителями	239	—	—	5950	0,46	0,75	0,88	2762,4	2418,63	51	1	2737,00	2408,56	3645,86	5539
1.11	Участок заливки термореактивной смолы	33	8,1	82,1	878	0,71	0,77	0,83	623,38	517,41	—	—	—	—	—	—
	Участок обработки ткани	56	6,1	48,1	930	0,31	0,66	1,14	288,3	328,66	—	—	—	—	—	—
	Формовочный участок	73	8,1	98,1	2234	0,76	0,81	0,72	1697,84	1222,44	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству текстолита	162	—	—	4042	0,65	0,78	0,79	2609,52	2068,51	66	1	2627,30	2075,57	3348,24	5087
1.12	Участок заливки термореактивной смолы	15	8,1	34,1	219	0,68	0,81	0,72	148,92	107,22	—	—	—	—	—	—
	Участок обработки бумаги	7	4,1	5,1	30	0,23	0,62	1,27	6,9	8,76	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству гетинакса	22	—	—	249	0,63	0,80	0,74	155,82	115,98	17	1,16	181,97	134,66	226,38	344

Продолжение таблицы 1

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.13	Административное здание	35	6,1	64,1	721	0,51	0,51	1,69	367,7 1	621,4 3	35	1	367,7 1	621,4 3	722,0 7	1097
1.14	Складские помещения и цех приема материалов	15	5,1	9,1	92	0,73	0,81	0,72	67,16	48,36	15	1	67,16	48,36	82,76	126
1.15	Установка обработки базальтовых волокон	7	5,1	9,1	43	0,55	0,71	0,99	23,65	23,41	—	—	—	—	—	—
	Производственный участок матрицы	17	6,1	9,1	116	0,72	0,47	1,88	83,52	157,0 2	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству полимеров и базальтопластика	24	—	—	159	0,67	0,51	1,68	107,1 7	180,4 3	11	1	106,5 3	178,9 7	208,2 8	316
1.16	Установка обработки керамической матрицы	7	5,1	13,1	50	0,56	0,87	0,57	28	15,96	—	—	—	—	—	—
	Участок армирования керамическими волокнами	27	6,1	11,1	198	0,34	0,47	1,88	67,32	126,5 6	—	—	—	—	—	—
	Формовочный участок	12	5,1	13,1	85	0,33	0,47	1,88	28,05	52,73	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству керамических композитов	46	—	—	333	0,37	0,53	1,58	123,3 7	195,2 5	16	1	123,2 1	194,6 7	230,3 8	350

Продолжение таблицы 1

Потребитель	Наименование цехов и зданий	n	P_{min}	P_{max}	P_H	$K_{и}$	$\cos\varphi$	$tg\varphi$	$K_{и} \cdot P_H$	$K_{и} \cdot P_H \cdot tg\varphi$	$n_{э}$	K_P	P_p	Q_p	S_p	I_p
			кВт	кВт	кВт	—	—	—	кВт	квар	—	—	кВт	квар	кВА	А
1.17	Установка термической обработки	17	6,1	25,1	184	0,66	0,81	0,72	121,44	87,44	—	—	—	—	—	—
	Участок обработки	10	5,1	10,1	64	0,21	0,62	1,27	13,44	17,07	—	—	—	—	—	—
	Цех по производству огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани	27	—	—	248	0,54	0,79	0,77	134,88	104,51	16	1	133,92	103,12	169,02	257
—	—	1262	4,1	182,1	28625	—	—	—	15516	13835	—	—	15515	13843	20925	31792

«В зависимости от средневзвешенного коэффициента использования и эффективного числа электроприемников определяется коэффициент расчетной нагрузки K_p . Коэффициент расчетной мощности необходим для нахождения расчетной активной мощности (таблица 1)» [17].

«Расчетная активная мощность:

$$P_p = K_p \sum K_{\text{и}} P_{\text{н}}, \quad (3)$$

где K_p – коэффициент расчетной мощности;

$K_{\text{и}}$ – коэффициент использования;

$P_{\text{н}}$ – номинальная мощность, кВт» [17].

«По полученному для каждой группы электроприемников значению P_p определяется реактивная нагрузка:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности группы электроприемников» [17].

«Для питающих сетей напряжением до 1 кВ при $n_{\text{э}} \leq 10$, значение расчетной реактивной мощности необходимо умножить на коэффициент 1,1 (п.3.2.8.1)» [17].

1.3 Расчет освещения

«При расчете нагрузок необходимо учитывать нагрузку искусственного внутрицехового освещения завода по производству композитных материалов, а также уличное освещение территории» [24].

«Нагрузку освещения завода по производству композитных материалов рассчитаем по методу удельной мощности:

$$P_{\text{осв}} = F_{\text{осв}} \cdot S_{\text{осв}} \cdot K_{\text{осв}} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где $F_{\text{осв}}$ – площадь освещения, м²;

$S_{\text{осв}}$ – удельная плотность нагрузки на освещение, Вт/м²;

$K_{\text{осв}}$ – коэффициент спроса освещения» [6].

«Минимальная освещенность цехов завода по производству композитных материалов составляет 200 лк» [6].

«Данной освещенности соответствует значение удельной мощности 10 Вт/м². Значения удельной мощности цехов завода по производству композитных материалов представлены в таблице 2» [18].

«Коэффициент мощности устанавливаемых светодиодных светильников составляет 0,96» [9].

«Внешний вид и кривая силы света (КСС) данных светильников представлены на рисунке 1 и 2 соответственно» [4].

Вычисление суммарных электрических нагрузок представлено в таблице 3.

Таблица 2 – Осветительная нагрузка завода по производству композитных материалов

Потребитель	Наименование	F_O	$S_{осв}$	K_C	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_O	Q_O	S_O
		м ²	Вт/м ²	—	—	—	кВт	квар	кВА
1.1	Цех по производству стеклопластика	1230	16,1	0,84	0,96	0,29	16,6	4,8	17,3
1.2	Тепловой узел и электрооборудование подачи воды	824	13,1	0,61	0,96	0,29	6,6	1,9	6,9
1.3	Цех по производству углепластика	782	17,1	0,87	0,96	0,29	11,6	3,4	12,1
1.4	Цех по производству органопластика	7124	13,1	0,63	0,96	0,29	58,8	17,1	61,2
1.5	Цех по производству боропластика	1293	17,1	0,63	0,96	0,29	13,9	4,0	14,5
1.6	Цех по производству древесно-полимерного композита	1069	17,1	0,86	0,96	0,29	15,7	4,6	16,4
1.7	Цех по производству бетона с композитными материалами	6397	16,1	0,96	0,96	0,29	98,9	28,7	103,0
1.8	Цех по производству сэндвич-панелей с использованием композитов	10755	17,1	0,97	0,96	0,29	178,4	51,7	185,7
1.9	Цех по производству композитной арматуры	9969	21,1	0,95	0,96	0,29	199,8	57,9	208,0
1.10	Цех эпоксидных композитов с нанонаполнителями	18373	17,1	0,98	0,96	0,29	307,9	89,3	320,6
1.11	Цех по производству текстолита	9875	17,1	0,96	0,96	0,29	162,1	47,0	168,8
1.12	Цех по производству гетинакса	1615	17,1	0,97	0,96	0,29	26,8	7,8	27,9
1.13	Административное здание	3849	16,1	0,96	0,96	0,29	59,5	17,3	62,0

Продолжение таблицы 2

Потребитель	Наименование	F_o	$S_{осв}$	K_c	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	P_o	Q_o	S_o
		м ²	Вт/м ²	—	—	—	кВт	квар	кВА
1.14	Складские помещения и цех приема материалов	3197	19,1	0,95	0,96	0,29	58,0	16,8	60,4
1.15	Цех по производству полимеров и базальтопластика	733	19,1	0,93	0,96	0,29	13,0	3,8	13,5
1.16	Цех по производству керамических композитов	1748	19,1	0,83	0,96	0,29	27,7	8,0	28,8
1.17	Цех по производству огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани	1154	21,1	0,63	0,96	0,29	17,3	5,4	17,9
Всего		79987	—	—	0,96	0,29	1273	370	1325

Таблица 3 – Общая нагрузка завода по производству композитных материалов

Потребитель	Наименование	P_o	Q_o	S_o	P_p	Q_p	S_p	P'_p	Q'_p	S'_p
		кВт	квар	кВА	кВт	квар	кВА	кВт	квар	кВА
1.1	Цех по производству стеклопластика	16,6	4,8	17,3	149,2	95,5	177,2	165,8	100,3	194,5
1.2	Тепловой узел и электрооборудование подачи воды	6,6	1,9	6,9	103,0	72,1	125,7	109,6	74,0	132,6
1.3	Цех по производству углепластика	11,6	3,4	12,1	234,5	187,6	300,2	246,1	191,0	312,3
1.4	Цех по производству органопластика	58,8	17,1	61,2	266,8	293,5	396,6	325,6	310,6	457,8
1.5	Цех по производству боропластика	13,9	4,0	14,5	120,9	120,9	171,0	134,8	124,9	185,5
1.6	Цех по производству древесно-полимерного композита	15,7	4,6	16,4	347,1	565,7	663,7	362,8	570,3	680,1
1.7	Цех по производству бетона с композитными материалами	98,9	28,7	103,0	826,5	743,9	1111,9	925,4	772,6	1214,9
1.8	Цех по производству сэндвич-панелей с использованием композитов	178,4	51,7	185,7	4544,7	3317,6	5626,8	4723,1	3369,3	5812,5
1.9	Цех по производству композитной арматуры	199,8	57,9	208,0	2577,5	2680,6	3718,8	2777,3	2738,5	3926,8
1.10	Цех эпоксидных композитов с нанонаполнителями	307,9	89,3	320,6	2737,0	2408,6	3645,9	3044,9	2497,9	3966,5
1.11	Цех по производству текстолита	162,1	47,0	168,8	2627,3	2075,6	3348,2	2789,4	2122,6	3517,0

Продолжение таблицы 3

Потребитель	Наименование	P_o	Q_o	S_o	P_p	Q_p	S_p	P'_p	Q'_p	S'_p
		кВт	квар	кВА	кВт	квар	кВА	кВт	квар	кВА
1.12	Цех по производству гетинакса	26,8	7,8	27,9	182,0	134,7	226,4	208,8	142,5	254,3
1.13	Административное здание	59,5	17,3	62,0	367,7	621,4	722,1	427,2	638,7	784,1
1.14	Складские помещения и цех приема материалов	58,0	16,8	60,4	67,2	48,4	82,8	125,2	65,2	143,2
1.15	Цех по производству полимеров и базальтопластика	13,0	3,8	13,5	106,5	179,0	208,3	119,5	182,8	221,8
1.16	Цех по производству керамических композитов	27,7	8,0	28,8	123,2	194,7	230,4	150,9	202,7	259,2
1.17	Цех по производству огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани	15,3	4,4	15,9	133,9	103,1	169,0	149,2	107,5	184,9
Всего		1273	370	1325	15515	13843	20925	16786	14212	22248

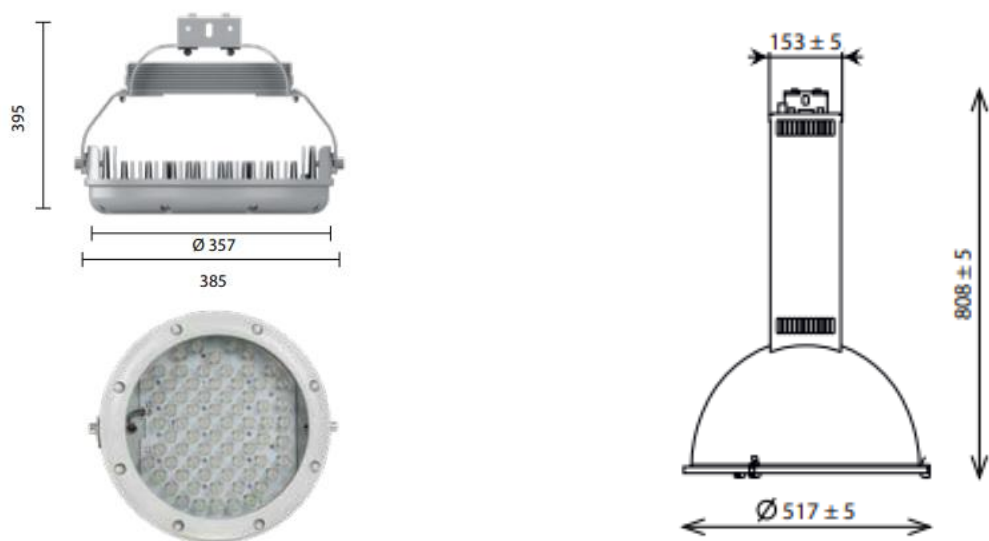
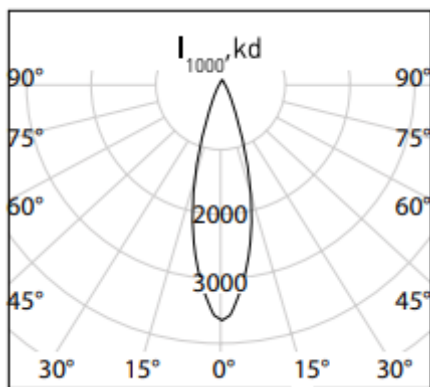
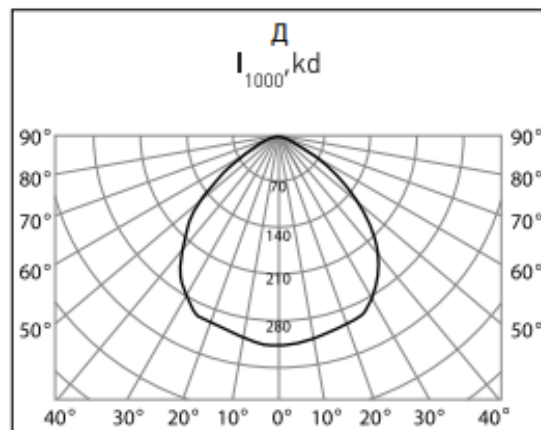


Рисунок 1 – Конструкция светильников



ДСП-100



ДСП-150

Рисунок 2 – КСС светильников

Выводы по разделу.

Завод по производству композитных материалов использует осветительную нагрузку 1325 кВА. Полная расчетная мощность составляет 22248 кВА.

2 Выбор схемы электроснабжения

2.1 Расчет числа и мощности трансформаторов

«Питание цехов завода осуществляется от внешних электросетей напряжением 110 кВ.

Напряжение сети 380/220В при глухозаземленной нейтрали трансформатора. Тип системы заземления TN-C-S» [7].

«Мощность трансформатора для каждой ТП определим по методу удельной плотности нагрузок» [25].

«Удельная мощность:

$$\sigma_{\text{уд}} = \frac{S'_{\text{расч}}}{F_3}, \quad (6)$$
$$\sigma_{\text{уд}} = \frac{22248}{575 \cdot 430} = 0,09 \text{ кВА/м}^2,$$

где $S'_{\text{расч}}$ – полная расчетная мощность цехов завода по производству композитных материалов, кВА;

F_3 – площадь завода по производству композитных материалов, м²» [14].

«Коэффициент загрузки принимается равным 0,7, так как преобладает первая категория надежности» [14].

«Для питания отдельных цехов необходимо использование двух и более подстанций. Во время аварийных ситуаций рабочие трансформаторы должны покрывать 40% перегрузку во время отключения одного из трансформаторов» [14],[26].

«Для электроснабжения потребителей завода по производству композитных материалов требуется принять к установке девять ТП с двумя трансформаторами мощностью 1250 кВА» [14].

«Для снижения доли реактивной нагрузки необходима установка конденсаторных батарей. Теперь проведем расчет их мощности» [24].

«Мероприятия по компенсации реактивной мощности и расстановка компенсирующих устройств должны решаться в увязке со схемой электроснабжения всего завода, требованиями электроснабжающей организации и на основе технико-экономического расчета» [13].

«Наибольшая реактивная мощность Q , которая может быть передана в сеть напряжением до 1 кВ из сети 6-10 кВ без увеличения числа трансформаторов:

$$Q = \sqrt{(1,1 \cdot N \cdot k_{з.тр} \cdot S_{тр})^2 - P'_{расч}{}^2}, \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{(1,1 \cdot 18 \cdot 0,7 \cdot 1250)^2 - 16786^2} = 4289 \text{ квар.}$$

где $P'_{расч}$ – активная нагрузка с учетом освещения, кВт;

$S_{тр}$ – мощность трансформатора, кВА.

Мощность одной конденсаторной батареи:

$$Q_{бк.сум} = \sum Q'_{расч} - Q, \quad (8)$$

$$Q_{бк.сум} = 14212 - 4289 = 9924 \text{ квар,}$$

$$Q_{бк} = \frac{Q_{бк.сум}}{N}, \quad (9)$$

$$Q_{бк} = \frac{9924}{18} = 551 \text{ квар.}$$

где $Q'_{расч}$ – реактивная нагрузка с учетом освещения, квар.

Смонтируем на ТП завода по производству композитных материалов УКРМ-0,4-600-50. Суммарная мощность УКРМ составляет 10800 квар» [11],[12].

«Согласно методике расчета по удельной плотности нагрузки, необходимо определить центры электрических нагрузок (ЦЭН)» [23].

«Правильный выбор места расположения источников питания имеет большое значения для построения рациональной распределительной сети. ПС всех мощностей, напряжений и токов должны быть максимально приближены к ЦЭН, подключаемых к ним. Это обеспечивает наилучшие технико-экономические показатели по расходу проводниковых материалов, потерям электроэнергии в распределительной сети, т.е. обеспечивает минимум производственных затрат. Чтобы выбрать наиболее выгодный вариант размещения ПС на территории предприятия, строят картограммы нагрузок» [21].

«ЦЭН завода:

$$x_{\text{ц}} = \frac{\sum S_i x_i}{S_i}, y_{\text{ц}} = \frac{\sum S_i y_i}{S_i}, \quad (10)$$

где S – нагрузка i -го потребителя, кВА;

x_i, y_i – координаты ЦЭН i -го потребителя» [26].

«Радиус окружностей картограммы электрических нагрузок:

$$r_i = \sqrt{S/\pi \cdot m}, \quad (11)$$

где S – расчетная нагрузка i -го потребителя, кВА;

m – масштаб для определения площади окружности (примем равным 0,7)» [26].

«Синхронные и асинхронные электродвигатели подключены к шинам ГПП с напряжением 10 кВ. Принципиальная схема подключения представлена на рисунке 2.

Коэффициенты загрузки трансформаторов необходимо вычислить с учетом компенсации. Рассчитанные коэффициенты загрузки представлены в таблице 4. При питании потребителя от нескольких ТП, учитывается отключение только одного трансформатора» [12].

Таблица 4 – ЦЭН завода по производству композитных материалов

Потребитель	Наименование	P_p	Q_p'	$Q_{УКРМ}$	S_p''	x_i	y_i	k_3	r_i
		кВт	квар	квар	кВА	м	м	—	м
ТП-2.1		1344,7	1371,1	2×600	1344,764	237	488	0,67	—
1.1	Цех по производству стеклопластика	165,8	100,3	—	194,5	195	575	—	9,4
1.2	Тепловой узел и электрооборудование подачи воды	109,6	74	—	132,6	125	515	—	7,77
1.3	Цех по производству углепластика	246,1	191	—	312,3	250	535	—	11,92
1.4	Цех по производству органопластика	325,6	310,6	—	457,8	145	455	—	14,43
1.5	Цех по производству боропластика	134,8	124,9	—	185,5	350	485	—	9,18
1.6	Цех по производству древесно-полимерного композита	362,8	570,3	—	680,1	295	460	—	17,59
ТП-2.2, ТП-2.3		4723,1	3369,3	4×600	4723,203	425	390	0,74	—
1.8	Цех по производству сэндвич-панелей с использованием композитов	4723,1	3369,3	—	5812,5	425	390	—	51,41

Продолжение таблицы 4

Потребитель	Наименование	P'_p	Q'_p	$Q_{УКРМ}$	S''_p	x_i	y_i	k_3	r_i
		кВт	квар	квар	кВА	м	м	—	м
ТП-2.4, ТП-2.5		3702,7	3511,1	4×600	3702,85	185	325,08	0,74	—
1.7	Цех по производству бетона с композитными материалами	925,4	772,6	—	1214,9	185	390	—	23,5
1.9	Цех по производству композитной арматуры	2777,3	2738,5	—	3926,8	185	305	—	42,26
ТП-2.6-ТП-2.9		7015,1	5959,9	8×600	7015,183	332	187	0,70	—
1.10	Цех эпоксидных композитов с нанонаполнителями	3044,9	2497,9	—	3966,5	440	225	—	42,47
1.11	Цех по производству текстолита	2789,4	2122,6	—	3517	185	200	—	39,99
1.12	Цех по производству гетинакса	208,8	142,5	—	254,3	535	115	—	10,75
1.13	Административное здание	427,2	638,7	—	784,1	420	115	—	18,88
1.14	Складские помещения и цех приема материалов	125,2	65,2	—	143,2	165	30	—	8,07
1.15	Цех по производству полимеров и базальтопластика	119,5	182,8	—	221,8	235	30	—	10,04
1.16	Цех по производству керамических композитов	150,9	202,7	—	259,2	315	35	—	10,86
1.17	Цех по производству огнестойких композитов на основе фенольной смолы и углеродной ткани	149,2	107,5	—	184,9	425	45	—	9,17

«Выбор схем (магистральные или радиальные) и конструктивного выполнения (воздушные или кабельные) линий 110 кВ и выше определяется технико-экономическими сопоставлениями с учетом особенностей данного предприятия, электрической нагрузки, взаимного расположения районных подстанций в ГПП, ожидаемой перспективы развития существующей схемы электроснабжения, степени загрязненности атмосферы, возможности прокладки линий к ГПП.

Для питания потребителей завода можно использовать следующие схемы:

- радиальная,
- магистральная» [13].

Определим наиболее эффективную схему расчетным путем.

2.2 Технико-экономический расчет схем электроснабжения

Проведем расчет радиальной и магистральной схем с кабелями марки АПвБбШп.

«Расчет токов, возникающих в нормальном и аварийном режимах:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U \cdot n}, \quad (12)$$

где n – количество кабельных линий, участвующих в электроснабжении потребителя» [14].

«Рассчитаем сечение кабельных линий:

$$F = \frac{I}{j} \quad (13)$$

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» [14].

«Для выбранной марки кабеля $j = 1,6 \text{ А/мм}^2$, поскольку принимаем, что число часов использования максимума нагрузки более 5000 часов» [14].

«Длительно допустимый ток:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{справ}} \cdot k_{\text{п}} \cdot k_t \cdot k_{\text{ж}}, \quad (14)$$

где $I_{\text{справ}}$ – допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с пластмассовой изоляцией, прокладываемых в земле, принимаемый по таблице 1.3.7;

$k_{\text{п}}$ – коэффициент прокладки, определяемый по числу кабелей, проложенных в траншее, согласно таблицы 1.3.26. Для двух кабелей принимаем $k_{\text{п}} = 0,9$.

k_t – коэффициент поправки на температуру среды, согласно таблицы 1.3.3 ПУЭ. Принимаем равным $k_t = 1,06$;

$k_{\text{ж}}$ – коэффициент поправки на количество жил. Для четырехжильного кабеля принимаем $k_{\text{ж}} = 0,92$ » [14].

«Резервирование в схеме электроснабжения следует предусматривать так, чтобы все ее элементы, как правило, в рабочем режиме были под нагрузкой, а в послеаварийных режимах использовалась перегрузочная способность электрооборудования и линий электропередач и обеспечивалось функционирование основных производств предприятия» [13].

«При послеаварийном режиме отключен один из кабелей. Поэтому коэффициент прокладки меняет свое значение $k_{\text{п}} = 1$ » [14].

«Расчетные значения допустимых токов радиальной и магистральной схем приведены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Проведем расчет потерь напряжений. Для сетей 10 кВ допустимые потери напряжений составляют не более 5%» [22].

Расчет потерь напряжения важен, поскольку от этого зависит экономическая эффективность электроснабжения потребителей завода.

«Потери напряжения в кабельных линиях определим по следующему выражению:

$$\Delta U = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0)}{U_H} l, \quad (15)$$

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

l – длина КЛ, км;

P , Q – активная и реактивная мощность протекающая через КЛ завода» [16].

«Результаты расчетов потерь радиальной и магистральной схем приведены в таблицах 7 и 8 соответственно, а экономические расчеты схем – в таблицах 9 и 10» [24].

Таблица 5 – Расчет радиальной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	P'_p	Q'_p	S''_p	I_p	$I_{\text{па}}$	F_p	$F_{\text{н}}$	$I_{\text{спр}}$	$I_{\text{д,р}}$	$I_{\text{д,па}}$
		кВт	квар	кВА	А	А	мм ²	мм ²	А	А	А
ТП-3.1-ТП-2.1	2	1344,70	12,70	1344,76	38,82	77,64	24,26	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.2	2	2361,55	1693,92	2906,25	83,90	167,80	52,44	50	193	169,39	188,21
ТП-3.1-ТП-2.3	2	2361,55	1693,92	2906,25	83,90	167,80	52,44	50	193	169,39	188,21
ТП-3.1-ТП-2.4	2	1851,35	17,21	1851,43	53,45	106,90	33,41	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.5	2	1851,35	17,21	1851,43	53,45	106,90	33,41	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.6	2	1753,78	8,38	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.7	2	1753,78	8,38	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.8	2	1753,78	8,38	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33
ТП-3.1-ТП-2.9	2	1753,78	8,38	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33

Таблица 6 – Расчет магистральной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	P'_p	Q'_p	S''_p	I_p	$I_{\text{па}}$	F_p	$F_{\text{н}}$	$I_{\text{спр}}$	$I_{\text{д.р}}$	$I_{\text{д.па}}$
		кВт	квар	кВА	А	А	мм ²	мм ²	А	А	А
ТП-3.1-ТП-2.1	2	6230,38	4728,88	7821,76	225,79	451,58	141,12	150	440	386,18	429,09
ТП-2.1-ТП-2.2	2	4859,28	4282,40	6477,00	186,97	373,94	116,86	95	312	273,84	304,26
ТП-2.2-ТП-2.3	2	3174,63	2618,82	4115,40	118,80	237,60	74,25	70	248	217,66	241,85
ТП-3.1-ТП-2.4	2	7981,03	4081,76	8964,24	258,78	517,56	161,74	185	515	452,01	502,23
ТП-2.4-ТП-2.5	2	6225,48	3440,27	7112,81	205,33	410,66	128,33	150	440	386,18	429,09
ТП-2.5-ТП-2.6	2	4469,93	2775,24	5261,39	151,88	303,76	94,93	95	312	273,84	304,26
ТП-2.6-ТП-2.7	2	2979,95	1850,16	3507,59	101,26	202,52	63,29	70	248	217,66	241,85
ТП-2.7-ТП-2.8	2	1489,98	925,08	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33
ТП-2.3-ТП-2.9	2	1489,98	925,08	1753,80	50,63	101,26	31,64	35	148	129,90	144,33

Таблица 7 – Потери напряжения радиальной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	P'_p	Q'_p	S''_p	F_H	$r_{\text{КЛ}}$	$x_{\text{КЛ}}$	l	ΔU_p	$\Delta U_{\text{па}}$
		кВт	квар	кВА	мм ²	Ом/км	Ом/км	м	%	%
ТП-3.1-ТП-2.1	2	1344,70	12,70	1344,76	35	0,951	0,089	307	1,96%	3,92%
ТП-3.1-ТП-2.2	2	2361,55	1693,92	2906,25	50	0,666	0,088	155	1,33%	2,66%
ТП-3.1-ТП-2.3	2	2361,55	1693,92	2906,25	50	0,666	0,088	176	1,52%	3,04%
ТП-3.1-ТП-2.4	2	1851,35	17,21	1851,43	35	0,951	0,089	255	2,25%	4,50%
ТП-3.1-ТП-2.5	2	1851,35	17,21	1851,43	35	0,951	0,089	156	1,37%	2,74%
ТП-3.1-ТП-2.6	2	1753,78	8,38	1753,80	35	0,951	0,089	156	1,30%	2,60%
ТП-3.1-ТП-2.7	2	1753,78	8,38	1753,80	35	0,951	0,089	79	0,66%	1,32%
ТП-3.1-ТП-2.8	2	1753,78	8,38	1753,80	35	0,951	0,089	79	0,66%	1,32%
ТП-3.1-ТП-2.9	2	1753,78	8,38	1753,80	35	0,951	0,089	79	0,66%	1,32%

Таблица 8 – Потери напряжения магистральной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	P'_p	Q'_p	S''_p	F_H	$r_{\text{КЛ}}$	$x_{\text{КЛ}}$	l	ΔU_p	$\Delta U_{\text{па}}$
		кВт	квар	кВА	мм ²	Ом/км	Ом/км	м	%	%
ТП-3.1-ТП-2.1	2	6230,38	4728,88	7821,76	150	0,222	0,082	307	2,72%	5,44%
ТП-2.1-ТП-2.2	2	4859,28	4282,40	6477,00	95	0,351	0,085	15	0,16%	0,32%
ТП-2.2-ТП-2.3	2	3174,63	2618,82	4115,40	70	0,476	0,087	156	1,36%	2,72%
ТП-3.1-ТП-2.4	2	7981,03	4081,76	8964,24	185	0,180	0,081	76	0,67%	1,34%
ТП-2.4-ТП-2.5	2	6225,48	3440,27	7112,81	150	0,222	0,082	105	0,87%	1,74%
ТП-2.5-ТП-2.6	2	4469,93	2775,24	5261,39	95	0,351	0,085	157	1,42%	2,84%
ТП-2.6-ТП-2.7	2	2979,95	1850,16	3507,59	70	0,476	0,087	205	1,62%	3,24%
ТП-2.7-ТП-2.8	2	1489,98	925,08	1753,80	35	0,951	0,089	26	0,19%	0,38%
ТП-2.3-ТП-2.9	2	1489,98	925,08	1753,80	35	0,951	0,089	26	0,19%	0,38%

Таблица 9 – Стоимость монтажа радиальной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	$P'_{\text{р}}$	$Q'_{\text{р}}$	$S''_{\text{р}}$	$F_{\text{н}}$	l	$p_{\text{к}}$	$C_{\text{кл}}$	$C_{\text{пр}}$	$C_{\text{раз}}$	$C_{\text{з}}$	$C_{\text{сум}}$
		кВт	квар	кВА	мм ²	м	руб/м	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб
ТП-3.1-ТП-2.1	2	1344,70	12,70	1344,76	35	307	445	273,23	141,22	89,03	55,26	558,74
ТП-3.1-ТП-2.2	2	2361,55	1693,92	2906,25	50	155	520	161,20	71,30	44,95	27,90	305,35
ТП-3.1-ТП-2.3	2	2361,55	1693,92	2906,25	50	176	520	183,04	80,96	51,04	31,68	346,72
ТП-3.1-ТП-2.4	2	1851,35	17,21	1851,43	35	255	445	226,95	117,30	73,95	45,90	464,10
ТП-3.1-ТП-2.5	2	1851,35	17,21	1851,43	35	156	445	138,84	71,76	45,24	28,08	283,92
ТП-3.1-ТП-2.6	2	1753,78	8,38	1753,80	35	156	445	138,84	71,76	45,24	28,08	283,92
ТП-3.1-ТП-2.7	2	1753,78	8,38	1753,80	35	79	445	70,31	36,34	22,91	14,22	143,78
ТП-3.1-ТП-2.8	2	1753,78	8,38	1753,80	35	79	445	70,31	36,34	22,91	14,22	143,78
ТП-3.1-ТП-2.9	2	1753,78	8,38	1753,80	35	79	445	70,31	36,34	22,91	14,22	143,78
Итого:	—	—	—	—	—	—	—	1333,03	663,32	418,18	259,56	2674,09

Таблица 10 – Стоимость монтажа магистральной схемы

Линия	$n_{\text{КЛ}}$	P'_p	Q'_p	S''_p	F_H	l	p_k	$C_{\text{кл}}$	$C_{\text{пр}}$	$C_{\text{раз}}$	C_z	$C_{\text{сум}}$
		кВт	квар	кВА	мм ²	м	руб/м	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб	тыс.руб
ТП-3.1-ТП-2.1	2	6230,38	4728,88	7821,76	150	307	1020	626,28	141,22	89,03	55,26	911,79
ТП-2.1-ТП-2.2	2	4859,28	4282,40	6477,00	95	15	745	22,35	6,90	4,35	2,70	36,30
ТП-2.2-ТП-2.3	2	3174,63	2618,82	4115,40	70	156	620	193,44	71,76	45,24	28,08	338,52
ТП-3.1-ТП-2.4	2	7981,03	4081,76	8964,24	185	76	1195	181,64	34,96	22,04	13,68	252,32
ТП-2.4-ТП-2.5	2	6225,48	3440,27	7112,81	150	105	1020	214,20	48,30	30,45	18,90	311,85
ТП-2.5-ТП-2.6	2	4469,93	2775,24	5261,39	95	157	745	233,93	72,22	45,53	28,26	379,94
ТП-2.6-ТП-2.7	2	2979,95	1850,16	3507,59	70	205	620	254,20	94,30	59,45	36,90	444,85
ТП-2.7-ТП-2.8	2	1489,98	925,08	1753,80	35	26	445	23,14	11,96	7,54	4,68	47,32
ТП-2.3-ТП-2.9	2	1489,98	925,08	1753,80	35	26	445	23,14	11,96	7,54	4,68	47,32
Итого:	—	—	—	—	—	—	—	1772,32	493,58	311,17	193,14	2770,21

«Рассчитанные схемы соответствуют требованиям, касаемых допустимых потерь напряжения» [3].

«Расходы на монтаж кабельных сетей состоят из стоимости кабельной продукции и монтажных работ. Капиталовложения необходимые для прокладки кабельных сетей:

$$C_{\text{сум}} = C_{\text{кл}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{раз}} + C_{\text{з}} = (K_{\text{кл}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{раз}} + K_{\text{з}}) \cdot l \quad (16)$$

где $K_{\text{кл}}$ – стоимость закупки погонного метра кабеля, руб/м;

$K_{\text{пр}}$ – стоимость прокладки погонного метра кабеля, руб/м;

$K_{\text{раз}}$ – стоимость разработки грунта для траншеи, руб/м;

$C_{\text{з}}$ – стоимость засыпки, руб/м» [10],[19].

Выводы по разделу.

Электроснабжение завода по производству композитных материалов будет осуществляться с помощью девяти ТП с 2×ТМГ-1250/10/0,4 и конденсаторные батареи 2×600 квар по радиальной схеме.

3 Расчет токов короткого замыкания и выбор оборудования

3.1 Определение токов короткого замыкания точек цепи

«Мощность трехфазного короткого замыкания сети с $S_c=4000$ МВА. Базисное напряжение $U_6=10,5$ кВ, базисная мощность $S_6=1000$ МВА» [5].
Схема ГПП представлена на рисунке 3.

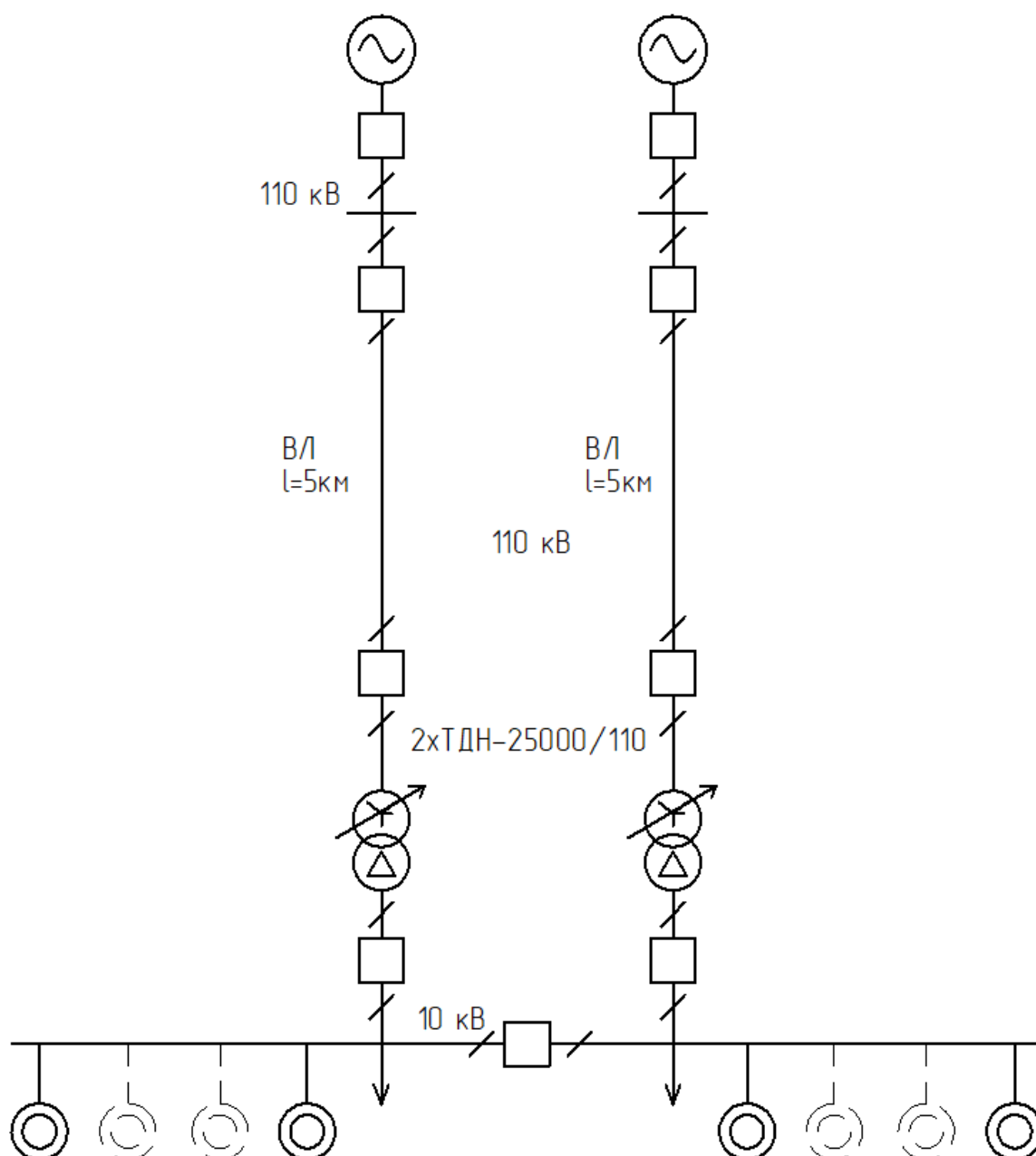


Рисунок 3 – Схема ГПП

Отразим схему замещения ГПП (рисунок 4).

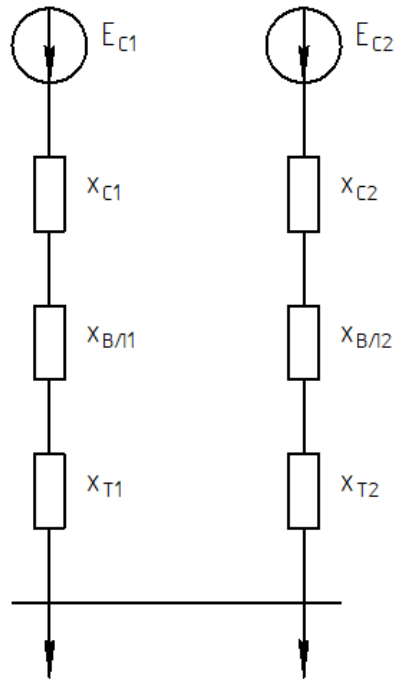


Рисунок 4 – Схема замещения

«Базисный ток ступеней напряжения 10 кВ и 110 кВ:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}, \quad (17)$$

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

$$I_6 = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}.$$

Мощность трансформаторов ГПП с учетом перегрузки:

$$S_{\text{тр.гпп}} = \frac{S''_{\text{расч}}}{0,7 \cdot n_{\text{тр}}}, \quad (18)$$

$$S_{\text{тр.гпп}} = \frac{34985,99}{0,7 \cdot 2} = 24990 \text{ МВА}.$$

где $S''_{\text{расч}}$ – полная мощность с учетом компенсации, кВА.

$n_{\text{тр}}$ – количество трансформаторов.

В результате расчета выбираем 2×ТДН-25000/110, коэффициент загрузки $k_3 = 0,69$ » [2].

«Каждый из трансформаторов ГПП подключим через провод АС150/24 длиной 20 км» [10].

«Сопротивление воздушной линии (ВЛ) в Ом:

$$r_{\text{ВЛ}} = r_{\text{уд}} \cdot l_{\text{ВЛ}}, \quad (19)$$

$$r_{\text{ВЛ}} = 0,204 \cdot 20 = 4,08 \text{ Ом},$$

где $r_{\text{уд}}$ – удельное сопротивление ВЛ, Ом/км;

$l_{\text{ВЛ}}$ – длина ВЛ, км.

Сопротивление ВЛ в о.е.:

$$x_{\text{бВЛ}} = r_{\text{ВЛ}} \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ВН}}^2}, \quad (20)$$

$$x_{\text{бВЛ}} = 4,08 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,3085 \text{ о.е.},$$

где $U_{\text{ВН}}$ – напряжение ВЛ, кВ.

Сопротивление системы в о.е.:

$$x_{\text{бс}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{с}}}, \quad (21)$$

$$x_{\text{бс}} = \frac{1000}{1500} = 0,6667 \text{ о.е.}$$

Сопротивление трансформатора:

$$x_{\text{бТ}} = \frac{S_{\text{б}} U_k}{100 \cdot S_{\text{ТР}}}, \quad (22)$$

$$x_{\text{бТ}} = \frac{1000 \cdot 10,5}{100 \cdot 25} = 4,2 \text{ о.е.},$$

где U_k – напряжение короткого замыкания (КЗ), %.

Эквивалентное сопротивление схемы:

$$x_{бэ} = \frac{x_{бс} + x_{бвл} + x_{бт}}{2}, \quad (23)$$

$$x_{бэ} = \frac{0,6667 + 0,3085 + 4,200}{2} = 2,5876 \text{ о.е.}$$

В итоге принимаем, что ЭДС $E_{вн} = E_{г} = 1,0$ о.е., $x_{вн} = 2,59$ о.е. (рисунок 5), для ЭДС двигателя – $E_{дв0} = 1,1$ о.е.» [2],[5].

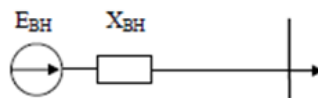


Рисунок 5 – Конечная схема замещения

«Проведем расчет сопротивления от точки КЗ до шин ТП, представив схему на рисунке 6» [2].

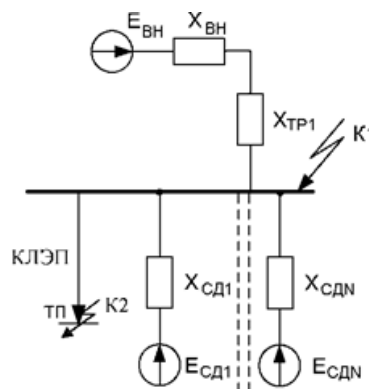


Рисунок 6 – Короткозамкнутая цепь

«Сверхпереходный ток сети внешнего электроснабжения:

$$I''_{вн} = \frac{E''_{вн} I_{б}}{x_{вн} + x_{доп}} = \frac{E''_{вн}}{x_{\Sigma}} \cdot I_{б}, \quad (24)$$

где $x_{доп}$ – сопротивление участка короткозамкнутой цепи.

Получаем $I''_{ВН} = 21,26 \text{ кА}$ [5].

«Эквивалентное сопротивление электродвигателей:

$$x_{дв0} = \frac{1}{\sum \frac{1}{x_{сДi}} + \sum \frac{1}{x_{АДi}}}, \quad (25)$$

$$x_{дв0} = \frac{1}{\frac{1}{92,52} + \frac{1}{52,52} + \frac{1}{7,62} + \frac{1}{94,60}} = 5,84 \text{ о.е.}$$

Сверхпереходный ток с учетом подпитки электродвигателей:

$$I''_{дв0} = \frac{E''_{дв0} I_6}{x_{дв0}}, \quad (26)$$

$$I''_{дв0} = \frac{1,1 \cdot 55}{5,84} = 10,36 \text{ кА.}$$

По итогам проведенных преобразований получаем схему с точкой КЗ между внешними сетями и электродвигателями (рисунок 7).

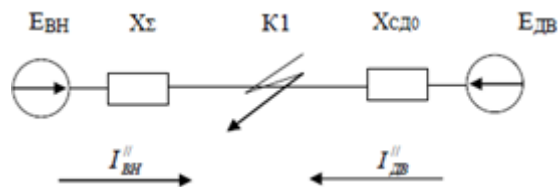


Рисунок 7 – Схема КЗ для точки К1

Сверхпереходное значение трехфазного ТКЗ:

$$I''_{К1} = I''_{ВН} + I''_{дв0}, \quad (27)$$

$$I''_{К1} = I''_{ВН} + I''_{ДВ} = 21,26 + 10,36 = 31,62 \text{ кА.}$$

Ударный ток в точке К1:

$$i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} I''_{ВН} + k_{уд.дв} \sqrt{2} I''_{дв0}, \quad (28)$$

$$i_{уд} = 1,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 21,26 + 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,36 = 52,04 \text{ кА},$$

где $k_{уд}$ и $k_{уд.дв}$ – ударные коэффициенты, определяемые по расчетным кривым» [5].

«Рассчитаем КЗ в точке К2. Кабельная линия 0,4 км, с $x_{КЛ1} = 0,213$ о.е., $r_{КЛ1} = 11,11$ о.е.

ТКЗ в точке К2 равен:

$$I_{n0} = \frac{E_6}{\sqrt{x_{КЛ1}^2 + r_{КЛ1}^2}} \cdot I_6, \quad (29)$$

$$I_{n0} = \frac{1}{\sqrt{0,213^2 + 11,11^2}} \cdot 55 = 4,95 \text{ кА}.$$

Ударный ток:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot K_{уд}, \quad (30)$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 4,95 \cdot 1,5 = 10,501 \text{ кА}.$$

При расчете ТКЗ необходимо учитывать индуктивные и активные сопротивления элементов цепи. Выберем точки К3, К4» [2].

«Сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей примем равными $r_{КВ} = 0,25$ мОм, $x_{КВ} = 0,1$ мОм. Активное сопротивление контактов $r_{К} = 0,1$ мОм. Сопротивление автоматического выключателя $r_{ав} = 0,25$ мОм, $x_{ав} = 0,1$ мОм» [2].

«Сопротивление системы:

$$x_c = \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_c}. \quad (31)$$

Сопротивления трансформатора:

$$r_T = \frac{P_K \cdot U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тр}}^2} \cdot 10^6, \quad (32)$$

$$x_T = \sqrt{U_K^2 - \left(\frac{100 \cdot P_K}{S_{\text{тр}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{тр}}} \cdot 10^4 \text{ ю} \quad (33)$$

Сопротивление цепи до точки КЗ:

$$r_{\text{сумм}} = r_{\text{КЛ2}} + r_T + r_K + r_{\text{ав}} + r_{\text{тт}}, \quad (34)$$

$$x_{\text{сумм}} = x_{\text{КЛ2}} + x_T + x_{\text{ав}} + x_{\text{тт}} + x_c, \quad (35)$$

где $x_{\text{КЛ2}}$ и $r_{\text{КЛ2}}$ – сопротивления кабельной линии» [2],[25].

«Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного ТКЗ без учета подпитки от электродвигателей:

$$I_{n0} = \frac{U_{\text{нн}}}{\sqrt{3 \cdot (r_{\text{сумм2}}^2 + x_{\text{сумм2}}^2)}}. \quad (36)$$

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

$$\varphi = \arctg \left(\frac{x_{\text{сумм2}}}{r_{\text{сумм2}}} \right). \quad (37)$$

Время от начала КЗ до появления ударного тока:

$$t_{уд} = 0,01 \cdot \frac{\frac{\pi}{2} + \varphi}{\pi}. \quad (38)$$

Постоянная времени затухания апериодической составляющей ТКЗ:

$$T_a = \frac{x_{1сумм}}{r_{1сумм} \cdot \omega_c}. \quad (39)$$

Ударный коэффициент:

$$K_{уд} = \left(1 + \sin \varphi \cdot e^{\frac{-t_{уд}}{T_a}} \right). \quad (40)$$

Ударный ток определяется по формуле 30 (таблица 11)» [2].

Таблица 11 – Расчет ТКЗ без учета подпитки электродвигателей

Точка	Элемент цепи	$U_{н.ср}$	S	l	$r^{*(6)}$	$X^{*(6)}$	I_{n0}	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	115	5000	–	0,004	0,200	–	–	–	–	–	–
	ВЛ СЭС-ГПП	115	–	19000	0,108	0,431	–	–	–	–	–	–
	Итого	115	–	–	0,112	0,631	7,834	285,563	1,395	9,440	1,953	21,637
К-2	Приведенное	10,5	–	–	0,934	5,260	–	–	–	–	–	–
	Трансформатор	115/10,5	25	–	0,000	0,001	–	–	–	–	–	–
	Итого	10,5	–	–	0,934	5,261	10,291	285,504	1,395	9,440	1,953	28,423
К-3	КЛ от ГПП до ТП	10,5	–	307	83,537	20,884	–	–	–	–	–	–
	ТТ	10,5	–	–	0,360	0,210	–	–	–	–	–	–
	Контакты	10,5	–	–	15,100	–	–	–	–	–	–	–
	Катушки выключателей	10,5	–	–	0,061	0,046	–	–	–	–	–	–
	Итого	10,5	–	–	99,058	21,140	0,543	10,817	0,210	5,668	1,123	0,862
К-4	КЛ от системы до ГПП	10,5	–	79	28,662	7,166	–	–	–	–	–	–
	ТТ	10,5	–	–	0,360	0,210	–	–	–	–	–	–
	Контакты	10,5	–	–	15,100	–	–	–	–	–	–	–
	Катушки выключателей	10,5	–	–	0,061	0,046	–	–	–	–	–	–
	Итого	10,5	–	–	44,183	7,422	1,227	8,514	0,166	5,528	1,086	1,884

Выберем силовое электрооборудование по расчетным параметрам.

3.2 Выбор силового электрооборудования

Проверим оборудование ТП 2×1250/10/0,4 по каталогам производителей (таблица 12) [1],[11],[15],[20].

«Ток термической стойкости точки КЗ:

$$B_{kt} = I_{n0}^2 (T_a + t_{п.в.}), \quad (41)$$
$$B_{kt} = 1,495^2 \cdot (7,64 + 30) \cdot 10^{-3} = 0,084 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем время действия релейной защиты:

$$\sigma = t_{pz} + t_{сво}, \quad (42)$$
$$\sigma = 0,01 + 0,04 = 0,05 \text{ с},$$

где t_{pz} – время срабатывания релейной защиты, с;

$t_{сво}$ – время срабатывания выключателя на отключение, с» [17].

«Максимальное значение аperiodической составляющей ТКЗ:

$$i_{a\sigma} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot e^{\frac{-0,05}{T_a}}, \quad (43)$$
$$i_{a\sigma} = \sqrt{2} \cdot 1,495 \cdot 2,72^{\frac{-0,05}{7,64}} = 2,1 \text{ кА}.$$

Номинальное значение аperiodической составляющей:

$$i_{ан} = \sqrt{2} \cdot I_{\mu} \cdot (1 + e^{-22,5 \cdot \sigma}), \quad (44)$$
$$i_{ан} = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot (1 + 2,72^{-22,5 \cdot 0,05}) = 56,569 \text{ кА},$$

где I_{μ} – ток отключения выключателя, кА» [17].

Таблица 12 – Проверка параметров оборудования

Точка	I_{n0}	$i_{уд}$	B_{kt}	$i_{a\sigma}$	I_{μ}	$i_{ан}$	I_p	Электрооборудование
	кА	кА	кА ² с	кА	кА	кА	А	
К-1	7,834	21,637	19,367	0,157	55	77,782	131,22	ВГТ-110/2000 РГП-110/2000 ТОГФ-110/400
К-2	10,291	28,423	33,413	0,207	55	77,782	131,22	ВГТ-110/2000 РГП-110/2000 ТОГФ-110/400
К-3	0,543	0,862	0,012	0,764	40	56,569	72,17	ВБЭ-10/40/2000 РВЗ-10/2000/III ТЛО-10/2000/M1
К-4	1,227	1,884	0,058	1,725	40	56,569	72,17	ВБЭ-10/40/2000 РВЗ-10/2000/III ТЛО-10/2000/M1

Выводы по разделу.

В процессе расчетов принято и проверено оборудование ТП и ГПП.
Оборудование успешно прошло необходимые проверки.

4 Расчет заземления и молниезащиты

Проведем расчет молниезащиты для ГПП.

«Активная высота молниеотвода:

$$\begin{aligned}h_A &= h - h_x, \\h_A &= 30 - 7 = 23,\end{aligned}\tag{45}$$

где h – высота молниеотвода, м;

h_x – высота установки молниеотвода от уровня земли, м» [14].

«Зона защиты молниеотвода:

$$\begin{aligned}r_x &= h_A \cdot \frac{1,60 \cdot P}{1 + h_x/h_A}, \\r_x &= 23 \cdot \frac{1,60 \cdot 1}{1 + 7/30} = 29,838 \text{ м}.\end{aligned}\tag{46}$$

Наибольшая сторона зоны защиты:

$$\begin{aligned}h_0 &= h - \frac{a}{7}, \\h_0 &= 30 - \frac{53}{7} = 22,5 \text{ м},\end{aligned}\tag{47}$$

где a – расстояние между молниеотводами, м» [14].

«Ширина зоны защиты:

$$\begin{aligned}b_x &= 3 \cdot (h_0 - 1,25h_x), \\b_x &= 3 \cdot (22,5 - 1,25 \cdot 7) = 41 \text{ м}.\end{aligned}\tag{48}$$

Изобразим графически зону защиты на рисунке 8» [14].

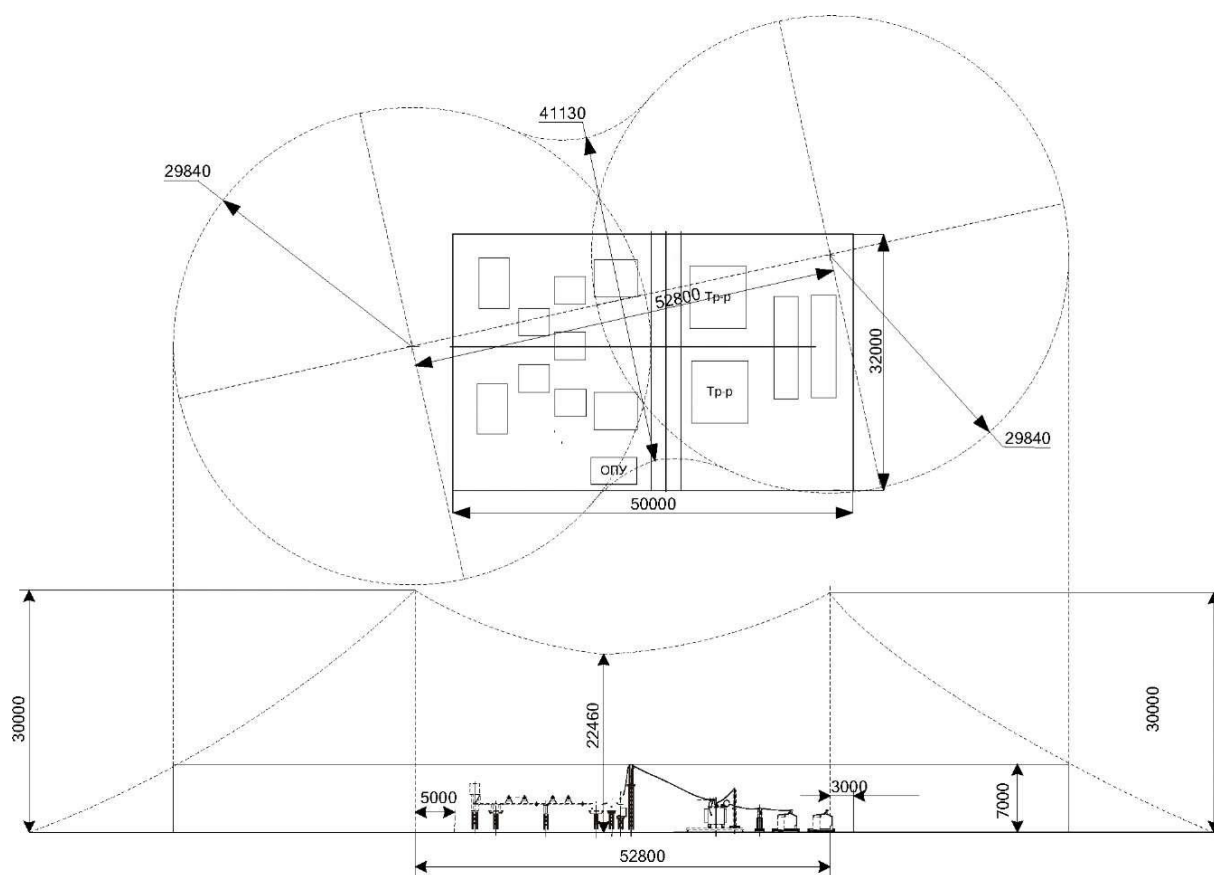


Рисунок 8 – Схема молниезащиты

«В ТП установить контур защитного заземления из металлической полосы 25×4 на высоте 0,4...0,6м от уровня пола» [14].

«Для расчета заземления применим общеизвестные формулы.

Сопротивление вертикально расположенного заземлителя:

$$R_{B.3} = \frac{\rho_{\text{э.г}}}{2\pi L_{B.3}} \left(\ln \frac{2L_{B.3}}{d_{B.3}} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot T_{B.3} + L_{B.3}}{4 \cdot T_{B.3} - L_{B.3}} \right), \quad (49)$$

$$R_{B.3} = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 5,0} \left(\ln \frac{2 \cdot 5,0}{0,1} + 0,5 \cdot \ln \frac{4,0 \cdot 3,0 + 5,0}{4,0 \cdot 3,0 - 5,0} \right) = 16,07 \text{ Ом},$$

где $\rho_{\text{э.г}}$ – величина удельного сопротивления земли, Ом · м;

$L_{B.3}$ – длина вертикально расположенного заземлителя, м;

$d_{B.3}$ – диаметр вертикально расположенного заземлителя, м;

$T_{B.3}$ – заглубление, м» [14].

«Сопротивление горизонтального заземлителя:

$$R_{гз} = \frac{\rho_{\pm}}{2 \cdot \pi \cdot L_{гз}} \cdot \ln \frac{2L_{гз}^2}{b_{гз} \cdot h_{гз}}, \quad (50)$$

$$R_{гз} = \frac{100}{2\pi \cdot 5,0} \cdot \ln \frac{2 \cdot 5,0^2}{0,04 \cdot 0,5} = 24,9 \text{ Ом},$$

где $b_{гз}$ – ширина горизонтально расположенного заземлителя, м;

$h_{гз}$ – заглубление горизонтальных заземлителей, м;

$L_{гз}$ – длина горизонтально расположенного заземлителя, м» [14].

«Полное сопротивление ЗУ:

$$R_{з.у} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{k_{иi} n_i}{R_i}}, \quad (51)$$

$$R_{з.у} = \frac{1}{\frac{10 \cdot 0,69}{21,19} + \frac{1 \cdot 0,69}{24,9}} = 2,83 \text{ Ом},$$

где n_i – число комплектов;

$k_{иi}$ – коэффициент использования» [14].

«Сопротивление заземляющего устройства – допустимое.

Тип системы заземления на вводе в здание – TN-C-S, а в распределительных и групповых сетях – TN-S» [8],[12].

«Данные системы заземления построены с применением глухозаземленной нейтрали. Характеризуются подключением нулевого проводника (N) к контуру заземления. При этом первый тип, на вводе в здания, характеризуется объединением защитного проводника РЕ и нулевого N в один комбинированный нуль (PEN) с подстанции, подключенного к глухозаземленной нейтрали. На входе в здание PEN проводник разделяется на N и РЕ проводники» [15].

Выводы по разделу.

Рассчитанная схема заземления и молниезащиты удовлетворяет требованиям электробезопасности.

Заключение

В данной ВКР выполнен расчет системы электроснабжения завода, производство которого построено на изготовлении композитных материалов для различных областей промышленности.

Первый этап состоял в анализе исходных данных завода, включая коэффициенты мощности и использования, а также генеральный план. Далее вычислены суммарные нагрузки, что необходимо для выбора подходящих силовых трансформаторов завода по производству композитных материалов. Для снижения доли реактивной составляющей были установлены конденсаторные батареи мощностью 600 квар в количестве 18 шт – по две на каждой ТП.

Полученные расчеты позволили выбрать девять ТП $2 \times 1250/10/0,4$ и ГПП $2 \times \text{ТДН-25000}/110$, с местами установки полученных на основе расчетов ЦЭН завода.

На последующем этапе выбраны для технико-экономического сравнения радиальная и магистральная схемы питания цехов и зданий завода по производству композитных материалов. Получено, что радиальная схема оказалась более выгодной как с точки зрения денежных вложений, так и надежности.

Дальнейшие расчеты заключались в расчете ТКЗ для четырех выбранных точек КЗ, где одна из точек расположена на стороне ВН – 110 кВ, а остальные на стороне НН – 10 кВ.

Силовое электрооборудование ТП и ГПП соответствует всем необходимым параметрам.

На заключительном этапе разработан проект заземления и молниезащиты оборудования завода по производству композитных материалов. Расчет молниезащиты представлен для ГПП, где показана схема с четырьмя молниеотводами. Что касается системы заземления, то сопротивление заземляющего устройства не превышает 4 Ом.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Вакуумный выключатель [Электронный ресурс] : Официальный сайт НПП Контакт. URL: http://www.kontakt-saratov.ru/vikl_vbe_10_31-5/konstrukciya_vbe_10_31-5/ (дата обращения: 05.03.2025).
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: 05.03.2025).
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: 05.03.2025).
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: 05.03.2025).
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: 05.03.2025).
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: 05.03.2025).
7. Жук В.Л. Оптимизация энергозатрат в металлургических технологиях : учебное пособие под ред. д.т.н., проф. А.А. Троянского. М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 212 с.
8. Защитные меры в электроустановках [Электронный ресурс] : Официальный сайт компании ООО «РесурсПромАльянс». URL:

<https://www.ess-ltd.ru/elektrobezopasnost/zashchitnye-mery-v-elektroustanovkakh/> (дата обращения: 05.03.2025).

9. Каталог светильников GALAD [Электронный ресурс] : Официальный сайт международной светотехнической корпорации GALAD. URL: <https://galad.ru/catalog/> (дата обращения: 05.03.2025).

10. Комплексные поставки кабельно-проводниковой и электротехнической продукции [Электронный ресурс] : Официальный сайт ЭлектроКомплект-Сервис. URL: <https://e-кс.ru/> (дата обращения: 05.03.2025).

11. Номенклатурный каталог электрооборудования высокого, среднего и низкого напряжения [Электронный ресурс] : Каталог ПКФ «Автоматика». URL: <http://www.tulaavtomatika.ru/pdf/Nomenkl2014.pdf> (дата обращения: 05.03.2025).

12. НТП ЭПП-94 Проектирование электроснабжения промышленных предприятий [Электронный ресурс] : Нормы технологического проектирования (1 редакция) принятые Тяжпромэлектропроект от 01.01.1994. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030085> (дата обращения: 05.03.2025).

13. ОРД 14.370-36-86 Указания по проектированию электрохозяйства металлургических заводов [Электронный ресурс] : Руководящий документ введен от 01.01.1987. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200062586> (дата обращения: 05.03.2025).

14. Правила устройства электроустановок [Электронный ресурс] : утвержден Министерство топлива и энергетики РФ от 06.10.1999. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003114?marker=7D20K3> (дата обращения: 05.03.2025).

15. Разъединитель [Электронный ресурс] : Официальный сайт завода по производству высоковольтного оборудования «Высоковольтный союз». URL: <https://www.vsoyuz.com/ru/produkcija/razediniteli/razediniteli-10-kv/disconnectors-rvz.htm> (дата обращения: 05.03.2025).

16. Расчет сетей по потерям напряжения [Электронный ресурс] : Образовательный электротехнический портал. URL:

<http://electricalschool.info/main/elsnabg/905-raschet-setejj-po-poterjam-naprjazhenija.html> (дата обращения: 05.03.2025).

17. 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: 05.03.2025).

18. 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: 05.03.2025).

19. Стоимость услуг на прокладку кабеля [Электронный ресурс] : Официальный сайт группы компаний ЭнергоСнабСтрой. URL: <https://www.spb-elektromontazh.ru/uslugi/prokladka-kabelya/ceny/> (дата обращения: 05.03.2025).

20. Трансформаторы тока ТЛО-10 М1 [Электронный ресурс] : Официальный сайт ООО «Электрощит-Ко». URL: http://www.kztt.ru/catalog/transformatori_toka/tlo-10_on_3-10_kv/1/ (дата обращения: 05.03.2025).

21. Щербаков Е. Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях. Учебное пособие. – Москва : Форум, 2019. – 495 с.

22. Benthous 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.

23. 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.

24. Rexhepi V. An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring. Technical University of Sofia, Faculty of Electrical Engineering, Boulevard “Sveti Kliement Ohridski” 8, Sofia, 1000, Bulgaria, 2017. 418 p.

25. Shabdin N.H., Padfield R. Sustainable Energy Transition, Gender and Modernisation in Rural Sarawak. Chemical Engineering Transactions vol.56, 2017. p.259-264.

26. Surya S., Wayne Beaty H. Standard Handbook for Electrical Engineers, Seventeenth Edition. - McGraw Hill Professional, 2017. 368 p.