

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

Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование кафедры)

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки)

Электроснабжение
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование системы электроснабжения предприятия по
выпуску шин для грузовых автомобилей»

Студент

С.Ю. Рыкунов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Черненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

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

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

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

АННОТАЦИЯ

Бакалаврская работа выполнена на тему: «Проектирование системы электроснабжения предприятия по выпуску шин для грузовых автомобилей».

В ходе выполнения работы были разработаны следующие разделы:

- произведен расчет электрических нагрузок по предприятию;
- выполнены расчеты по определению нагрузок от осветительных приборов;
- произведен выбор проводников и электрических аппаратов для сетей внутрицехового электроснабжения;
- выбрана схема для распределения электрической энергии по предприятию;
- рассчитаны значения токов короткого замыкания.

Общий объем работы составляет 58 страниц, включая 18 таблиц и 2 рисунка. Графическая часть ВКР выполнена на 6 листах формата А1.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Характеристика промышленного предприятия	5
2 Определение ожидаемых электрических нагрузок от силовых электроприемников	6
3 Выбор схемы внутрицехового электроснабжения	17
4 Определение ожидаемых электрических нагрузок от системы электрического освещения	24
5 Выбор номинальной мощности силовых трансформаторов на КТП	29
6 Выбор схемы внутризаводского электроснабжения	34
7 Определение токов короткого замыкания	36
8 Выбор и проверка электроаппаратов	47
Заключение	55
Список используемых источников	56

ВВЕДЕНИЕ

Системой электроснабжения промышленного предприятия (СЭС ПП) называются взаимосвязанные электроустановки, необходимые для снабжения потребителей электроэнергией.

Электроэнергетике присущи определенные особенности, которыми не обладают другие отрасли промышленности:

- неделимость и одновременность производства, передачи и последующего потребления электрической энергии;
- высокая скорость протекания процессов как в нормальном режиме функционирования, так и в аварийном;
- зависимость от электроэнергетики остальных отраслей, и влияние электроприемников в этих отраслях друг на друга и на электроэнергосистему.

Особенности электроэнергетики приводят к появлению ряда особенностей в СЭС ПП:

- использование быстродействующих устройств, работающих в автоматическом режиме, способных реагировать на переходные процессы, происходящие в СЭС ПП;
- разнообразие технических решений по реализации СЭС ПП, вызванное особенностями технологических процессов на предприятиях;
- Постоянное совершенствование технологического процесса и изменение состава электроприемников приводит к изменению конфигурации и состава СЭС ПП [1-4].

Основной целью ВКР работы является проектирование надежной и экономичной системы электроснабжения предприятия по выпуску шин для грузовых автомобилей.

1 Характеристика промышленного предприятия

Предприятие входит в холдинг «СИБУР-Русские шины». На предприятии выполняется программа по внедрению системы менеджмента качества. В настоящее время на предприятии продолжается работа по обновлению и модернизации оборудования, внедрению новых технологий. Запущены в эксплуатацию форматоры фирмы «Шкода», осуществлен перевод процесса вулканизации сельхоз и грузовых шин на паровые режимы.

Выполняется проект по внедрению паразотных режимов вулканизации. После автоматизации процесса навески ингредиентов на резиносмесителях процесс резиносмешения признан лучшим среди предприятий холдинга.

Впервые в России на предприятии начато изготовление сельскохозяйственных шин с применением паразотной смеси вместо перегретой воды. Это позволяет существенно улучшить качество многослойной покрышки и снизить энергетические и трудовые затраты процесса производства.

Большинство электроприемников относятся ко второй категории надежности электроснабжения. Режим работы технологического оборудования – продолжительный. Основное напряжение для питания силового электрооборудования – 380 В, питание сетей освещения осуществляется на напряжении 220 В.

2 Определение ожидаемых электрических нагрузок от силовых электроприемников

При разработке проекта электроснабжения промышленного предприятия необходимо определить электрическую нагрузку, передачу которой требуется обеспечить для нормальной работы объекта. В зависимости от этого значения, называемого расчетной нагрузкой, выбирают источник электроснабжения и все оборудование электрической сети: линии, трансформаторы, распределительные устройства. Неточность определения расчетной нагрузки приводит или к перерасходу шин, кабелей и проводов, или к низкой надежности электроснабжения.

Максимальная мощность, потребляемая группой приемников с переменной нагрузкой, всегда меньше суммы номинальных мощностей этих приемников. Это объясняется тем, что приемники не всегда загружаются на полную мощность, а их наибольшие нагрузки не совпадают по времени. Указанное обстоятельство следует иметь в виду при выборе элементов системы электроснабжения во избежание завышения их пропускной способности и стоимости. Необходимо также учитывать неравномерность электрических нагрузок по часам суток, дням недели и сезонам года. Следовательно, при расчете потребляемой мощности надо анализировать графики нагрузок [5].

«Первым и основным этапом проектирования системы ЭСПП является определение ожидаемых (расчетных) значений электрических нагрузок. Они не являются простой суммой установленных (номинальных) мощностей ЭП. Это обусловлено неполной загрузкой некоторых ЭП, неодновременностью их работы, вероятностным случайным характером включения и отключения ЭП и т.п.» [5, 6].

Покажем расчет нагрузок на примере участка по раскрою металлического корда для шин. Основными силовыми электроприемниками цеха являются:

- автоматические линии по раскрою корда – 2 шт с $P_n = 50$ кВт;
- индивидуальные вальцы – 6 шт с $P_n = 136$ кВт;
- раскроечные установки - 4 шт с $P_n = 30$ кВт;
- полуавтоматические линии по обработке металлического корда - 4 шт с $P_n = 30$ кВт;
- вальцы нагревательные со станцией терморегулирования - 2 шт с $P_n = 165$ кВт;
- поточные линии по обрешиванию металлокорда - 2 шт с $P_n = 215$ кВт.

По справочным данным определяются значения коэффициентов максимума и мощности для каждой группы электроприемников.

Далее расчет ведется по известной методике, изложенной в [7-9].

«Активная расчетная нагрузка группы электроприемников» [7]:

$$P_p = K_p \cdot \sum_{i=1}^n K_{ui} \cdot P_{номi}; \quad 2.1$$

«Эффективное число электроприёмников» [7]:

$$n_{\text{э}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{номi} \right)^2}{\sum_{i=1}^n P_{номi}^2}; \quad 2.2$$

На шинах НН трансформаторной подстанции допускается использование упрощенной формулы:

$$n_{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n p_{\text{н.ом}i}}{P_{\text{н.наиб}}}; \quad 2.3$$

«Групповой коэффициент использования» [7]:

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ui} \cdot P_{Hi}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}}; \quad (2.4)$$

Расчетная реактивная нагрузка при $n_{\varepsilon} > 10$:

$$Q_p = \sum_{i=1}^n \kappa_{ui} \cdot p_{\text{н.ом}i} \cdot \text{tg} \phi_i; \quad 2.5$$

«Полная расчетная нагрузка» [7]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}; \quad 2.6$$

«Расчётный ток» [7]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}; \quad 2.7$$

«Групповой коэффициент использования по 2.4» [7]:

$$K_{II} = \frac{2 \cdot 0.65 \cdot 165 + 6 \cdot 0.65 \cdot 136 + 2 \cdot 0.55 \cdot 215 + 4 \cdot 0.7 \cdot 29 + 2 \cdot 166 + 6 \cdot 136 + 2 \cdot 215 + 4 \cdot 29 + 2 \cdot 50 + 4 \cdot 30 + 2 \cdot 0.65 \cdot 50 + 4 \cdot 0.7 \cdot 30}{2 \cdot 166 + 6 \cdot 136 + 2 \cdot 215 + 4 \cdot 29 + 2 \cdot 50 + 4 \cdot 30 + 2 \cdot 0.65 \cdot 50 + 4 \cdot 0.7 \cdot 30} = 0,64.$$

«Эффективное число электроприёмников по 2.3» [7]:

$$n_{\text{э}} = \frac{2 \cdot (2 \cdot 160 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 132 + 6 \cdot 4.4 + 2 \cdot 160 + 2 \cdot 55.5 + 4 \cdot 29.7 + 2 \cdot 50.2 + 4 \cdot 30.2)}{160} = 24$$

«Активная расчетная нагрузка по 2.1» [7]:

$$P_{pA1} = 0.9 \cdot \left(\begin{array}{l} 2 \cdot 160 \cdot 0.65 + 2 \cdot 6 \cdot 0.65 + 6 \cdot 132 \cdot 0.65 + \\ 6 \cdot 4.4 \cdot 0.65 + 2 \cdot 160 \cdot 0.55 + 2 \cdot 55 \cdot 0.55 + \\ 4 \cdot 30 \cdot 0.7 + 2 \cdot 50 \cdot 0.65 + 4 \cdot 30 \cdot 0.7 \end{array} \right) = 1096 \text{ кВт};$$

«Расчётная реактивная нагрузка по 2.5» [7]:

$$Q_{pA1} = 0.9 \cdot \left(\begin{array}{l} 2 \cdot 160 \cdot 0.65 \cdot 0.75 + 2 \cdot 6 \cdot 0.65 \cdot 0.75 + 6 \cdot 132 \cdot 0.65 \cdot 0.75 + \\ 6 \cdot 4.4 \cdot 0.65 \cdot 0.75 + 2 \cdot 160 \cdot 0.55 \cdot 0.75 + 2 \cdot 55 \cdot 0.55 \cdot 0.75 + \\ 4 \cdot 30 \cdot 0.7 \cdot 0.75 + 2 \cdot 50 \cdot 0.65 \cdot 0.75 + 4 \cdot 30 \cdot 0.7 \cdot 0.75 \end{array} \right) = 822 \text{ квар};$$

«Полная расчётная нагрузка по 2.6» [7]:

$$S_{pA1} = \sqrt{1096^2 + 822^2} = 1370 \text{ кВА}.$$

«Расчётный ток по 2.7» [7]:

$$I_{pA1} = \frac{1370}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 2082 \text{ А}.$$

Определим нагрузку системы внутреннего освещения.

«Расчётная активная нагрузка системы освещения» [7]:

$$P_{осв} = K_c \cdot F \cdot P_{уд} \cdot 10^{-3}. \quad 2.8$$

«Удельную активная нагрузка системы освещения» [7]:

$$P_{уд} = (p_{ум} \cdot K_z \cdot E_n) / (K_{зм} \cdot \eta \cdot 100). \quad 2.9$$

«Расчетная реактивная нагрузка системы освещения» [7]:

$$Q_{осв} = P_{осв} \cdot \operatorname{tg} \phi_o. \quad 2.10$$

«Суммарные значения расчетной активной и реактивной нагрузок» [7]:

$$P_{рн} = P_c + P_{осв}; \quad 2.11$$

$$Q_{рн} = Q_c + Q_{осв}. \quad 2.12$$

«Полная расчетная нагрузка» [7]:

$$S_p = \sqrt{P_{рн}^2 + Q_{рн}^2}. \quad 2.13$$

В таблице 2.1 приведены геометрические размеры цехов предприятия и значения требуемой освещенности.

В таблице используются следующие сокращенные наименования цехов: ПЦ – подготовительный цех; АЦ – автокамерный цех; КЦ – каландровый цех; ЦВ – цех вулканизации; СЦ – сборочный цех; Ск – склад; ПВС - паровоздуходувная станция; Кс – компрессорная станция.

В таблице 2.2 приведены номинальные мощности отдельных групп электроприемников по цехам предприятия и определенные по справочным

данным значения коэффициентов мощности и коэффициентов использования.

Таблица 2.1 - Геометрические размеры цехов предприятия и значения требуемой освещенности

Сокращенные наименования цехов	$A, м$	$B, м$	$F, м^2$	$P_{ум},$ $Вт / м^2$	$E_{норм},$ лк	$E_{факт},$ лк
ПЦ	250	150	37500	3.4	100	300
АЦ	120	100	12000	3.4	100	250
КЦ	200	110	22000	3.4	100	300
ЦВ	250	120	30000	3.4	100	300
СЦ	356	104	37024	3.4	100	300
Ск	200	80	16000	3.4	100	200
ПВС	120	80	9600	3.4	100	150
Кс	150	80	12000	3.4	100	150

В таблице 2.2 используются следующие сокращенные наименования электроприемников: Возд – воздуходувки; Вал – вальцы; Экст – экструдеры; ШМ – шприцмашины; ПТС – подъемно-транспортные средства; Асп – аспирация; ВО – вспомогательное оборудование; Стр – стрейнеры; Вент – вентиляторы; МВ - многопозиционные вулканизаторы; ЛПК – линия проверки качества; ФВ – форматоры-вулканизаторы; Комп – компрессоры; Кол – коландры; РМ – резательные машины; СС – сборочные станки; ЦН – циркуляционные насосы; ННД – насосы низкого давления; НВД – насосы высокого давления.

Расчет итоговых значений нагрузок по сборочному цеху предприятия.

Значение группового коэффициента использования по 2.4:

$$K_u = \frac{\left(\begin{array}{l} 0.45 \cdot 800 + 0.65 \cdot 500 + 0.55 \cdot 840 + 0.6 \cdot 320 + \\ 0.65 \cdot 1600 + 0.25 \cdot 200 + 0.6 \cdot 110 + 0.3 \cdot 50 \end{array} \right)}{800 + 500 + 840 + 320 + 1600 + 200 + 110 + 50} = 0,57.$$

Таблица 2.2 - Номинальные мощности отдельных групп электроприемников по цехам предприятия и определенные по справочным данным значения коэффициентов мощности и коэффициентов использования

Сокр. наим. цехов	Сокр. наим. электроприемников	$P_{уст},$ кВт	$P_{н.мах},$ кВт	$P_{н\Sigma},$ кВт	K_u	$\cos\varphi$
ПЦ	Возд	3040	200	600	0.55	0.65
	Вал			740	0.65	0.65
	Экст			570	0.65	0.70
	ШМ			450	0.60	0.75
	ПТС			250	0.25	0.45
	Асп			300	0.70	0.80
	ВО			150	0.30	0.50
АЦ	Вал	327	132	132	0.65	0.65
	ШМ			70	0.45	0.75
	Стр			20	0.30	0.70
	ПТС			30	0.25	0.45
	Вент			50	0.60	0.65
	ВО			10	0.30	0.50
ЦВ	МВ	2720	125	200	0.30	0.65
	ЛПК			50	0.40	0.60
	ФВ			2000	0.36	0.63
	ПТС			120	0.25	0.45
	Вент			100	0.65	0.65

	Комп			100	0.70	0.80
--	------	--	--	-----	------	------

Продолжение таблицы 2.2

Сокр. наим. цехов	Сокр. наим. электроприемников	$P_{уст},$ кВт	$P_{н.мах},$ кВт	$P_{н\Sigma},$ кВт	K_u	$cos\varphi$
СЦ	Кол	4870	280	800	0.45	0.65
	Экст			500	0.65	0.50
	ШМ			840	0.55	0.75
	РМ			320	0.60	0.65
	СС			1600	0.65	0.70
	ПТС			200	0.25	0.45
	Вент			110	0.60	0.60
	ВО			50	0.30	0.50
Ск	ПТС	220	30	120	0.25	0.45
	Вент			100	0.40	0.60
ПВС	Комп	1640	160	320	0.60	0.60
	ЦН			250	0.43	0.70
	ННД			450	0.87	0.80
	НВД			620	0.55	0.80
Кс	Вент	830	75	250	0.69	0.75
	Комп			580	0.65	0.65

«Эффективное число электроприёмников по 2.3» [7]:

$$n_3 = \frac{2(800 + 500 + 840 + 320 + 1600 + 200 + 110 + 50)}{280} = 31$$

«Активная расчетная нагрузка по 2.1» [7]:

$$P_p = 0.84 \cdot \left(\begin{array}{l} 0.45 \cdot 800 + 0.65 \cdot 500 + 0.55 \cdot 840 + 0.6 \cdot 320 + \\ 0.65 \cdot 1600 + 0.25 \cdot 200 + 0.6 \cdot 110 + 0.3 \cdot 50 \end{array} \right) = 2108 \text{ кВт.}$$

«Расчётная реактивная нагрузка по 2.5» [7]:

$$Q_p = 0.84 \cdot \left(\begin{array}{l} 0.45 \cdot 800 \cdot 1.17 + 0.65 \cdot 500 \cdot 1.73 + 0.55 \cdot 840 \cdot 0.88 + \\ + 0.6 \cdot 320 \cdot 1.17 + 0.65 \cdot 1600 \cdot 1.02 + 0.25 \cdot 200 \cdot 1.98 + \\ + 0.6 \cdot 110 \cdot 1.33 + 0.3 \cdot 50 \cdot 1.73 \end{array} \right) = 2427 \text{ кВар.}$$

«Расчётная активная нагрузка системы освещения по 2.8» [7]:

$$P_{осв} = 37024 \cdot \frac{3.4 \cdot 1.4 \cdot 300}{1.5 \cdot 0.75 \cdot 100} \cdot 0.95 \cdot 10^{-3} = 446 \text{ кВт.}$$

«Расчетная реактивная нагрузка системы освещения по 2.10» [7]:

$$Q_{осв} = 446.46 \cdot 1.33 = 595 \text{ квар.}$$

«Суммарные значения расчетной активной и реактивной нагрузок по 2.11 и 2.12» [7]:

$$P_{рн} = 2108 + 446 = 2554 \text{ кВт};$$

$$Q_{рн} = 2427 + 595 = 3022 \text{ квар.}$$

«Полная расчетная нагрузка по 2.13» [7]:

$$S_p = \sqrt{2554^2 + 3022^2} = 3958 \text{ кВА}$$

Определение суммарных расчетных нагрузок по остальным цехам предприятия производится таким же образом по формулам 2.1 – 2.13, а результаты заносим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Определение суммарных расчетных нагрузок по остальным цехам предприятия

Сокращенные наименования цехов	$\sum P_{н.і},$ кВт	$\sum P_{н.і} \cdot$ $\cdot K_{ui},$ кВт	$\sum P_{н.і} \cdot$ $\cdot K_{ui} \cdot$ $\cdot tg \varphi_i,$ квар	$K_{игр}$	$nэ$	$P_p,$ кВт	$Q_p,$ квар	$P_{осв},$ кВт	$Q_{осв},$ квар	$P_{рн},$ кВт	$Q_{рн},$ квар	$S_p,$ кВА
ПЦ	3060	1769	1924	0.58	30	1468	1597	452	603	1920	2200	2920
АЦ	312	167	194	0.54	4	167	194	111	147	278	342	440
КЦ	1830	2306	1729	0.63	22	2075	1556	265	354	2341	1910	3021
ЦВ	2570	965	1172	0.38	41	724	879	362	482	1086	1362	1741
СЦ	4420	2510	2890	0.57	31	2108	2428	446	595	2555	3023	3958
Ск	220	70	113	0.32	14	60	96	129	172	188	267	327
ПВС	1640	1032	915	0.63	20	929	824	58	77	987	901	1336
Кс	830	550	593	0.66	22	495	534	72	96	567	630	2030

Поскольку у предприятия два центра питания, вначале определим значения суммарных нагрузок по высоковольтному РП1.

Значение группового коэффициента использования по 2.4:

$$K_u = \frac{3060 \cdot 0.58 + 1050 \cdot 0.59 + 1640 \cdot 0.63}{3060 + 1050 + 1640} = 0,59.$$

«Расчётная суммарная активная нагрузка» [7]:

$$P_p = K_0 \cdot \sum_{i=1}^m K_{ui} \cdot P_{номi} + P_{\delta} + P_{осв} + \Delta P_m; \quad 2.15$$

$$P_p = 1 \cdot 33421 + 5780 + 901 + 23 = 10124 \text{ кВт}.$$

«Расчётная суммарная реактивная нагрузка» [7]:

$$Q_p = K_0 \cdot \sum_{i=1}^m K_{ui} \cdot P_{номi} \cdot \operatorname{tg} \phi_i + Q_{осв} + \Delta Q_m; \quad 2.16$$

$$Q_p = 1 \cdot 3031 + 1201 + 170 - 804 = 3597 \text{ квар}.$$

«Расчётная суммарная полная нагрузка по 2.13» [7]:

$$S_p = \sqrt{10124^2 + 3597^2} = 10744 \text{ кВА}.$$

Для РП2 итоговые значения определяем таким же образом:

$$P_p = 8132 \text{ кВт};$$

$$Q_p = 2444 \text{ квар};$$

$$S_p = 8491 \text{ кВА}.$$

3 Выбор схемы внутрицехового электроснабжения

Схемы электрических сетей. Сети напряжением до 1000 В осуществляют распределение электроэнергии внутри промышленных предприятий и установок и непосредственное питание большинства приемников электроэнергии. Схема сети определяется технологическим процессом производства, взаимным расположением источника питания подстанций и приемников электроэнергии и их единичной установленной мощностью.

К сетям напряжением до 1000 В, как и ко всякой электрической сети, предъявляются следующие требования. Они должны:

- обеспечивать необходимую надежность электроснабжения;
- быть удобными, простыми и безопасными в эксплуатации;
- требовать минимальных приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию;
- удовлетворять условиям окружающей среды;
- обеспечивать применение промышленных методов монтажа.

Схемы электрических сетей бывают радиальными, магистральными и смешанными [5].

В работе выбираем для электроснабжения электроприемников цеха схему блок трансформатор-магистраль, когда роль распределительного устройства 0,4 кВ выполняет магистральный шинопровод, а отдельные электроприемники получают питание от распределительных шинопроводов подключаемых к магистральному [10, 11].

Сечения проводов и кабелей выбираются из условия:

$$I_{доп} \geq \frac{I_P}{k_{нопр}}, \quad 3.1$$

при этом полученное сечение согласуется с аппаратом, защищающим линию:

$$I_{доп} \geq \frac{I_3 \cdot k_3}{k_{нор}}, \quad 3.2$$

Результаты выбора и проверки проводников для автоматической линии по раскрою металлокорда сводим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты выбора и проверки проводников для автоматической линии по раскрою металлокорда

№ двигателя	Тип двигателя	$I_{P.ДВ}$, А	Провод	$I_{доп}$, А	$I_{н.р.}$, А автоматического выключателя	Условие проверки
1	АИР180М 2	55.7	АПВ 5 (1x25)	70	63	$70 \text{ А} > \frac{63 \cdot 1}{1} \text{ А}$
2	АИР160S2	28.3	АПВ 5 (1x8)	37	31.5	$37 \text{ А} > \frac{31.5 \cdot 1}{1} \text{ А}$
3	АИР90L2	6.2	АПВ 5 (1x2.5)	19	10	$19 \text{ А} > \frac{10 \cdot 1}{1} \text{ А}$
4	АИР90L4	5.3	АПВ 5 (1x2.5)	19	8	$19 \text{ А} > \frac{8 \cdot 1}{1} \text{ А}$

Результаты выбора проводов и кабелей к электроприемникам, относящимся к группе 1 приведены в таблице 3.2, а к группе 2 в таблице 3.3.

Таблица 3.2 - Результаты выбора кабелей АВВГ к электроприемникам, относящимся к группе 1

Наим. электроприемников	I_p, A	Число кабелей	Число жил и сечение	$I_{дон}, A$
Вальцы нагревательные со станцией терморегулирования	279.61	2	5x95	170
Индивидуальные вальцы	237.06	1	5x185	270
Поточные линии по обрезаиванию металлокорда	279.61	2	5x95	170

Таблица 3.3 - Результаты выбора проводов марки АПВ к электроприемникам, относящимся к группе 2

Наим. электроприемников	I_p, A	Число кабелей	Число жил и сечение	$I_{дон}, A$
Вальцы нагревательные со станцией терморегулирования	8.73	5	1x2.5	19
Индивидуальные вальцы	6.40	5	1x2.5	19

Продолжение таблицы 3.3

Наим. электроприемников	I_p, A	Число кабелей	Число жил и сечение	$I_{доп}, A$
Поточные линии по обрезаиванию металлокорда	66.40	5	1x50	120
Раскроечные установки	44.45	5	1x35	85
Автоматические линии по раскрою корда	73.01	5	1x50	120
Полуавтоматические линии по обработке металлического корда	42.39	5	1x25	70

Выбор магистрального шинпровода производим по значению номинальной мощности трансформатора КТП:

$$I_n \geq \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}; \quad 3.3$$

$$I_n \geq \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 2431 \text{ A.}$$

Выбираем шинпровод типа ШМА4-2500 с номинальным током 2500А.

Выбор распределительных шинпроводов производим по значению расчетного тока группы подключенных к нему электроприемников:

$$I_n \geq I_p, \quad 3.4$$

Выбор автоматического выключателя производим по значению расчетного тока:

$$I_n = \frac{\beta_{т.а} S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}};$$

$$I_n = \frac{1.4 \cdot 1600}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 3403,33 \text{ A}$$

Принимаем автомат типа ВА-СЭЩ-В-АН-40Е с номинальным током $I_{н.а} = 4000 \text{ A}$ и током расцепителя равным $I_p = 4000 \text{ A}$.

Для группы 2 с расчетным током $I_p = 606 \text{ A}$ выбираем распределительный шинопровод типа ШРА4-630 с номинальным током 630А.

Условия выбора автоматического выключателя:

$$I_{н.а} = 630 \text{ A} \geq I_p = 606 \text{ A},$$

$$I_{н.р} = 630 \text{ A} \geq I_p = 606 \text{ A}.$$

«Пиковый ток» [12]:

$$I_{тик} \approx I_{пуск.наиб} + (I_p - K_u \cdot I_p)$$

$$I_{тик} = 389.67 + (605.82 - 0.65 \cdot 30) = 975,99 \text{ A}.$$

«Ток срабатывания расцепителя» [12]:

$$I_{ср} = I_{ср} \geq 1.25 \cdot I_{тик},$$

$$I_{ср} = 1.25 \cdot 975.99 = 1220 \text{ A}.$$

С учетом кратности тока срабатывания автомата равной $k_{кр} = 10$:

$$k_{кр} \cdot I_{нр} = 10 \cdot 630 = 6300 A.$$

Условие $6300 A > 1220 A$ выполняется.

Принимаем к установке автомат типа ВА-СЭЩ-TS800 со значением номинального тока $I_{н.а} = 800 A$.

Выбор кабеля для питающей линии:

$$I_{дл} \geq 606 A;$$

$$I_{дл} \geq I_{кр} \cdot k_з = 630 \cdot 1 = 630 A.$$

Принимаем к установке кабели типа 2ААШВУ- 5х240 рассчитанные на номинальный ток $I_n = 330 A$.

Определим значение тока плавкой вставки предохранителя:

- ток в длительном режиме работы:

$$I_{BC} \geq I_p; \quad 3.5$$

- отстройка от пускового тока:

$$I_{BC} \geq \frac{I_{KP}}{\alpha}, \quad 3.6$$

Пиковый ток от группы электроприемников:

$$I_{KP} = I_{пик} = I_{пуск.наиб.} + (I_p - k_u \cdot I_{н.наиб.}), \quad 3.7$$

Итоги выбора автоматов для защиты линий сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 –Выбор автоматов

№ группы	Наим. электроприемников	I_p, A	$I_{ПИК}, A$	$I_{ПИК} / \alpha$	Выбранный АВ
1	Вальцы нагревательные со станцией терморегулирования	279.61	2013.21	2516.51	TS 400, $I_n = 400A, I_p = 300A$
	Индивидуальные вальцы	237.06	1540.89	1926.12	TS 250, $I_n = 250A, I_p = 250A$
	Поточные линии по обрезиниванию металлокорда	279.61	2013.21	2516.51	TS 400, $I_n = 400A, I_p = 300A$
2	Вальцы нагревательные со станцией терморегулирования	8.73	48.12	19.25	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 12A$
	Индивидуальные вальцы	6.40	34.69	13.88	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 12A$
2	Поточные линии по обрезиниванию металлокорда	66.40	290.24	116.10	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 100A$
	Раскроечные установки	44.45	263.09	105.24	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 63A$
	Автоматические линии по раскрою корда	73.01	426.50	170.60	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 100A$
	Полуавтоматические линии по обработке металлического корда	42.39	189.98	75.99	TS 100, $I_n = 100A, I_p = 63A$

4 Определение ожидаемых электрических нагрузок от системы электрического освещения

Люмен-амперные характеристики светодиодов слабо зависят от температуры в рабочем диапазоне температур (от -25 до 30 °С). Однако при понижении температуры напряжение светодиодов повышается. При этом градиент остается практически неизменным для токов от 40 мА до 100 мА, поэтому результаты можно интерполировать и на большие токи. В источниках питания светодиодных устройств применяются выпрямители, трансформаторы и устройства стабилизации тока. При недостаточной стабилизации тока срок службы светодиодов сокращается в 2-5 раз [13-15].

Характеристики светодиодных источников в немалой степени зависят от конструкции светодиодных модулей. В процессе эксплуатации происходит неизбежное старение светодиодов. При рассмотрении характеристик углового распределения светосилы в вертикальной плоскости в зависимости от времени наработки для светодиода помимо значительного снижения силы света происходит сужение и перераспределение характеристик по углу излучения.

Для внутрицехового освещения применяем светодиодные светильники типа HB LED производства Световых технологий.

«Расчетная высота подвеса светильников» [13]:

$$H_p = H - h_c - h_p, \quad 4.1$$

$$H_p = 8 - 1.4 - 0.8 = 5.8 \text{ м.}$$

«Число рядов светильников» [13]:

$$R = \frac{B - 2 \cdot l}{L} + 1; \quad 4.2$$

$$R = \frac{23.6 - 2 \cdot 2}{6} + 1 = 5;$$

«Число светильников в ряду» [13]:

$$N_R = \frac{A - 2 \cdot l}{L} + 1. \quad 4.3$$

$$N_R = \frac{50 - 2 \cdot 2}{6} + 1 = 8.$$

«Фактическое расстояние между рядами» [13]:

$$L_B = \frac{B - 2 \cdot l}{R - 1}; \quad 4.4$$

$$L_B = \frac{23.6 - 2 \cdot 2}{5 - 1} = 4.9 \text{ м.}$$

«Фактическое расстояние между светильниками в ряду» [13]:

$$L_R = \frac{A - 2 \cdot l}{N_R - 1}; \quad 4.5$$

$$L_R = \frac{50 - 2 \cdot 2}{8 - 1} = 6.6 \text{ м.}$$

«Проверка правильности размещения светильников» [13]:

$$1,0 \leq \frac{L_A}{L_B} \leq 1,5; \quad 4.6$$

$$1,0 \leq 1.34 \leq 1,5.$$

Всего в помещении будет установлено 40 светильников.

«Индекс помещения» [13]:

$$i = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)} \quad 4.7$$

$$i = \frac{50 \cdot 23.6}{5.8 \cdot 50 + 23.6} = 2.76.$$

«Требуемое значение светового потока одной лампы» [13]:

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot F \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad 4.8$$

$$\Phi = \frac{300 \cdot 1.4 \cdot 1180 \cdot 1.15}{40 \cdot 0.745} = 19126 \text{ лм.}$$

По значению Φ выбираем светильник типа НВ 228 LED с $P_{\text{ном}} = 225$ Вт и $\Phi = 21000$ лм, что не превышает возможного отклонения в 10%.

Для установки на КТП выбираем светильники типа ВАТ 236 с 2 лампами по 36 Вт в каждом.

«Количество светильников в ряду» [13]:

$$N_R = \frac{E \cdot K \cdot F \cdot Z}{m \cdot R \cdot \Phi \cdot \eta} \quad 4.9$$

«Расчетная высота подвеса светильников по 4.1» [13]:

$$H_p = 5.0 - 1.4 - 0.8 = 2.8 \text{ м.}$$

«Индекс помещения по 4.7» [13]:

$$i = \frac{12 \cdot 5}{2.8 \cdot 12 + 5} = 1.26.$$

«Количество светильников в ряду по 4.9» [13]:

$$N_R = \frac{100 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 1.15}{2 \cdot 1 \cdot 3200 \cdot 0.64} = 2.4;$$

Округляем до ближайшего большего - 3.

«Фактическое расстояние между светильниками в ряду по 4.5» [13]:

$$L_R = \frac{12 - 2 \cdot 1.3 - 3 \cdot 1.2}{3 - 1} = 2.9.$$

Результаты выбора количества и номинальных мощностей ламп для систем искусственного освещения прочих помещений сведем в таблицу 4.1.

Расчет параметров эвакуационного освещения производим по точечному методу.

«Освещенность в контрольной точке» [13]:

$$\Sigma e = e_1 + e_2 + \dots + e_n, \quad 4.10$$

$$\Sigma e = 0.35 + 0.35 + 0.35 + 0.35 = 1.4 \text{ лк.}$$

«Световой поток одной лампы» [13]:

$$\Phi = \frac{1000 \cdot E \cdot k}{\mu \cdot \Sigma e}, \quad 4.11$$

$$\Phi = \frac{1000 \cdot 0.5 \cdot 1.4}{1.1 \cdot 1.4} = 455 \text{ лм.}$$

Выбираем лампы накаливания с $P_{л} = 90$ Вт и $\Phi = 1380$ лм, которые размещаем в 9 светильниках типа НСП21.

Таблица 4.1 – Результаты выбора количества и номинальных мощностей ламп для систем искусственного освещения прочих помещений

Поме- щения	E , лк	A , м	B , м	H_p , м	i	L , м	L , м	R , шт.	N_R , шт.	N , шт.	L_B , м	L_R , м	η	Φ , лм	$P_{л}$, Вт
ГЧЦ	300	50	23.6	5.8	2.76	6	2	5	8	40	4.9	6.6	74.5	23000	225
ТП	100	12	5	2.8	1.26	3	1.3	1	2.4	3	-	2.9	64	3200	40
СП	100	9.1	5	4.2	0.77	3.5	1.5	2	2	4	2	3.7	46.2	3200	40
СЖ	75	5	3.3	0.68	0.7	3	1	1	1	1	-	-	45	3200	40
СМ	75	5	3.3	0.68	0.7	3	1	1	1	1	-	-	45	3200	40
ПП1	100	5	3.4	2.8	0.72	3	1	1	1	1	-	-	45	3200	40
ПП2	100	5	3.4	2.8	0.72	3	1	1	1	1	-	-	45	3200	40
КНС	100	5	3.4	2.8	0.72	3	1	1	1	1	-	-	45	3200	40
КЭ	100	5	4.5	2.8	0.85	2.5	1	1	2	2	-	0.6	50	3200	40
Кор	100	5	2	2.8	0.51	3	1	1	1	1	-	-	41	3200	40
КМ	100	5	4.5	2.8	0.85	2.5	1	1	2	2	-	0.6	50	3200	40

В таблице используются следующие сокращения: ГЧЦ - главная часть цеха; ПП1 – подсобное помещение №1; ТП – трансформаторная подстанция; ПП2 – подсобное помещение №2; СП – складское помещение; КНС – комната начальника смены; СЖ – санузел женский; КЭ – комната энергетика; СМ – санузел мужской; Кор – коридор; КМ – комната механика.

5 Выбор номинальной мощности силовых трансформаторов на КТП

Количество трансформаторов на КТП находим по формуле [16]:

$$N_{min} = \frac{P_{рн}}{\beta_m \cdot S_m} + n; \quad 5.1$$

Для подготовительного цеха:

$$N_{min} = \frac{1920}{0.87 \cdot 1600} = 1.7.$$

Принимаем к установке 2 силовых трансформатора на КТП.

Расчет количества КТП и трансформаторов для остальных цехов предприятия сводим в таблицу 5.1.

Выбор КУ для цеха ПЦ.

«Наибольшее значение реактивной мощности, которое может быть передано через трансформаторы в сеть до 1кВ» [17]:

$$Q_m = \sqrt{1.1 \cdot S_m \cdot \beta_m \cdot N_{тэ}^2 - P_{рн}^2}; \quad 5.2$$

$$Q_m = \sqrt{1.1 \cdot 1600 \cdot 0.7 \cdot 2^2 - 1920^2} = 1544 \text{ квар.}$$

«Суммарная мощность батарей низковольтных конденсаторов» [17]:

$$Q_{нк1} = Q_{рн} - Q_m; \quad 5.3$$

$$Q_{нк1} = 2199 - 1543.73 = 656 \text{ квар.}$$

Таблица 5.1 – Расчет количества КТП и трансформаторов для остальных цехов

Сокращенные наименования цехов	$P_{рн}$, кВт	$Q_{рн}$, квар	$S_{рн}$, кВА	βm	$N_{T.MIN}$	№ТТП	S_{mp} , кВА	N_T	ΔP_{xx} , кВт	$\Delta P_{кз}$, кВт	$U_{кз}$, %	I_{xx} , %
ПЦ	1920	2199	2920	0.7	1.72	1	1600	2	2.65	16.5	6.0	1.0
АЦ + ЦВ	1322	1655	2118	0.7	1.89	3	1000	2	1.90	10.8	5.5	1.2
КЦ	2341	1912	3021	0.7	2.09	2	1600	2	2.65	16.5	6.0	1.0
СЦ	2555	1910	3021	0.7	3.65	4,5	1000	2	1.90	10.8	5.5	1.2
Ск + Кс +наружное освещение	929	1135	1467	0.7	1.40	7	1000	2	1.90	10.8	5.5	1.2
ПВС	987	901	1135	0.7	1.41	6	1000	2	1.90	10.8	5.5	1.2

«Мощность батарей низковольтных конденсаторов, приходящаяся на один силовой трансформатор» [17]:

$$Q_{нк} = \frac{Q_{нк1}}{N \min}. \quad 5.4$$

$$Q_{нк} = \frac{656}{2} = 328 \text{ квар.}$$

Принимаем к установке две КУ типа АУКРМ-400.

Результаты расчетов КУ для остальных трансформаторных подстанций сводим в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Результаты расчетов КУ для остальных трансформаторных подстанций

№ ТП	Q_m , квар	$Q_{нк1}$, квар	$Q_{нк}$, квар	$Q_{нкф}$, квар	$Q_{нкф1}$, кВА
1	1543.7	655.9	328	402	804
3	790.7	864.1	432.1	450	900
2	770.3	1139.9	569.9	536	1072
4,5	1720.2	1302.6	325.7	300	1200
7	1227.9	-93.3	-	-	-
6	1182.4	-281.7	-	-	-

Определим потери активной и реактивной мощности в трансформаторах первой ТП.

«Потери активной мощности в СТ» [17]:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot \beta^2; \quad 5.5$$

$$\Delta P_T = 2 \cdot 2.65 + \frac{16.2}{2} \cdot 0.74^2 = 9,8 \text{ кВт};$$

«Коэффициент загрузки СТ» [17]:

$$\beta_T = \frac{S_p}{N_{\min} \cdot S_T}; \quad 5.6$$

$$\beta_{T\Phi} = \frac{2374}{2 \cdot 1600} = 0.74.$$

«Полная расчетная мощность при установке КУ» [17]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p - Q_{\text{нкф1}}^2}. \quad 5.7$$

$$S_p = \sqrt{1920^2 + 2199 - 800^2} = 2376 \text{ кВА};$$

«Значение потерь реактивной мощности в СТ» [17]:

$$\Delta Q_T = \frac{S_{\text{ном}}}{100} (I_{xx} + U_{кз} \cdot \beta_T^2); \quad 5.8$$

$$\Delta Q_T = \frac{1600}{100} (2 \cdot 1 + \frac{6}{2} \cdot 0.74^2) = 58,4 \text{ квар}.$$

Результаты расчета потерь активной и реактивной мощности в остальных СТ сведем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 - Результаты расчета потерь активной и реактивной мощности в остальных СТ

№ ТП	S_p , кВА	$\beta_{\text{мф}}$	N_m	$S_{\text{ном}}$, кВА	$\Delta P_{m\Sigma}$, кВт	$\Delta Q_{m\Sigma}$, квар
1	2374	0.74	2	1600	9.8	58.4
3	1522	0.76	2	1000	8.2	43.9

Продолжение таблицы 5.3

<i>№ ТП</i>	S_p , кВА	$\beta_{мф}$	N_m	$S_{ном}$, кВА	$\Delta P_{м\Sigma}$, кВт	$\Delta Q_{м\Sigma}$, квар
2	2486	0.78	2	1600	10.3	61
4,5	3138	0.79	4	1000	9.3	56.5
7	1467	0.73	2	1000	6.7	38.8
6	1336	0.67	2	1000	6.2	72.8
Итого	12323	-	-	-	50.5	331.3

6 Выбор схемы внутриводского электроснабжения

На предприятии имеются два центра питания, в роли которых выступают высоковольтные распределительные пункты, получающие питание от генераторного распределительного устройства 10 кВ ТЭЦ по кабельным линиям.

От РП до ТП предприятия электроснабжение осуществляется так же кабельными линиями. Определим значение расчетного тока для ТП №3.

«Расчетный ток» [18]:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (6.1)$$
$$I_p = \frac{1566}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 2} = 45.2 \text{ A.}$$

«Сечение жилы кабеля по экономической плотности тока» [18]:

$$q_s = \frac{I_p}{j_s}, \quad (6.2)$$
$$q_s = \frac{45.2}{1.2} = 38 \text{ мм}^2.$$

Принимаем ближайшее сечение кабеля равное 35 мм².

Кабельную линию выполняем кабелем типа ААШВУ-10 3х35 с длительно допустимы током $I_{дон} = 115 \text{ A}$ и протяженностью. Стоимость кабельной линии составит:

$$K_{Л4} = 3.3 \cdot 0.043 \cdot 2 \cdot 3000 = 851 \text{ тыс.руб.}$$

Расчеты для остальных кабельных линий 10 кВ выполняем аналогично, результаты сводим в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Расчеты для остальных кабельных линий 10 кВ

КЛ	S_p , кВА	I_p , А	q_3 , мм ²	l , км	F , мм	$I_{доп}$, А	$K_0 \cdot 10^3$, тыс. руб./ км	K_l , тыс. руб.
от РП №1 до ТП №1	5344.8	154.2	128.6	0.12	3x120	240	4.5	3294
от ТП №1 до ТП №6	2815.5	81.2	67.7	0.25	3x70	165	3.8	5722
от ТП №6 до ТП №7	1439.8	41.5	34.6	0.13	3x35	115	3.3	2734
от РП №2 до ТП №3	1565.5	45.1	37.7	0.04	3x35	115	3.3	851
от РП №2 до ТП №2	5690.1	164.2	136.9	0.15	3x150	275	4.92	4457
от ТП №2 до ТП №5	3202.7	92.4	77.0	0.19	3x70	165	3.8	4468
от ТП №5 до ТП №4	1572.7	45.4	37.8	0.18	3x35	115	3.3	3742
Итого по кабельным линиям								25269

7 Определение токов короткого замыкания

В системе трехфазного переменного тока могут возникнуть непредусмотренные соединения проводников двух или трех фаз между собой или па землю, называемые короткими замыканиями. Это происходит при набрасывании проводника на воздушную линию, повреждении кабеля, падении поврежденной опоры воздушной линии со всеми проводами на землю, перекрытии фаз животными и птицами, обрыве проводов и т.д.

В результате короткого замыкания резко снижается сопротивление электрической цепи, так как полные сопротивления фазовых нагрузок Z_A , Z_B , Z_C одной, двух или всех трех фаз оказываются зашунтированными вследствие соединения проводов «накоротко». В точке короткого замыкания сопротивление фаз источника составляет лишь небольшую долю сопротивления нагрузки. Ток в короткозамкнутой цепи намного превышает рабочий ток. Наибольший ток короткого замыкания возникает при трехфазном коротком замыкании, поэтому данный ток и определяют для выбора электрического оборудования [5].

Определение значений токов короткого замыкания производим в о.е. При расчетах принимаем $S_B = 1000 \text{ MVA}$ и $U_B = 10,5 \text{ кВ}$.

Определим значение базисного тока [19, 20]:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}; \quad 7.1$$
$$I_B = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 55 \text{ кА}.$$

Формулы для определения сопротивлений элементов:

- генераторы

$$X_{\Gamma} = X_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_H}; \quad (7.2)$$

- трансформаторы

$$x_T = \frac{U_{k\%} \cdot S_B}{100 \cdot S_{HT}}, \quad (7.3)$$

- линии электропередач

$$X_{л} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}; \quad (7.4)$$

$$r_{л} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}; \quad (7.5)$$

Значение ЭДС генератора определяем по формуле:

$$E = \sqrt{(I_o \cdot x_d'' \cdot \cos \varphi_o)^2 + (U_o + I_o \cdot x_d'' \cdot \sin \varphi_o)^2}; \quad (7.6)$$

В таблицу 7.1 сводим справочные данные генераторов питающей электростанции.

Таблица 7.1 – Справочные данные генераторов питающей электростанции

№ генератора эл. станции	$S_{ном},$ МВА	$P_{ном},$ МВт	$\cos \varphi$	$U_{ном},$ кВ	$I_{ном},$ кА	X_d''
5-7	125.0	100	0,80	10.5	6.88	0.210
1-4	117.7	100	0,85	13.8	4.92	0.192
8-9	78.8	63	0,80	10.5	4.33	0.153

В таблицу 7.2 сводим справочные данные трансформаторов на питающей электростанции.

Таблица 7.2 - Справочные данные трансформаторов на питающей электростанции

№ трансформ. на эл. станции	$S_{ном},$ MVA	$U_{вн},$ кВ	$U_{нн},$ кВ	$U_{кз},$ %	$\Delta P_x,$ кВт	$\Delta P_k,$ кВт
8-9	40	115	10.5	10.5	34	170
1-4	80	121	13.8	11.0	85	310
5-7	80	115	10.5	10.5	58	310

Значение ЭДС генератора определяем по формуле 7.6:

$$E_{Г1-Г4} = \sqrt{(1 \cdot 0.210 \cdot 0,85)^2 + (1 + 1 \cdot 0.210 \cdot 0,527)^2} = 1.125.$$

$$E_{Г5-Г7} = \sqrt{(1 \cdot 0.192 \cdot 0,85)^2 + (1 + 1 \cdot 0.192 \cdot 0,6)^2} = 1.126.$$

$$E_{Г8-Г9} = \sqrt{(1 \cdot 0.153 \cdot 0,85)^2 + (1 + 1 \cdot 0.153 \cdot 0,6)^2} = 1.099.$$

Сопротивления трансформаторов электростанции определяем по формуле 7.3:

$$x_{Г1-Г4} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1.38;$$

$$x_{Г5-Г7} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1.31;$$

$$x_{Г8,Г9} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2.63;$$

Сопротивления генераторов электростанции определяем по формуле 7.2:

$$x_{Г1-Г4} = 0.210 \cdot \frac{1000}{117.7} = 1.78.$$

$$x_{Г5-Г7} = 0.192 \cdot \frac{1000}{125} = 1.54.$$

$$x_{\Gamma 8, \Gamma 9} = 0.153 \cdot \frac{1000}{78.8} = 1.94.$$

Сопровитвления ЛЭП определяем по формуле 7.4:

$$x_{л1} = 0.4 \cdot 95 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2.87,$$

$$x_{л2} = 0.4 \cdot 95 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2.87,$$

$$x_{л3} = 0.4 \cdot 70 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2.12,$$

$$x_{л4} = 0.4 \cdot 90 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2.72,$$

$$x_{л5} = 0.4 \cdot 90 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2.72,$$

$$x_{л6} = 0.4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1.81,$$

$$x_{л7} = 0.4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1.81.$$

На рисунке 7.1 приведена схема замещения после ряда преобразований.

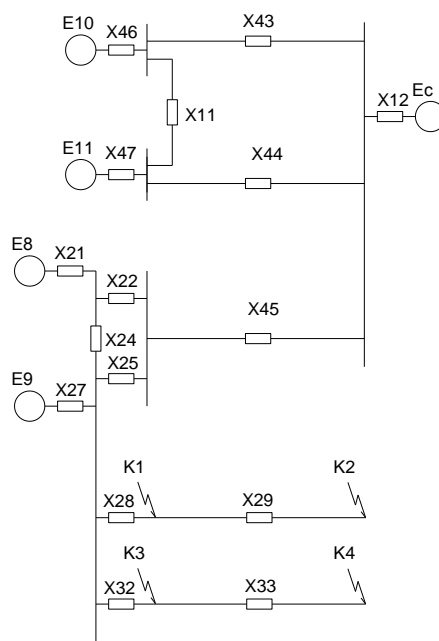


Рисунок 7.1 – Схема замещения

$$x_{36} = x_1 + x_2 = 1.78 + 1.38 = 3.16;$$

$$x_{36} = x_{37} = x_{38} = x_{39}$$

$$x_{46} = \frac{1}{1/x_{36} \cdot 4} = \frac{1}{1/3.16 \cdot 4} = 0.79;$$

$$x_{40} = x_{13} + x_{14} = 1.54 + 1.31 = 2.85;$$

$$x_{40} = x_{41} = x_{42}$$

$$x_{46} = \frac{1}{1/x_{40} \cdot 3} = \frac{1}{1/2.85 \cdot 4} = 0.95;$$

$$x_{43} = \frac{x_5 \cdot x_8}{x_5 + x_8} = \frac{2.87}{2} = 1.44;$$

$$x_{44} = \frac{x_{17} \cdot x_{20}}{x_{17} + x_{20}} = \frac{2.72}{2} = 1.36;$$

$$x_{45} = \frac{x_{23} \cdot x_{26}}{x_{23} + x_{26}} = \frac{1.81}{2} = 0.91;$$

$$E_{10} = \frac{E_1 \cdot 1/x_{36} \cdot 4}{1/x_{36} \cdot 4} = \frac{1.25 \cdot 1/3.16 \cdot 4}{1/3.16 \cdot 4} = 1.12;$$

$$E_{11} = \frac{E_5 \cdot 1/x_{40} \cdot 3}{1/x_{40} \cdot 3} = \frac{1.26 \cdot 1/2.85 \cdot 3}{1/2.85 \cdot 3} = 1.13;$$

На рисунке 7.2 приведена схема замещения после сворачивания и определения эквивалентных сопротивлений.

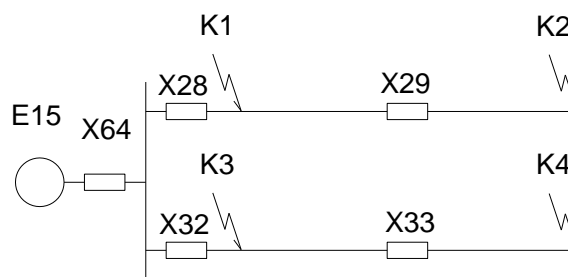


Рисунок 7.2 – Свернутая схема замещения

$$x_{63} = x_{53} + x_{62} = 0.62 + 1.21 = 1.84;$$

$$x_{64} = x_{\Sigma} = \frac{x_{63} \cdot x_{27}}{x_{63} + x_{27}} = \frac{1.84 \cdot 1.94}{1.84 + 1.94} = 0.94;$$

$$E_{15} = E_{\text{эКБ}} \frac{E_9 \cdot x_{62} + E_{14} \cdot x_{27}}{x_{62} + x_{27}} = \frac{1.099 \cdot 1.84 + 1.07 \cdot 1.94}{2.3 + 2.57} = 1.08;$$

Значение установившегося тока короткого замыкания:

$$I_{\kappa} = \frac{E_{\text{эКБ}}}{x_{\Sigma}} \cdot I_B; \quad (7.7)$$

Значение ударного тока короткого замыкания:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{\Pi,0}; \quad (7.8)$$

Определим значение установившегося тока короткого замыкания на шинах генераторного распределительного устройства:

$$I_{\kappa 1} = \frac{1.08}{0.94} \cdot 54.99 = 63.13 \text{ кА.}$$

При токе КЗ превышающем значение в 20 кА требуется установка токоограничивающего реактора. Требуемое значение сопротивления:

$$X'_{\Sigma} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot I'_{\kappa}}, \quad (7.9)$$

$$X'_{\Sigma} = \frac{10.5}{\sqrt{3} \cdot 20} = 0.3 \text{ Ом.}$$

$$X_{\Sigma} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \cdot I_{\kappa}}, \quad (7.10)$$

$$X_{\Sigma} = \frac{10.5}{\sqrt{3} \cdot 63.13} = 0.1 \text{ Ом.}$$

$$X_{реак} = X'_{\Sigma} - X_{\Sigma}, \quad (7.11)$$

$$X_{реак} = 0.3 - 0.1 = 0.2 \text{ Ом.}$$

Принимаем к установке реактор типа РБУ 10-1000 со значением индуктивного сопротивления 0,35 Ом.

Определим значение тока короткого замыкания после установки реактора:

$$X_{p*} = X_p \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}, \quad (7.12)$$

$$I_{к1} = \frac{54.99 \cdot 1.08}{3.17 + 0.94} = 14.47 \text{ кА.}$$

Выбираем кабельные линии для участков от ГРУ до распределительных пунктов.

Значение расчетного тока для РП №1:

$$I_P = \frac{S_P}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (7.13)$$

$$I_P = \frac{10743.94}{\sqrt{3} \cdot 10} = 620.3 \text{ А};$$

$$I_{КЛ} = \frac{I_P}{2} = \frac{620.3}{2} = 310.2 \text{ А.}$$

«Определим сечение кабеля по экономической плотности тока» [12]:

$$F_{\text{э}} = \frac{310.15}{1,2} = 259 \text{ мм}^2;$$

Принимаем от ГРУ до РП №1 два кабеля типа ААШВУ – 3х240 с
 $I_{доп} = 355 \text{ А}$ каждого.

Проверяем выбранный кабель на нагрев токами длительного режима:

$$I_{доп} = k_{II} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_{допн} > I_p; \quad (7.14)$$
$$I_{доп} = 1,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 355 = 462 \text{ А} > I_{РА} = 310 \text{ А};$$

Выбранные кабели к РП №1 прошли проверку.

Значение расчетного тока для РП №2:

$$I_p = \frac{8491}{\sqrt{3} \cdot 10} = 490 \text{ А};$$
$$I_{кл} = 490 / 2 = 245 \text{ А}.$$

«Определим сечение кабеля по экономической плотности тока» [12]:

$$F_{э} = \frac{245}{1.2} = 205 \text{ мм}^2;$$

Принимаем от ГРУ до РП №2 два кабеля типа ААШВУ – 3х240 с
 $I_{доп} = 355 \text{ А}$ каждого.

Проверяем выбранный кабель на нагрев токами длительного режима:

$$I_{доп} = 1,3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 355 = 461.5 \text{ А} > I_p = 245 \text{ А};$$

Выбранные кабели к РП №2 прошли проверку.

Определим значение теплового импульса:

$$B_k = I_k^2 \cdot (t_{отк} + T_a); \quad (7.15)$$
$$B_k = (14.47 \cdot 10^3)^2 \cdot 1.5 + 0.01 = 316 \cdot 10^6;$$

Проверим выбранное сечение кабеля на термическую стойкость:

$$F_m = \frac{\sqrt{B_k}}{C}; \quad (7.16)$$

$$F_m = \frac{\sqrt{316 \cdot 10^6}}{100} = 178 \text{ мм}^2.$$

Выбранное сечение кабеля прошло проверку на термическую стойкость.

По данным производителя удельное сопротивление кабеля $x_0 = 0,079 \text{ Ом/км}$, $r_0 = 0,206 \text{ Ом/км}$. Определим сопротивление кабельной линии в относительных единицах:

$$r_{KL} = 0.206 \cdot 1.7 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 3.18;$$

$$x_{KL} = 0.079 \cdot 1.7 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 1.22.$$

Суммарное сопротивление до второй точки К3 составит:

$$x_{PE3} = x_{64} + x_{реакт} + x_{29,30} = 0.94 + 3.17 + 1.56 = 4.73.$$

Значение установившегося тока короткого замыкания в точке К2:

$$I_{K2} = \frac{1.08}{4.73} \cdot 54.99 = 12.6 \text{ кА};$$

Значение ударного тока короткого замыкания в точке К2:

$$i_y^{K2} = \sqrt{2} \cdot 1.35 \cdot 12.6 = 24.1 \text{ кА}.$$

По данным производителя удельное сопротивление кабельной линии от РП №2 до трансформаторной подстанции №3 $x_0 = 0.081$ Ом/км, $r_0 = 0.253$ Ом/км. Определим сопротивление кабельной линии в относительных единицах:

$$r_{ЛПЗ} = 0.253 \cdot 0.2 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 0.46,$$

$$x_{ЛПЗ} = 0.081 \cdot 0.2 \cdot \frac{1000}{10.5^2} = 0.15.$$

Значение установившегося тока короткого замыкания на стороне ВН трансформаторной подстанции №3 составит:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{1.08}{4.73 + 0.15} \cdot 54.99 = 12.2 \text{ кА}$$

Найдем значение тока трехфазного короткого замыкания на стороне низкого напряжения силового трансформатора подстанции №3.

«Сопротивление системы» [19]:

$$X_c = \frac{U_{ср.н} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot I_{к}^{(3)}}; \quad (7.17)$$

$$X_c = \frac{10.5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 12.22} = 496 \text{ МОм.}$$

Приведенное к стороне 0,4 кВ:

$$X_c^{(0)} = \frac{X_c \cdot U_{ср.нн}^2}{U_{ср.нв}^2}; \quad (7.18)$$

$$X_c^{(0)} = \frac{496 \cdot 0.4^2}{10.5^2} = 0.72 \text{ мОм.}$$

«Сопротивления силового трансформатора определим по формуле»
[19]:

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_H^2}{S_H} \cdot 10^6, \quad (7.19)$$

$$R_T = \frac{10.8 \cdot 0.38}{1000} \cdot 10^6 = 1.56 \text{ мОм.}$$

$$X_T = \sqrt{U_k^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{10 \cdot S_H} \right)^2} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot 10^4; \quad (7.20)$$

$$X_T = \sqrt{5.5^2 - \left(\frac{10.8}{10 \cdot 1000} \right)^2} \cdot \frac{0.38}{1000} \cdot 10^6 = 7.94 \text{ мОм}$$

Тогда значение тока трехфазного короткого замыкания на стороне 0,4 кВ трансформаторов подстанции №3:

$$I_{кнн}^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}; \quad (7.21)$$

$$I_{кнн}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1.56^2 + 0.72 + 7.94^2}} = 26.2 \text{ кА.}$$

Тогда значение тока трехфазного короткого замыкания, приведенное к стороне 10 кВ:

$$I_k^{(3)} = \frac{I_{кнн}^{(3)}}{n_m}; \quad (7.22)$$

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{26240.32}{26} = 1 \text{ } \kappa A.$$

8 Выбор и проверка электроаппаратов

8.1 Выбор выключателей и разъединителей

«Высоковольтные выключатели выбираются по следующим параметрам» [4, 5, 7]:

$$U_{н.в.} \geq U_p, \quad (8.1)$$

$$I_{н.в.} \geq I_p; \quad (8.2)$$

$$i_{дин} \geq i_y, \quad (8.3)$$

$$I_t^2 \cdot t \geq I_\infty^2 \cdot t_\infty; \quad (8.4)$$

Находим значение ударного тока КЗ

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_\kappa; \quad (8.5)$$

Выбранный высоковольтный выключатель проверяем на коммутационную способность:

$$S_{отк} \geq S_\kappa; \quad (8.6)$$

где

$$S_{отк} = \sqrt{3} \cdot I_{отк} \cdot U_{н.в.}; \quad (8.7)$$

Выбираем вводной выключатель для распределительного пункта №1.

Предварительно выбираем выключатель типа ВВ/TEL-10-12.5/630-УЗ, условия выбора и проверки:

$$U_{н.в.} = 10 \text{ кВ} = U_p = 10 \text{ кВ}, \quad I_{н.в.} = 630 \text{ А} \geq I_p = 620.3 \text{ А};$$

$$i_{дин} = 51 \text{ кА} \geq i_y = 1.35 \cdot \sqrt{2} \cdot 12.60 = 24.06 \text{ кА},$$

$$I_t^2 t = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \text{с} \geq 12.6^2 \cdot (1.1 + 0.01) = 176 \text{ кА}^2 \text{с},$$

$$S_{отк} = \sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10 = 346 \text{ МВА} \geq S_k = \sqrt{3} \cdot 12.6 \cdot 10 = 218.3 \text{ МВА}.$$

Выключатель типа ВВ/TEL-10-12.5/630-У3 прошел проверку.

Итоговые данные по выбору вводного высоковольтного выключателя для распределительного пункта №2 заносим в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 - Выбор вводного высоковольтного выключателя для распределительного пункта №2

Условие выбора и проверки ВВ	Данные производителя ВВ/TEL-10-20/630	Расчетные данные по РП №2
$U_{н.в.} \geq U_p, \text{кВ}$	10	10
$I_{н.в.} \geq I_p, \text{А}$	630	490.2
$i_{дин} \geq i_y, \text{кА}$	51	24.1
$I_{отк} \geq I_k, \text{кА}$	20	12.6
$I_t^2 \cdot t \geq I_\infty^2 \cdot t_\infty, \text{кА}^2 \cdot \text{с}$	1200	176
$S_{отк} \geq S_k, \text{МВА}$	346	218.3

Итоги проверки высоковольтных выключателей для защиты отходящих линий к ТП и секционных выключателей на РП заносим в таблицу 8.2.

Итоговые данные по выбору и проверке разъединителей для распределительных пунктов №1 и №2 заносим в таблицу 8.3.

Предварительно выбираем разъединитель типа РВФЗ-10/630.

Таблица 8.2 - Итоги проверки высоковольтных выключателей для защиты отходящих линий к ТП и секционных выключателей на РП

Условие выбора и проверки ВВ	Данные производителя ВВ/TEL-10-20/630	ТП №1	ТП №2	ТП №3	Секционный выключатель РП №1	Секционный выключатель РП №2
$U_{н.в.} \geq U_p, кВ$	10	10	10	10	10	10
$I_{н.в.} \geq I_p, А$	630	308.8	331.6	90.4	620.3	490.2
$i_{отк} \geq i_y, кА$	51	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1
$I_{отк} \geq I_k, кА$	20	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6
$I_t^2 \cdot t \geq I_\infty^2 \cdot t_\infty, кА^2 \cdot с$	1200	176	176	176	176	176
$S_{отк} \geq S_k, МВА$	346	218.3	218.3	218.3	218.3	218.3

Таблица 8.3 - Итоговые данные по выбору и проверке разъединителей для распределительных пунктов №1 и №2

Условие выбора и проверки разъединителя	Данные производителя РВФЗ-10/630	Расчетные данные по РП №1	Расчетные данные по РП №2
$U_{н.р.} \geq U_p, кВ$	10.0	620.3	490.24
$I_{н.р.} \geq I_p, кА$	630	24.06	24.06
$i_{отк} \geq i_y, кА$	52	12.6	12.6
$I_t^2 \cdot t \geq I_\infty^2 \cdot t_\infty, кА^2 \cdot с$	1600	176	176

Итоги проверки разъединителей на отходящих линиях к ТП и между секциями на РП заносим в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 - Итоги проверки разъединителей на отходящих линиях к ТП и между секциями на РП

Условие выбора и проверки разъединителя	Данные производителя РВФЗ-10/630	ТП №1	ТП №2	ТП №3	Секционный выключатель РП №1	Секционный выключатель РП №2
$U_{н.р.} \geq U_p, кВ$	10	10	10	10	10	10
$I_{н.р.} \geq I_p, кА$	630	308.8	331.6	90.4	620.3	490.2
$i_{дин} \geq i_y, кА$	41	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1
$I_t^2 \cdot t \geq I_\infty^2 \cdot t_\infty, кА^2 \cdot с$	768	176	176	176	176	176

Автоматические выключатели на стороне 0,4 кВ цеховых ТП выбираем по условиям:

$$I_{н.а.} \geq I_{p.\max}, \quad (8.8)$$

$$I_{н.р.} \geq I_{p.\max}, \quad (8.9)$$

$$I_{p.\max} = \frac{1.4 \cdot S_{н.т.}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (8.10)$$

$$I_{p.\max} = \frac{1.4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 2127 \text{ А},$$

$$I_{p.\max} = \frac{1.4 \cdot 1600}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 3403 \text{ А}.$$

Таким образом для трансформаторов с номинальной мощностью 1000 кВА выбираем автоматические выключатели производства завода Самарский Электроцит типа ВА-СЭЩ-В-АН25Е с номинальным током 2500 А и током

расцепителя равным 2500 А. Для трансформаторов с номинальной мощностью 1600 кВА выбираем автоматические выключатели производства завода Самарский Электроцит типа ВА-СЭЩ-В-АН40Е с номинальным током 4000 А и током расцепителя равным 4000 А.

Секционные выключатели выбираем по номинальному току:

$$I_{на} \geq \frac{0.7 \cdot 1.4 \cdot S_m}{\sqrt{3} \cdot 0.38}, \quad (8.11)$$

$$I_{на} \geq \frac{0.7 \cdot 1.4 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 1489 \text{ А.}$$

Таким образом для двухтрансформаторных подстанций с трансформаторами номинальной мощностью 1000 кВА выбираем автоматические выключатели производства завода Самарский Электроцит типа ВА-СЭЩ-В-АН16Е с номинальным током 1600 А и током расцепителя равным 1600 А. Для двухтрансформаторных подстанций с трансформаторами номинальной мощностью 1600 кВА выбираем автоматические выключатели производства завода Самарский Электроцит типа ВА-СЭЩ-В-АН25Е с номинальным током 2500 А и током расцепителя равным 2500 А.

Значение номинального тока для устройств компенсации реактивной мощности находим по формуле:

$$I_{HK} = \frac{Q_{HK}}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (8.12)$$

Условие выбора:

$$I_y = \frac{1,25 \cdot Q_{HK}}{\sqrt{3} \cdot U_H}. \quad (8.13)$$

Найдем значения для конденсаторной установки типа АУКРМ-0.4-400

$$I_{HK} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 610 \text{ A} ,$$

$$I_y = \frac{1.25 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 763 \text{ A} .$$

Выбираем для защиты конденсаторных установок автоматический выключатель типа ВА-СЭЩ-В-АН06Е с номинальным током расцепителя 630 А.

8.2 Выбор измерительных трансформаторов тока и напряжения

Выбор трансформатора напряжения осуществляется по мощности вторичной нагрузки. Предварительно выбираем на каждой секции распределительного пункта трансформаторы напряжения типа НАМИ-10 с максимальной мощностью вторичной нагрузки 120 ВА в заявленном классе точности.

Ко вторичной нагрузке относятся вольтметр, счётчики активной и реактивной электрической энергии с общей мощностью $P_{np} = 12 \text{ Вт}$ и $Q_{np} = 39 \text{ вар}$. Тогда полная мощность вторичной нагрузки составит:

$$S_2 = \sqrt{12^2 + 39^2} = 41 \text{ ВА} .$$

Так как максимальная паспортная нагрузка трансформатора напряжения превышает фактическую, то трансформатор напряжения выбран правильно.

Трансформаторы тока выбираются по величине номинальной нагрузки вторичной обмотки:

$$S_2 = S_{np.\delta} + I_2^2 \cdot (r_{np} + r_{кон}) \quad (8.14)$$

где $r_{кон} = 0,1 \text{ Ом}$, $I_2 = 5 \text{ А}$.

$$r_{np} = \frac{S_2 - S_{np.\delta} - I_2^2 \cdot r_{кон}}{I_2^2}. \quad (8.15)$$

Выбранный трансформатор тока проверяется на электродинамическую стойкость:

$$K_{дин} \geq \sqrt{2} \cdot I_{ном1} \geq i_y. \quad (8.16)$$

и термическую стойкость:

$$K_t \geq I_\infty \sqrt{t_{cp}} / I_{ном}. \quad (8.17)$$

Ко вторичной нагрузке ТТ в распределительном пункте относятся амперметр и счетчик активной и реактивной электрической энергии с суммарной мощностью 5 ВА.

Принимаем к установке трансформаторы тока типа ТОЛ-10 с номинальной мощностью вторичной нагрузки 10 ВА.

$$r_{np} = \frac{10 - 5 - 5^2 \cdot 0.1}{5^2} = 0.1 \text{ Ом}; \quad I_{н1} = 800 \text{ А}; \quad I_{н2} = 5 \text{ А}.$$

Проверяем выбранный трансформатор тока на электродинамическую стойкость:

$$51 \text{ кА} > 14.5 \text{ кА}.$$

По номинальной величине вторичного тока:

$$800 \text{ A} > 620 \text{ A}.$$

На термическую стойкость:

$$31.5 \text{ кА} \geq 12.6 \cdot \sqrt{1.61} = 16 \text{ кА}.$$

Трансформатор тока ТОЛ-10 прошел проверку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе по проектированию системы электроснабжения предприятия по выпуску шин для грузовых автомобилей были определены суммарные расчетные нагрузки по всем цехам предприятия. Суммарная нагрузка РП №1 составила 10,7 МВА, а РП №2 – 8,5 МВА. Для электроснабжения электроприемников цеха выбрали схему блок трансформатор-магистраль, когда роль распределительного устройства 0,4 кВ выполняет магистральный шинопровод, а отдельные электроприемники получают питание от распределительных шинопроводов подключаемых к магистральному. Выбраны сечения проводов и кабелей для питания отдельных электроприемников, а также автоматические выключатели для их защиты. Для внутрицехового освещения применяем светодиодные светильники типа НВ LED производства Световых технологий с мощностью светильника 225 Вт. Выбраны номинальные мощности трансформаторов КТП и батарей конденсаторов. На предприятии имеются два центра питания, в роли которых выступают высоковольтные распределительные пункты, получающие питание от генераторного распределительного устройства 10 кВ ТЭЦ по кабельным линиям. От РП до ТП предприятия электроснабжение осуществляется так же кабельными линиями. Выполнен расчет токов короткого замыкания. По найденным значениям были выбраны и проверены высоковольтные выключатели, разъединители, автоматические выключатели, трансформаторы тока и напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бартоломей П.А. Информационное обеспечение задач электроэнергетики: учебное пособие, 2-е изд., стер. М.: Флинта, Изд-во Урал. ун-та, 2017. 108 с.
2. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей [Электронный ресурс]. Электрон. дан. Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. 188 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/72323> (дата обращения: 28.04.2019).
3. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering. Fundamentals. Oxford: Newnes, 2014. 539 p.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник. М.: Феникс, 2018. 382 с.
5. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: учебное пособие. М.: Форум, 2015. 368 с.
6. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаш А.С. Основы электроснабжения. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 173 с.
7. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Проектирование систем электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 78 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2976/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 02.05.2019).
8. Вахнина В.В., Черненко А.Н. Системы электроснабжения [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 46 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/2943/1/Vahnina%20Chernenko_EUMI_Z.pdf (дата обращения: 02.05.2019).

9. Chapman S.J. Instructor's Manual to accompany Electric Machinery and Power System Fundamentals, Second Edition. USA: McGraw-Hill, 2011. 307 p.
10. Сазонова Т.В., Шлейников В.Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие. М.: Бибком, 2016. 110 с.
11. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий [Электронный ресурс]: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М. : ИНФРА-М, 2019. 405 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/1003810> (дата обращения: 18.03.2019).
12. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие. М.: Форум, 2019. 496 с.
13. Вахнина В.В., Черненко А.Н., Самолина О.В., Рыбалко Т.А. Проектирование осветительных установок [Электронный ресурс]: электронное учеб.-метод. пособие. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. 107 с. URL: https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/3383/1/Vahnina%20Chernenko%20Samolina%20Ribalko_%20EUI_Z.pdf (дата обращения: 17.04.2019).
14. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование ОУ и электроустановок промышленных механизмов [Электронный ресурс]: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 352 с. URL: <http://znanium.com/catalog/product/494251> (дата обращения 19.04.2019).
15. Rajan R., Fernandez F.M. Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. №110. pp. 171-183.
16. Rajendra P. Fundamentals of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. 1064 p.

17. Матаев У.М. Практикум по электроэнергетике (в примерах с решениями) : учебное пособие. Алматы: Нур-Принт, Казахский национальный аграрный университет, 2014. 195 с.
18. Хорольский В.Я., Таранов М.А., Петров Д.В. Техничко-экономические расчеты распределительных электрических цепей: учебное пособие. М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. 96 с.
19. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 263 с.
20. Sahdev S.K. Basic Electrical Engineering. Pearson India, 2015. 768 p.