

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт открытого и дистанционного образования
Кафедра «Техника, технологии и строительство»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
к.т.н., доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2021 г.

Качество электроэнергии для электроприводов, работающих в цехах
промышленного предприятия

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.03.02.2021.054.00.ПЗ ВКР

Руководитель работы,
Доцент, канд. ф-м. наук
_____ В.И. Сафонов
_____ 2021г.

Автор работы
студент группы ДО – 514
_____ Е.В. Гусева
_____ 2021г.

Нормоконтролер,
преподаватель
_____ О.С. Микерина
_____ 2021г.

Челябинск
2021

АННОТАЦИЯ

Гусева, Е.В. - Качество электроэнергии для электроприводов, работающих в цехах промышленного предприятия – Челябинск: ЮУрГУ; 2021, 48 с., 18 ил., библиогр. список – 24 назим., 7 листов чертежей формата А3.

Согласно заданию в цехах с нагрузками третьей категории надежности электроснабжения планируется установить два мощных асинхронных двигателя, относящихся ко второй категории надежности. Целью работы является поиск наиболее оптимального решения.

Сначала методом упорядоченных диаграмм рассчитаны электрические нагрузки цехов до и после реконструкции. На основании расчета нагрузок выбрано основное оборудование системы электроснабжения – трансформаторы ТП и кабельные линии от ТП до ГПП. После расчета токов короткого замыкания, выбранные кабельные линии проверены на термическую прочность.

Для технико-экономического сравнения выбраны несколько вариантов резервирования и несколько вариантов пуска двигателя. После проведения расчетов качества электроэнергии некоторые варианты были отброшены как технически недопустимые.

Основным критерием при технико-экономическом сравнении была минимизация приведенных затрат, в которых учитывались капитальные затраты и стоимость электрической энергии. В результате был принят вариант с кабельной перемычкой между цехами и использованием тиристорного контактора (для спокойной нагрузки) и преобразователя частоты (для резкопеременной нагрузки).

Для принятого варианта проведен расчет качества электрической энергии (падение напряжения и несинусоидальность) на шинах 0.4 кВ.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» сформулированы общие требования электробезопасности в цехе и особые требования безопасности при эксплуатации кабельной перемычки между цехами.

В целом принятое решение удовлетворяет всем нормативным требованиям и, как показало технико-экономическое сравнение вариантов, является наиболее экономичным.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Гусева				Качество электроэнергии для электроприводов, работающих в цехах промышленного предприятия	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Сафонов					Д	3	48
Н. Контр.	Микерина					ЮУрГУ Кафедра Техники, технологии и строительства		
Утв.	Виноградов							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХОВ.....	7
1.1 Индивидуальные электрические нагрузки.....	7
1.2 Групповые электрические нагрузки.....	10
1.3 Электрическая нагрузка цеха.....	12
1.4 Выбор кабельных линий 10 кВ.....	15
2 ВЫБОР ВАРИАНТА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ.....	19
2.1 Вариант с двухтрансформаторными подстанциями.....	19
2.2 Вариант с кабельной перемычкой 0.4 кВ.....	19
2.3 Вариант с дизель генераторами.....	23
3 ВЫБОР СПОСОБА ПУСКА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	25
3.1 Прямой пуск двигателей.....	25
3.2 Плавный пуск двигателей.....	27
3.3 Пуск и регулирование двигателей преобразователем частоты.....	28
4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ.....	30
4.1 Сравнимые варианты.....	30
4.2 Методика сравнения вариантов.....	30
4.3 Выбор оптимального варианта.....	32
5 КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	36
5.1 Падение напряжения.....	36
5.2 Несинусоидальность напряжения.....	37
6 ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В ЦЕХЕ.....	40
6.1 Общие правила электробезопасности.....	40
6.2 Требования безопасности при обслуживании электроустановок.....	41
6.3 Особенности послеаварийного режима для принятого варианта.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	46

ВВЕДЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассматривается следующая ситуация, которая часто возникает на производстве. Имеются два цеха с нагрузкой 3-ей категории по надежности электроснабжения [1]. Соответственно их электроснабжение организовано по наиболее простой схеме – без дублирования кабелей и трансформаторов. Эти два цеха расположены на расстоянии 100 м друг от друга и их питание организовано от разных секций шин главной понизительной подстанции промышленного предприятия.

В каждом из цехов возникла необходимость подключить по асинхронному двигателю средней мощности, причем данную нагрузку необходимо рассматривать как нагрузку 2-ой категории по надежности электроснабжения [1]. Поэтому необходимо организовать резервное питание от дополнительного источника. Задачей выпускной квалификационной работы является выбор наиболее экономически оптимального решения по реконструкции системы электроснабжения обоих цехов.

Исходные данные для выпускной квалификационной работы приведены ниже. Они включают в себя данные о подключении к шинам 10 кВ главной понизительной подстанции и данные об электрической нагрузке цехов до и после предполагаемой реконструкции.

1. Характеристика точки подключения: напряжение 10 кВ, мощность короткого замыкания 100 МВА, расстояние до цеха 1 – 200 м, расстояние до цеха 2 – 300 м, между цехами – 100 м. Цеха подключены к разным секциям шин главной понизительной подстанции.

2. Данные о существующей электрической нагрузке цеха 1 приведены в таблице 1. Нагрузки отнесены к 3-ей категории по надежности электроснабжения [1] и присоединены к шинопроводу по магистральной схеме.

3. Данные о существующей электрической нагрузке цеха 2 приведены в таблице 1. Нагрузки отнесены к 3-ей категории по надежности электроснабжения и присоединены к шинопроводу по магистральной схеме.

Таблица 1 Электрическая нагрузка цеха 1

нагрузка	Количество, шт.	Активная мощность $P_{ном}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{ном}$, кВАр	Коэффициент использования, $k_{и.а}$
нагрузка 1	2	4.5	2.4	0.4
нагрузка 2	3	6.8	4.1	0.6
нагрузка 3	3	10.2	6.8	0.5
нагрузка 4	2	14.2	9.7	0.3
нагрузка 5	8	3.3	2.0	0.9
нагрузка 6	1	21.9	21.8	0.8
нагрузка 7	1	28.8	26.9	0.3
нагрузка 8	2	12.9	12.5	0.9
нагрузка 9	1	21.3	21.7	0.1

Окончание таблицы 1

нагрузка	Количество, шт.	Активная мощность $P_{\text{НОМ}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{НОМ}}$, кВАр	Коэффициент использования, $k_{\text{и.а}}$
нагрузка 10	7	5.5	6.5	0.3

Таблица 2 Электрическая нагрузка цеха 2

нагрузка	Количество, шт.	Активная мощность $P_{\text{НОМ}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{НОМ}}$, кВАр	Коэффициент использования, $k_{\text{и.а}}$
нагрузка 1	8	2.5	1.4	0.4
нагрузка 2	2	16.8	14.1	0.6
нагрузка 3	2	20.2	16.8	0.5
нагрузка 4	6	4.2	3.7	0.3
нагрузка 5	1	11.1 (однофазная)	1	0.9
нагрузка 6	3	11.9	11.8	0.8
нагрузка 7	2	18.8	6.9	0.3
нагрузка 8	1	22.9	12.5	0.9
нагрузка 9	1	13.3 (однофазная)	10.6	0.1
нагрузка 10	2	25.5	16.5	0.3

Однофазная нагрузка включена на фазное напряжение сети.

4. Данные о добавленной электрической нагрузке:

В цехе 1 добавлен асинхронный электрический двигатель номинальной мощностью 80 кВт и 70 кВАр. Коэффициент использования 0.5. Характер нагрузки резкопеременный.

В цехе 2 добавлен асинхронный электрический двигатель номинальной мощностью 80 кВт и 60 кВАр. Коэффициент использования 1. Характер нагрузки спокойный, постоянный в течении смены.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

1 СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХОВ

Расчет электрических нагрузок выполнен методом упорядоченных диаграмм [2]. В системе электроснабжения цеха существует несколько характерных точек, в которых необходимо определять расчетные электрические нагрузки. Расчет нагрузок проводим последовательно, от низших уровней к высшим в системе электроснабжения.

1.1 Индивидуальные электрические нагрузки

Первый уровень составляют отдельные электроприемники напряжением 380 В [2]. Определение расчетной нагрузки необходимо для выбора сечения кабеля до электроприемника и аппарата его присоединения к питающей линии.

Ток, протекающий в кабеле, соединяющем нагрузку с шинопроводом можно рассчитать по формуле

$$I_p = \frac{\sqrt{P_{ном}^2 + Q_{ном}^2}}{U_{л} \sqrt{3}}, \quad (1.1)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность нагрузки;

$Q_{ном}$ – номинальная реактивная мощность нагрузки;

$U_{л}$ – линейное напряжение сети.

Для питания электрооборудования применяем алюминиевые 4-х жильные кабели с ПВХ изоляцией, марки АВВГ.

При правильном согласовании характеристик нагрузки, кабеля и автоматического выключателя должны выполняться условия. Ток уставки теплового расцепителя меньше длительно допустимого ток кабеля, но больше рабочего тока нагрузки. Выполнение первого условия обеспечивает отключение нагрузки при достижении недопустимого. Выполнение второго условия позволяет беспрепятственно подключать нагрузку без ложного срабатывания релейной защиты.

Тепловой расцепитель автоматического выключателя выбираем из условия

$$I_{у(ТР)} = K_{у(ТР)} \cdot I_p, \quad (1.2)$$

где I_p – номинальный фазный ток нагрузки;

$K_{у(ТР)} = 1.2$ – кратность уставки теплового расцепителя для линии с электродвигателем [3];

$I_{у(ТР)}$ – ток тепловой уставки автоматического выключателя.

Сечения кабелей выбираем из справочных данных по условию:

$$I_{доп} > I_{у(ТР)}, \quad (1.3)$$

где $I_{доп}$ – допустимая токовая нагрузка для кабеля с данным сечением;

$I_{у(ТР)}$ – ток тепловой уставки автоматического выключателя.

Результаты выбора марки кабелей для цеха 1, выполненного по формулам (1.1) –(1.3), приведены в таблице 1.1. В колонке «ток расцепителя» указаны предельно допустимые и выбранные из каталога токи расцепителя (в скобочках). При

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

определении допустимого тока и выборе марок оборудования использовалась справочная литература [1, 4].

Таблица 1.1 Выбор марки кабелей для цеха 1

номер нагрузки	Активная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{ном}}$, кВАр	Ток нагрузки I_p , А	Ток расцепителя [4], $I_{y(TP)}$ А	Допустимый ток кабеля [1] $I_{\text{доп}}$, А	Марка кабеля [4]
нагрузка 1	4.5	2.4	7.7	9.3 (10)	15	АВВГ-(4×1.5)
нагрузка 2	6.8	4.1	12.1	14.5 (16)	21	АВВГ-(4×2.5)
нагрузка 3	10.2	6.8	18.6	22.3 (25)	27	АВВГ-(4×4)
нагрузка 4	14.2	9.7	26.1	31.4 (32)	40	АВВГ-(4×6)
нагрузка 5	3.3	2.0	5.9	7.0 (10)	15	АВВГ-(4×1.5)
нагрузка 6	21.9	21.8	47.0	56.3 (63)	70	АВВГ-(4×16)
нагрузка 7	28.8	26.9	59.9	71.9 (75)	100	АВВГ-(4×35)
нагрузка 8	12.9	12.5	27.3	32.8 (40)	48	АВВГ-(4×10)
нагрузка 9	21.3	21.7	46.2	55.4 (63)	70	АВВГ-(4×16)
нагрузка 10	5.5	6.5	12.9	15.5 (16)	21	АВВГ-(4×2.5)

Результаты выбора марки кабелей для цеха 2, выполненного по формулам (1.1) – (1.3), приведены в таблице 1.2. В колонке «ток расцепителя» указаны предельно допустимые и выбранные из каталога токи расцепителя (в скобках). При определении допустимого тока и выборе марок оборудования использовалась справочная литература [1, 4].

Таблица 1.2 Выбор марки кабелей для цеха 2

номер нагрузки	Активная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{ном}}$, кВАр	Ток нагрузки I_p , А	Ток расцепителя, $I_{y(TP)}$ А	Допустимый ток кабеля [1] $I_{\text{доп}}$, А	Марка кабеля [4]
нагрузка 1	2.5	1.4	4.4	5.2 (6)	15	АВВГ-(4×1.5)

Окончание таблицы 1.2

номер нагрузки	Активная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{ном}}$, кВАр	Ток нагрузки I_p , А	Ток расцепителя, $I_{y(TP)}$ А	Допустимый ток кабеля [1] $I_{\text{доп}}$, А	Марка кабеля [4]
нагрузка 2	16.8	14.1	33.3	40.0 (40)	48	АВВГ-(4×10)
нагрузка 3	20.2	16.8	39.9	47.9 (63)	70	АВВГ-(4×16)
нагрузка 4	4.2	3.7	8.5	10.2 (16)	21	АВВГ-(4×2.5)
нагрузка 5	11.1	1	50.8	60.1 (63)	70	АВВГ-(2×16)
нагрузка 6	11.9	11.8	25.5	30.5 (32)	48	АВВГ-(4×10)
нагрузка 7	18.8	6.9	30.4	36.5 (40)	48	АВВГ-(4×10)
нагрузка 8	22.9	12.5	39.6	47.6 (63)	70	АВВГ-(4×16)
нагрузка 9	13.3	10.6	79.1	94.9 (100)	100	АВВГ-(2×32)
нагрузка 10	25.5	16.5	46.1	55.4 (63)	70	АВВГ-(4×16)

Результаты выбора марки кабелей новых асинхронных двигателей, выполненного по формулам (1.1) – (1.3), приведены в таблице 1.2. В колонке «ток расцепителя» указаны предельно допустимые и выбранные из каталога токи расцепителя (в скобках). При определении допустимого тока и выборе марок оборудования использовалась справочная литература [1, 4].

Таблица 1.3 Выбор марки кабелей для цеха 2

номер нагрузки	Активная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{ном}}$, кВАр	Ток нагрузки I_p , А	Ток расцепителя [4], $I_{y(TP)}$ А	Допустимый ток кабеля [1] $I_{\text{доп}}$, А	Марка кабеля [4]
двигатель 1	80	70	159	193 (200)	215	АВВГ-(4×95)
двигатель 2	80	60	152	182.0 (200)	215	АВВГ-(4×95)

Выключатели серии ВА предназначены для отключений при коротких замыканиях и перегрузках в электрических сетях, отключений при недопустимых снижениях напряжения, а также для нечастых оперативных включений и отключений электрических цепей. Выключатели серии ВА-51 и ВА-52 имеют тепловой и электромагнитный расцепители. Выключатели ВА-53, ВА-55 и ВА-75 имеют полупроводниковый максимальный расцепитель с регулированием ступеней.

Однофазные электроприемники считается равномерно распределенными по фазам, если неравномерность нагрузки по фазам - разность номинальных мощностей наиболее и наименее загруженных фаз - не превышает 15% суммарной номинальной мощности трехфазных и однофазных электроприемников рассматриваемого узла. Условная трехфазная номинальная мощность принимается равной суммарной номинальной мощности всех однофазных электроприемников. Если неравномерность нагрузки больше 15%, то расчетная нагрузка определяется по наиболее загруженной фазе [2].

В рассматриваемом цехе имеются две однофазных нагрузки (нагрузка 5 и нагрузка 9), включаемых на фазное напряжение сети. Поскольку распределить 2 однофазных нагрузки по трем фазам равномерно не представляется возможным, то примем, что нагрузка 5 включена в фазу А, а нагрузка 9 – в фазу В. Для цеха 2 трехфазная нагрузка 122.8 кВт, однофазная нагрузка 24.9 кВт. Таким образом, однофазная нагрузка составляет 20% от трехфазной нагрузки.

В этом случае нагрузка считается по наиболее загруженной фазе, т.е. по фазе В.

$$P_{оф} = 3P_9; \quad Q_{оф} = 3Q_9.$$

1.2 Групповые электрические нагрузки

Второй уровень составляет группа электроприемников напряжением 380 В [2]. Нахождение расчетной нагрузки необходимо для выбора сечения распределительной магистрали, питающей данную группу приемников, и аппарата присоединения магистрали к секции шин трансформатора.

Приведенное число электроприемников:

$$n_э = \frac{\left(\sum_{\kappa=1}^K n_{\kappa} P_{ном(\kappa)} \right)^2}{\sum_{\kappa=1}^K n_{\kappa} (P_{ном(\kappa)})^2}, \quad (1.4)$$

где $P_{ном(\kappa)}$ – номинальная мощность одного электроприемника κ -го типа, кВт;

n_{κ} – число электроприёмников κ -го типа;

K – число различных типов электроприемников.

Далее определяем средневзвешенное значение коэффициента использования по всему шинопроводу:

$$K_{иа} = \frac{\sum_{\kappa=1}^K K_{иа(\kappa)} P_{ном(\kappa)}}{\sum_{\kappa=1}^K P_{ном(\kappa)}}, \quad (1.5)$$

где $P_{ном(\kappa)}$ – номинальная активная мощность одного электроприемника κ -го типа, кВт;

$K_{иа(\kappa)}$ – коэффициент использования для электроприёмников κ -го типа;

K – число различных типов электроприемников.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Согласно РТМ [3] расчетные мощности для системы второго уровня определяются по формулам:

$$P_p = K_{pa} \sum_{\kappa=1}^K K_{ua(\kappa)} P_{ном(\kappa)}, \quad (1.6)$$

$$Q_p = K_{pp} \sum_{\kappa=1}^K K_{ua(\kappa)} Q_{ном(\kappa)}, \quad (1.7)$$

где K_{pa} – коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности, приводится в РТМ [3] в зависимости от эффективного числа электроприемников и средневзвешенного коэффициента использования по активной мощности $K_{pa}=f(n_э, K_{иа})$;

K_{pp} – коэффициент расчетной нагрузки по реактивной мощности;

$P_{ном(\kappa)}$ – номинальная активная мощность электроприемника κ -го типа, кВт;

$Q_{ном(\kappa)}$ – номинальная реактивная мощность одного электроприемника κ -го типа, кВАр.

Коэффициент по реактивной мощности рекомендуется оценивать по формуле

$$K_{pp} = 1 + \frac{1}{6\sqrt{n_э}}, \quad (1.8)$$

где $n_э$ – эквивалентное число электроприемников.

Расчетный ток для шинпровода:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{U_{л} \sqrt{3}}, \quad (1.9)$$

где P_p – расчетная активная мощность шинпровода;

Q_p – расчетная реактивная мощность шинпровода;

$U_{л}$ – линейное напряжение сети

Расчет нагрузки для шинпроводов ШРА1 и ШРА2 выполнен в таблице 1.4. Расчет выполнен по формулам (1.4)-(1.9). При определении допустимого тока и выборе марок оборудования использовалась справочная литература [1, 4].

Таблица 1.4 Расчет нагрузки шинпроводов

Показатель	ШРА1	ШРА2
Эквивалентное число электроприемников, $n_э$	2.1	1.75
Коэффициент использования шинпровода $K_{иа}$	0.462	0.506
Коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности K_{pa}	1.98	1.7

Окончание таблицы 1.4

Показатель	ШРА1	ШРА2
Коэффициент расчетной нагрузки по реактивной мощности K_{pp}	1.116	1.126
Расчетная активная мощность, P_p , кВт	250.4	231.3
Расчетная реактивная мощность, Q_p , кВАр	115.5	112.5
Расчетный ток для шинпровода, I_p А	419	391
Ток расцепителя, $I_{y(тр)}$ А	461(500)	430(500)
Допустимый ток кабеля [1] $I_{доп}$, А	550	550
Марка шинпровода [4]	ШРА-550	ШРА-550

Автоматические выключатели являются наиболее совершенными аппаратами защиты, надежными, срабатывающими при перегрузках и коротких замыканиях в линии.

При выборе выключателя необходимо выполнить условие:

– для линии с одним двигателем,

$$I_{н.р} \geq 1,25 \cdot I_{н.д},$$

где $I_{н.р}$ – номинальный ток расцепителя, А;

$I_{н.д}$ – номинальный ток двигателя, А (максимальный ток в линии).

– для линии с группой электродвигателей,

$$I_{н.р} \geq 1,1 \cdot I_m$$

– для линии без электродвигателя:

$$I_{н.р} \geq I_m,$$

где I_m – максимальный расчетный ток в линии.

Примем коэффициент запаса равным 1.1 [5], что учтено в таблице 1.5.

1.3 Электрическая нагрузка цеха

После определения нагрузок по отделениям можно перейти к расчету нагрузок в целом по цеху, то есть необходимо определить электрические нагрузки на сборных шинах напряжением 0,4 кВ цеховых трансформаторных подстанций, а это уже система третьего уровня.

Третий уровень – электроприемники, подключенные к секциям сборных шин напряжением 380 В цеховой трансформаторной подстанции (ТП) [2]. Нахождение данной нагрузки необходимо:

- для выбора числа и мощности цеховых трансформаторов и сечения линий 10 кВ,

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

- питающих цеховые ТП (с учетом потерь мощности в трансформаторах ТП);
- сечения и материала сборных шин 380 В цеховой ТП;
- отключающих аппаратов.

Для нагрузок третьего уровня также вычисляют приведенное число электроприемников:

$$n_э = \frac{\left(\sum_{\kappa=1}^K P_{p(\kappa)} \right)^2}{\sum_{\kappa=1}^K (P_{p(\kappa)})^2}, \quad (1.10)$$

где $P_{p(\kappa)}$ – расчетная мощность электроприемников κ -го присоединения к секции шин, кВт;

K – число различных присоединений к секции шин.

Далее определяем средневзвешенное значение коэффициента использования по всему шинопроводу:

$$K_{иа} = \frac{\sum_{\kappa=1}^K K_{иа(\kappa)} P_{p(\kappa)}}{\sum_{\kappa=1}^K P_{p(\kappa)}}, \quad (1.11)$$

где $P_{p(\kappa)}$ – расчетная активная мощность электроприемников κ -го присоединения к секции шин, кВт;

$K_{иа(\kappa)}$ – коэффициент использования для электроприёмников κ -го типа;

K – число различных типов электроприемников.

Расчетные активная и реактивная мощности определяются по формулам:

$$P_p = K_{pa} \sum_{\kappa=1}^K K_{иа(\kappa)} P_{p(\kappa)}, \quad (1.12)$$

$$Q_p = K_{pp} \sum_{\kappa=1}^K K_{иа(\kappa)} Q_{(\kappa)}, \quad (1.13)$$

где K_{pa} – коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности, зависит от тех же величин, что и на втором уровне, но определяется в РТМ по другой таблице 4.1;

K – количество присоединений к секции шин трансформаторной подстанции;

$P_{p(\kappa)}$ – расчетная активная мощность электроприемников κ -го присоединения к секции шин, кВт;

$Q_{ном(\kappa)}$ – расчетная активная мощность электроприемников κ -го присоединения к секции шин, кВт;

$K_{иа(\kappa)}$ – коэффициент использования для электроприёмников κ -го присоединения к секции шин.

Коэффициенты расчетной нагрузки по активной и реактивной мощности принимаются одинаковыми, так как на третьем уровне графики активной

нагрузки становятся более ровными во времени, чем в узлах системы второго уровня.

Данных для расчета освещения цехов недостаточно, поэтому примем расчетную мощность освещения $P_p = 10$ кВт и $Q_p = 5$ кВАр, что характерно для цехов небольшой площади. Также примем коэффициент использования для освещения равным $K_{на} = 1$.

Расчет нагрузки трансформаторов до реконструкции системы электроснабжения цехов можно провести в упрощенном виде, поскольку освещение является очень малой нагрузкой по сравнению с силовой нагрузкой шинопровода.

Таким образом, расчетная активная мощность трансформатора цеха 1 равна сумме расчетной мощности шинопровода и принятой активной мощности освещения $P_{p(тр)} = 250.4 + 10 = 260.4$ кВт. Аналогично для реактивной мощности $Q_{p(тр)} = 115.5 + 5 = 120.5$ кВт. Полная расчетная мощность нагрузки на шинах 0.4 кВ составляет

$$S_{p1} = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = 275.8 \text{ кВА.}$$

Согласно заданию на выпускную квалификационную работу всю нагрузку цеха 1 считают нагрузкой 3-ей категории. Следовательно, в цехе предусмотрена однотрансформаторная подстанция. Номинальная полная мощность трансформатора должна быть больше расчетной. Таким образом, принимаем трансформатор ТМ-400/10.

Расчетная активная мощность трансформатора цеха 2 равна сумме расчетной мощности шинопровода и принятой активной мощности освещения $P_{p(тр)} = 231 + 10 = 241$ кВт. Аналогично для реактивной мощности $Q_{p(тр)} = 112.5 + 5 = 117.5$ кВт. Полная расчетная мощность нагрузки на шинах 0.4 кВ составляет

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = 257.5 \text{ кВА.}$$

Согласно заданию на выпускную квалификационную работу всю нагрузку цеха 2 считают нагрузкой 3-ей категории. Следовательно, в цехе предусмотрена однотрансформаторная подстанция. Номинальная полная мощность трансформатора должна быть больше расчетной. Таким образом, принимаем трансформатор ТМ-400/10.

Параметры трансформатора ТМ-400/10:

- потери в режиме холостого хода $\Delta P_{xx} = 810$, Вт;
- потери в режиме короткого замыкания $\Delta P_{кз} = 5500$, Вт;
- ток холостого хода $I_{xx} = 1,1$ %;
- напряжение короткого замыкания $U_{кз} = 4,5$ %.

В данном случае можно принять для защиты системы электроснабжения цеха аппараты с теми же характеристиками, что и для защиты шинопровода, поскольку осветительная нагрузка мала. Также можно не увеличивать и допустимый ток для секции шин. Однако учитывая возможность дальнейшего развития системы примем ток расцепителя 550 А, а допустимый ток секции шин – 600 А.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Расчет нагрузки трансформатора после реконструкции проведен в таблице 1.5. При расчете учтено, что нагрузка цеха состоит из нагрузки, присоединенной к шинопроводу ШРА-500, нагрузки двигателя и освещения. Расчет выполнен по формулам (1.10)-(1.13).

Таблица 1.5 Расчет нагрузки трансформатора после реконструкции

Шинопровод	Цех 1	Цех 2
Эквивалентное число электроприемников, $n_э$	1	1
Коэффициент использования шинопровода $K_{иа}$	0.487	0.645
Коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности $K_{ра}$	1.65	1.25
Расчетная активная мощность, P_p , кВт	283	299
Расчетная реактивная мощность, Q_p , кВАр	158	171
Расчетный ток для шинопровода, I_p А	493	523
Ток расцепителя [4], $I_{y(TP)}$ А	591(700)	628(700)
Допустимый ток секции шин [1] $I_{доп}$, А	800	800
Расчетная полная мощность нагрузки S_p , кВА	325.3	344
Марка трансформатора [4]	ТМ-400/10	ТМ-400/10

1.4 Выбор кабельных линий 10 кВ

Сечение кабелей напряжением 10 кВ определяется по экономической плотности тока и проверяется по допустимому току кабеля в нормальном режиме работы с учетом условий его прокладки, по току перегрузки, потери напряжения в послеаварийном режиме и термической стойкости к токам короткого замыкания [5]. Поскольку расчетная полная мощность нагрузки для цехов 1 и 2 приблизительно одинакова, то расчеты будем проводить для большей мощности нагрузки, т.е. для цеха 1.

Расчетный ток в кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_{p.к} = \frac{S_{p.к}}{\sqrt{3}U_n} = 20 \text{ А},$$

где $S_{p.к} = 311$ кВА – мощность, передаваемая по кабельной линии;

$U_n = 10$ кВ – линейное напряжение сети.

Сечение кабельной линии определяем по экономической плотности тока

$$F_э = \frac{I_{p.к}}{j_э} = 16 \text{ мм}^2,$$

где $j_э = 1.2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ – экономическая плотность тока, [6].

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

Принимаем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ минимального сечения 25 мм². По известному сечению выбираем кабель с длительно допустимым током $I_{\text{доп}} = 140 \text{ А}$ [6]. Допустимый ток кабеля пересчитываем с учетом условий прокладки

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} K_t K_{\text{п}} = 122 \text{ А},$$

где $K_{\text{п}}=0.87$ – поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей [6];

$K_t=1.02$ – поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель, [6].

Для кабеля, проложенного от главной понизительной подстанции до трансформаторной подстанции цеха, с учетом поправочных коэффициентов допустимый ток составляет 122 А [6], что намного больше тока кабеля 18 А. Следовательно, условие по длительно допустимому току для выбранного кабеля выполняется.

Кроме указанного условия выбранный кабель необходимо проверить на термическую стойкость. Для этого необходим расчет токов короткого замыкания. При этом достаточно рассмотреть ток трехфазного короткого замыкания в характерных точках системы электроснабжения предприятия [7].

Для нормального функционирования релейной защиты на предприятии, время срабатывания ступеней релейной защиты должно различаться. Рекомендуемая в литературе [8] карта селективности релейной защиты показана на рисунке 1.1.

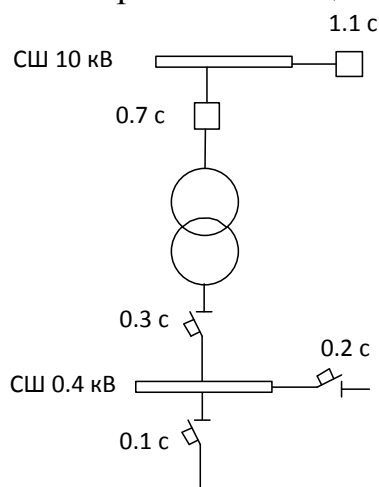


Рисунок 1.1 – Карта селективности

Расчет токов короткого замыкания выполнен в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7]. Схема для расчетов токов короткого замыкания представлена на рисунке 1.2. Каждый из элементов системы электроснабжения представлен на схеме замещения сопротивлением. Для сети 10 кВ при расчете токов короткого замыкания допустимо считать только индуктивные сопротивления элементов. Для проверки кабельной линии на термическую стойкость необходимо знание тока короткого замыкания в начале линии, поэтому на схеме замещения достаточно представить только сопротивление сети и трансформатора. Все сопротивления приведем к ступени напряжения $E_c=10 \text{ кВ}$.

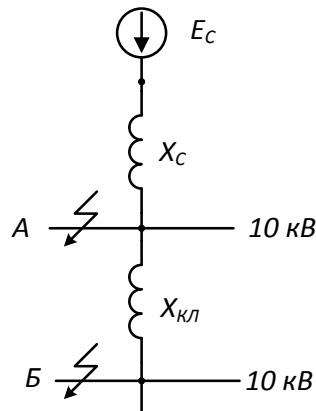


Рисунок 1.2 – Схема замещения

Сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = 1 \text{ Ом}$$

где $E_c = 10 \text{ кВ}$ – линейное напряжение сети;

$S_k = 100 \text{ МВА}$ – мощность короткого замыкания на шинах 10 кВ главной понижающей подстанции, данная в задании на выпускную квалификационную работу.

Тогда ток короткого замыкания в начале линии составляет

$$I_{кз} = \frac{E_c}{\sqrt{3}x_c} = 5.7 \text{ кА}$$

Тепловой импульс тока короткого замыкания определяется по формуле:

$$B_k = I_{кз}^2 (t_{пз} + t_{ов} + T_a) = 28.3 \text{ кА}^2 \text{ с},$$

где $t_{пз} = 0.7 \text{ с}$ – время действия максимальной токовой защиты линии (см. рис. 1.1);

$t_{ов} = 0.06 \text{ с}$ – полное время отключение выключателя [7];

$T_a = 0.12 \text{ с}$ – время протекания апериодической составляющей тока короткого замыкания [7];

$I_{кз} = 5.7 \text{ кА}$ – ток короткого замыкания.

Термически стойкое сечение определим по выражению

$$F_{т.с.} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = 59 \text{ мм}^2,$$

где C – коэффициент, зависящий от вида металла жил кабеля, $C = 90 \text{ А} \cdot \text{с}^{0.5} / \text{мм}^2$ [6] (для алюминиевых жил);

$B_k = 28.3 \text{ кА} \cdot \text{с}^2$ – тепловой импульс тока короткого замыкания.

Для выбранного кабеля должно выполняться условие

$$F > F_{т.с.}$$

Поскольку это условие не выполняется, то сечение кабеля необходимо увеличить до 70 мм^2 . Следует отметить, что основным критерием при выборе сечения кабельной линии являлась именно термическая стойкость.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Погонные параметры для выбранного кабеля [4]: активное сопротивление $r_0=0.268$ Ом/км, реактивное сопротивление $x_0=0.187$ Ом/км.

Выводы по разделу один:

В разделе 1 методом упорядоченных диаграмм выполнен расчет электрических нагрузок до и после реконструкции системы электроснабжения цехов. По результатам расчета нагрузок до реконструкции выбрано оборудование системы электроснабжения цеха (см. плакаты 1). По результатам расчетов нагрузки после коммутации сделан вывод, что имеющееся оборудование трансформаторных подстанций позволяет подключить вводимые в эксплуатацию электродвигатели к этим трансформаторным подстанциям без замены оборудования. Поскольку сечение кабелей было выбрано по термической стойкости и с большим запасом по длительно допустимому току, то в замене кабельной линии тоже нет необходимости.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

2 ВЫБОР ВАРИАНТА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Согласно заданию на выпускную квалификационную работу вновь вводимое оборудование относится ко 2-ой категории по надежности электроснабжения. Надежность электроснабжения определяется числом независимых источников питания и схемой электроснабжения потребителей, поэтому обеспечение надежности электроснабжения связано с дополнительными экономическими затратами.

Согласно ПУЭ [1] электроприемники 1-й категории обязательно, а 2-й категории предпочтительно должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервируемых источников питания, а для сокращения перерывов их электроснабжения используются быстродействующие устройства релейной защиты и автоматики (АПВ и АВР). Для 3-й категории резервирование электропитания не рекомендуется.

2.1 Вариант с двухтрансформаторными подстанциями

Обычно резервирования на промышленном предприятии осуществляется дублированием основного оборудования: кабелей и трансформаторов. Однолинейная схема электроснабжения в этом случае показана на рисунке 2.1.

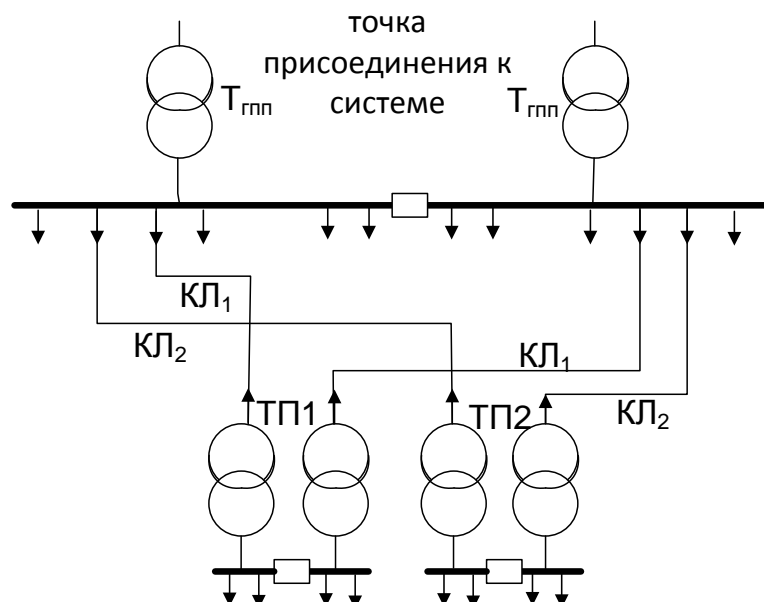


Рисунок 2.1 – Схема варианта 1 для резервирования

Схема на рисунке 2.1 безусловно обеспечит требуемый уровень надежности. Однако, осуществление этого варианта требует полной перестройки системы электроснабжения 10 кВ: замены 2-х однитрансформаторных подстанций на 2-е двухтрансформаторные, прокладку 2-х дополнительных кабельных линий от главной понизительной подстанции до цеховых трансформаторных подстанций. Также потребуются замена всего коммутационного оборудования. Такая серьезная перестройка системы электроснабжения оправдана только при полной замене электрооборудования цехов.

2.2 Вариант с кабельной перемычкой 0.4 кВ

В литературе [8] для цехов, в которых преимущественно расположена нагрузка 3-ей категории, рекомендуется осуществлять резервирование по стороне 0.4 кВ

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

от одного из соседних цехов. Однолинейная схема электроснабжения в этом случае показана на рисунке 2.2.

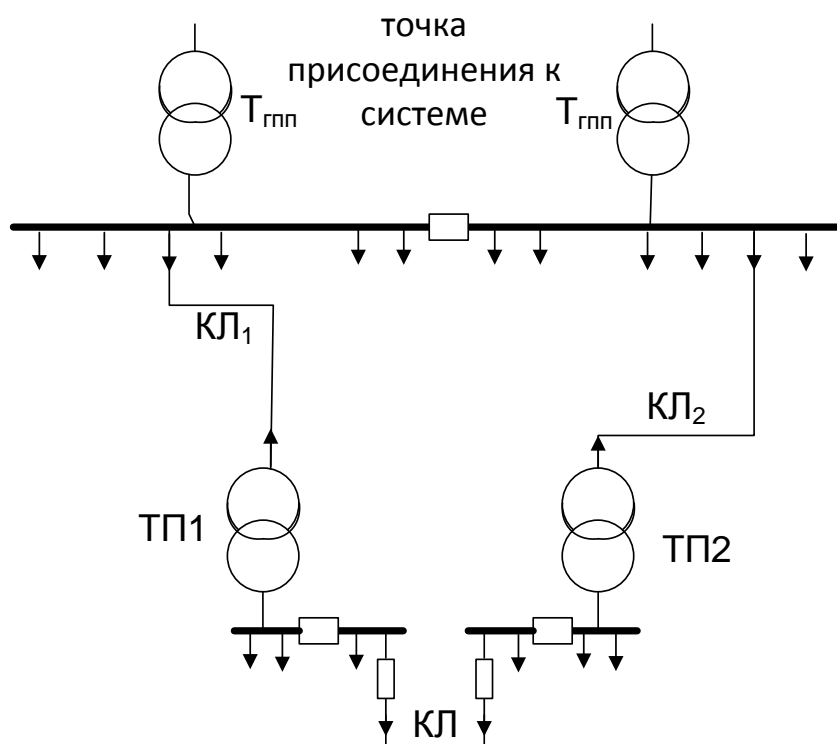


Рисунок 2.2 – Схема варианта 2 для резервирования

В схеме на рисунке 2.2 для организации резервирования требуется только устройство дополнительных секций шин для подсоединения новой нагрузки и прокладка кабельной линии 0.4 кВ между цехами. Согласно заданию на выпускную квалификационную работу цеха расположены недалеко друг от друга. Следовательно, такой вариант резервирования может рассматриваться.

Чтобы окончательно сделать вывод о возможности применения этого варианта, нужно выполнить расчет загрузки трансформаторов в послеаварийном режиме и проверить падение напряжения в кабельной перемычке.

Расчет нагрузки трансформатора 1 при резервировании двигателя цеха 2 и нагрузки трансформатора 2 при резервировании двигателя цеха 1 проведен в таблице 2.1 по формулам (1.10)-(1.13). Необходимые справочные данные получены из [1, 4].

Таблица 2.1 Расчет нагрузки трансформаторов в послеаварийном режиме

Показатель	Трансформатор 1 питает двигатель 2	Трансформатор 2 питает двигатель 1
Эквивалентное число электроприемников, n_3	1	1
Коэффициент использования шинпровода $K_{иа}$	0.594	0.625
Коэффициент расчетной нагрузки по активной мощности $K_{ра}$	1.33	1.3

Окончание таблицы 2.1

Показатель	Трансформатор 1 питает двигатель 2	Трансформатор 2 питает двигатель 1
Расчетная активная мощность, P_p , кВт	370	370
Расчетная реактивная мощность, Q_p , кВАр	224	228
Расчетный ток для шинпровода, I_p А	658	660
Ток расцепителя [4], $I_{y(TP)}$ А	730(750)	735(750)
Допустимый ток секции шин [4] $I_{доп}$, А	800	800
Расчетная полная мощность нагрузки S_p , кВА	433	434
Марка трансформатора [4]	ТМЗ-400/10	ТМЗ-400/10
Коэффициент загрузки	1.09	1.09

Из результатов, полученных в таблице 2.1 можно сделать вывод, что трансформаторы, установленные в ТП цехов могут нормально функционировать в послеаварийном режиме, поскольку их коэффициент загрузки в послеаварийном режиме не превышает нормативное значение 1.4.

Выбор сечения перемычки 0.4 кВ осуществляется аналогично выбору кабельных линий 10 кВ. Расчетный ток в кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_{p.к.} = \frac{S_{p.к.}}{\sqrt{3}U_n} = 153 \text{ А},$$

где $S_{p.к.} = 106$ кВА – мощность, передаваемая по кабельной линии (мощность наиболее мощного из устанавливаемых двигателей $P_p = 80$ кВт $Q_p = 70$ кВАр);

$U_n = 0.4$ кВ - линейное напряжение сети.

Сечение кабельной линии определяем по экономической плотности тока

$$F_s = \frac{I_{p.к.}}{j_s} = 127 \text{ мм}^2,$$

где $j_s = 1.2 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ – экономическая плотность тока, [6].

Принимаем кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 0.4 кВ минимального сечения 120 мм². По известному сечению выбираем кабель с длительно допустимым током $I_{доп} = 385$ А [4]. Допустимый ток кабеля пересчитываем с учетом условий прокладки

$$I'_{доп} = I_{доп} K_t K_{п} = 335 \text{ А},$$

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

где $K_n=0.87$ – поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей [6];

$K_t=1.02$ – поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель, [6].

Для кабеля, проложенного от главной понизительной подстанции до трансформаторной подстанции цеха, с учетом поправочных коэффициентов допустимый ток составляет 335 А [4], что намного больше тока кабеля 153 А. Следовательно, условие по длительно допустимому току для выбранного кабеля выполняется.

Далее необходимо проверить кабель на термическую прочность. Схема замещения для расчета тока короткого замыкания на шинах 0.4 кВ показана на рисунке 2.3. Согласно требованиям в схеме учтены не только реактивные, но и активные сопротивления. Все сопротивления пересчитаны на напряжение 10 кВ.

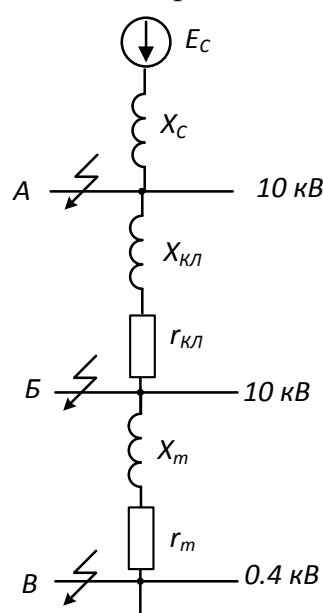


Рисунок 2.3 – Схема замещения

Сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = 1 \text{ Ом}$$

где $E_c=10$ кВ – линейное напряжение сети;

$S_k=100$ МВА – мощность короткого замыкания на шинах 10 кВ главной понизительной подстанции.

Сопротивление кабельной линии вычисляется по формуле

$$x_{кз} = x_0 L = 0.056 \text{ Ом и } r_{кз} = r_0 L = 0.086 \text{ Ом,}$$

где $r_0=0.268$ Ом/км погонное активное сопротивление кабеля;

$x_0=0.187$ Ом/км погонное реактивное сопротивление кабеля;

$L=300$ м длина кабеля 10 кВ от ГПП до цеховой ТП.

Сопротивления трансформатора рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{u_{кн} U_H^2}{S_H} = 11.3 \text{ Ом и } r_m = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = 0.5 \text{ Ом,}$$

где $U_H=10$ кВ – номинальное напряжение трансформатора;
 $u_k=4.5\%$ - напряжение короткого замыкания;
 $S_H=400$ кВА – номинальная мощность трансформатора.
Ток короткого замыкания на шинах 0.4 кВ составляет

$$I_{K3} = \frac{E_c K_m}{\sqrt{(r_{кл} + r_m)^2 + (x_c + x_{кл} + x_m)^2}} = 11.2 \text{ кА}$$

где $E_c=5.8$ кВ – фазное напряжение сети;
 $x_c=1$ Ом – сопротивление сети;
 $r_T=0.5$ Ом- активное сопротивление трансформатора;
 $x_T=11.3$ Ом- реактивное сопротивление трансформатора;
 $r_{кл}=0.086$ Ом - активное сопротивление кабельной линии;
 $x_T=0.056$ Ом - реактивное сопротивление кабельной линии;
 $K_T=25$ - коэффициент трансформации.

Теперь выполним проверку выбранных кабелей по термической стойкости к токам короткого замыкания. Тепловой импульс тока короткого замыкания определяется по формуле:

$$B_k = I_{K3}^2 (t_{pз} + t_{ов} + T_a) = 46.4 \text{ кА}^2 \text{ с},$$

где $t_{p.з.}=0.2$ с – время действия максимальной токовой защиты линии (см. рис. 1.1);
 $t_{о.в.}=0.06$ с – полное время отключение выключателя;
 $T_a=0.12$ с – время протекания аperiodической составляющей тока КЗ;
 $I_{K3}=11.2$ кА – ток короткого замыкания.

Термически стойкое сечение определим по выражению

$$F_{т.с.} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = 75 \text{ мм}^2,$$

где C – коэффициент, зависящий от вида металла жил кабеля, $C=90 \text{ А} \cdot \text{с}^{0.5} / \text{мм}^2$ [6] (для алюминиевых жил);

$B_k=46.4 \text{ кА} \cdot \text{с}^2$ – тепловой импульс тока короткого замыкания.

Выбранное сечение кабеля можно уменьшить до 95 мм^2 , поскольку кабельная вставка будет использоваться преимущественно в послеаварийном режиме.

Для выбранного кабеля 95 мм^2 выполняется условие $F > F_{т.с.}$. Таким образом, Погонные параметры для выбранного кабеля [4]: активное сопротивление $r_0=0.193$ Ом/км, реактивное сопротивление $x_0=0.111$ Ом/км.

2.3 Вариант с дизель-генераторами

Если организация дополнительного источника энергии от электрической сети невозможно (или сложно), то в литературе рекомендуется устанавливать дополнительные резервные источники генерации в цехах. В диапазоне мощностей, рассматриваемом в данной выпускной квалификационной работе, это переносные дизель-электростанции. Однолинейная схема электроснабжения в данном случае показана на рисунке 2.4.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

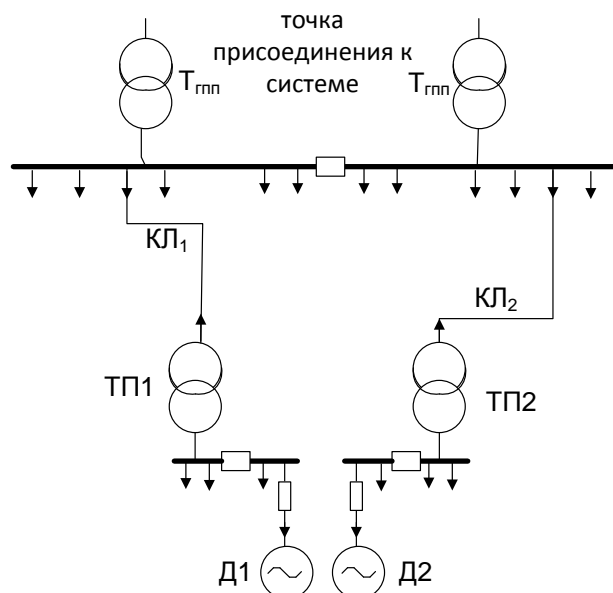


Рисунок 2.4 – Схема варианта 3 для резервирования

В схеме на рисунке 2.4 также используется много оборудования для организации резервирования: два дизель-генератора с источниками бесперебойного питания и два секции шин для присоединения нового оборудования цеха. Источники бесперебойного питания должны обеспечить работу двигателей на время пуска дизель-генераторов. Номинальная мощность дизель-генераторов и источников бесперебойного питания должна превышать мощность двигателей на 20%, т.е. быть выше 135 кВА. Время работы устройств бесперебойного питания должна быть более 30 секунд с выдаваемой мощностью 135 кВА.

Конечно, для выбора наиболее оптимального варианта требуется проводить их технико-экономическое сравнение. Однако, даже простое сравнение вариантов 1, 2 и 3 показывает, что вариант 1 в данной ситуации существенно проигрывает по капитальным затратам.

Однако варианты 2 и 3 имеют и существенные недостатки. В варианте 2 длина линии 0.4 кВ в послеаварийном режиме достаточно велика, что может привести к недопустимым потерям напряжения при пуске двигателя. Также требуется рассчитать перегрузочную способность трансформатора в послеаварийном режиме.

В варианте 3 также могут возникнуть проблемы с пуском двигателя. При малой мощности генератора двигатель может не запуститься, а при большой мощности генератора данный вариант будет экономически не выгодным.

Вывод к разделу 2:

Для дальнейшего рассмотрения оставим варианты с кабельной перемычкой и дизель-генераторами. Выбор варианта реконструкции системы электроснабжения включает в себя и выбор способа пуска вновь вводимых двигателей.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

3 ВЫБОР СПОСОБА ПУСКА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время существуют многочисленные способы пуска асинхронного двигателя: прямой пуск без применения каких либо дополнительных устройств, плавный пуск с применением пусковых резисторов, плавный тиристорный пуск, пуск при помощи преобразователя частоты. Оценим возможность применения каждого из них в рассматриваемой ситуации.

3.1 Прямой пуск двигателя

Прямой пуск не требует каких либо затрат на оборудование. Однако при прямом пуске пусковой ток возрастает в пять раз. Это приводит к значительным, а в некоторых случаях недопустимым провалам напряжения [8]. Оценим падение напряжений в наиболее сложной ситуации – пуске двигателя соседнего цеха в послеаварийном режиме.

Сначала рассчитаем электрическую нагрузку. При пуске двигателя он потребляет из сети реактивную мощность, которая в пять раз превышает его полную номинальную мощность

$$Q_{\text{пуск}} = 5\sqrt{P_n^2 + Q_n^2} = 530 \text{ кВАр},$$

где $Q_n = 70$ кВАр – номинальная реактивная мощность двигателя;

$P_n = 80$ кВт – номинальная активная мощность двигателя.

Остальная нагрузка другого цеха согласно расчетам п.1 составляет $P_{н1} = 250$ кВт и $Q_{н1} = 115$ кВАр. Таким образом, расчетная нагрузка на кабельной вставке $Q_{\text{каб}} = 530$ кВАр. Расчетная нагрузка на трансформаторе и кабеле до ГПП составляет $Q_{\text{тр}} = 645$ кВАр и $P_{\text{тр}} = 250$ кВт.

Сопротивление кабельной линии 10 кВ длиной $L = 300$ м [4] ($r_0 = 0.268$ Ом/км, $x_0 = 0.187$ Ом/км) активное

$$r_{\text{кл}} = r_0 L = 0.086 \text{ Ом},$$

реактивное

$$x_{\text{кл}} = x_0 L = 0.056 \text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора ТП [4] ($S_n = 400$ кВА, $P_{\text{кз}} = 5.5$ кВт, $u_k = 0.045$) активное

$$r_{m2} = \frac{P_{\text{кз}} U_n^2}{S_n^2} = 0.5 \text{ Ом},$$

реактивное

$$z_{m1} = \frac{u_k U_n^2}{S_n} = 11.3 \text{ Ом}.$$

Сопротивление кабельной вставки длиной $L = 100$ м [4] ($r_0 = 0.193$ Ом/км, $x_0 = 0.111$ Ом/км) при пересчете на напряжение 10 кВ ($K_T = 25$) активное

$$r_{\text{кл1}} = r_0 L = 0.019 \text{ Ом},$$

реактивное

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

$$x_{кл} = r_0 L = 0.011 \text{ Ом.}$$

Падение напряжения на участке, состоящем из кабельной вставки

$$\Delta U = \frac{P_p r + Q_p x}{U_H^2} 100\% = 8.6\% ,$$

где $r=0.019$ Ом – активное сопротивление участка;
 $x=0.011$ Ом – реактивное сопротивление участка;
 $U_H=0.4$ кВ – номинальное напряжение сети;
 $P_p = 0$ кВт – передаваемая активная мощность;
 $Q_p = 530$ кВАр - передаваемая реактивная мощность.

Падение напряжения на участке, состоящем из трансформатора и кабельной линии

$$\Delta U = \frac{P_p r + Q_p x}{U_H^2} 100\% = 3.3\% ,$$

где $r=0.6$ Ом – активное сопротивление участка;
 $x=11.9$ Ом – реактивное сопротивление участка;
 $U_H=10$ кВ – номинальное напряжение сети;
 $P_p = 250$ кВт – передаваемая активная мощность;
 $Q_p = 645$ кВАр – передаваемая реактивная мощность.

Общее падение напряжение составит 11.9%, что больше предельно допустимого падения напряжения в 10% при пусковых режимах.

При продолжительном прямом пуске с большими пусковыми токами тепловая уставка релейной защиты может рассматривать пуск двигателя как недопустимый режим [8]. В этом случае релейная защита просто не даст запустить двигатель. Такая ситуация показана на рисунке 3.1.

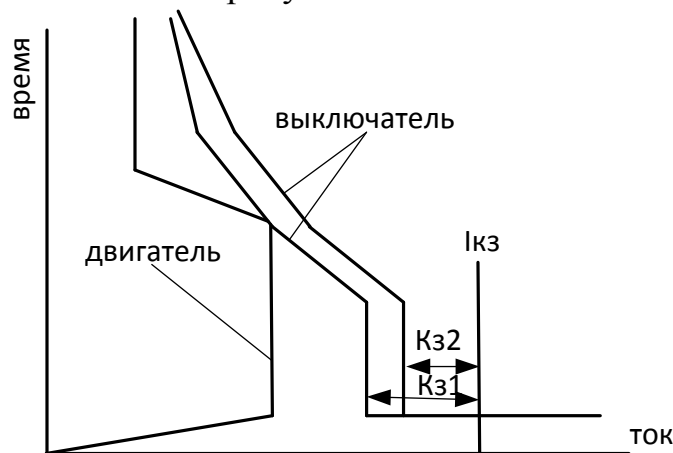


Рисунок 3.1 Время-токовые характеристики

Регулирование времени срабатывания тепловой уставки часто невозможно на современном серийном оборудовании. Поэтому приходится увеличивать ток уставки, и следовательно уменьшать коэффициент чувствительности релейной защиты.

Отмеченные недостатки позволяют при дальнейших расчетах не рассматривать прямой пуск двигателя как технически целесообразный вариант.

3.2 Плавный пуск двигателя

Плавный пуск двигателя может выполняться ступенчато при помощи пусковых резисторов. Сначала в цепи статора включаются все резисторы и напряжение, на которое осуществляется пуск двигателя, минимально. Начальный ток больше номинального, но значительно меньше пускового тока при прямом пуске. Когда ток снижается до номинального значения, один из резисторов выводится из работы и напряжение на двигателе и его пусковой ток повышаются. Такой процесс происходит несколько раз, пока все резисторы не будут выведены из работы и не будет достигнуто номинальное напряжение двигателя.

Плавный резисторный пуск обладает определенными преимуществами. Разделяя процесс пуска двигателя на несколько переходных процессов можно уменьшить токи при пуске двигателя и, следовательно, уменьшить и падение напряжения в сети при пуске двигателя. Также плавный пуск позволяет избежать проблемы с настройкой тепловой уставки релейной защиты двигателя.

Резисторный пуск широко использовался в системах электроснабжения. Однако в современных условиях появились устройства тиристорного пуска двигателей. Идея тиристорного пуска примерно та же – разделить переходный процесс при пуске двигателя на несколько переходных процессов. Однако переход от одного переходного процесса к другому здесь осуществляется путем изменения угла управления тиристором.

Принцип действия тиристорного контактора [9] показан на рисунке 3.2. Изменяя угол включения тириستоров мы подключаем электродвигатель на все большее и большее напряжение, пока не будет достигнуто напряжение сети. Изменяя настройки контактора можно регулировать продолжительность пуска, а следовательно максимальное значение пускового тока. Это позволяет избежать отмеченных выше проблем с качеством электроэнергии и построением релейной защиты [7].



Рисунок 3.2 – Тиристорный пуск двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.3 Регулирование и пуск двигателя преобразователем частоты

Наиболее современные устройства для управления режимом работы двигателя – это преобразователи частоты со звеном постоянного напряжения. Регулирование частоты и напряжения двигателя осуществляется при помощи инвертора, выполненного на элементах с полной управляемостью. Регулирование при установившихся и переходных режимах осуществляется таким образом, чтобы обеспечить оптимальный режим работы нагрузки. При этом достигается существенная экономия энергии, особенно для резкопеременной нагрузки [11].

Плавный пуск электродвигателя - это дополнительная функция, которую выполняет преобразователь частоты. Плавность пуска может быть обеспечена с необходимой точностью. Таким образом, также как и при тиристорном пуске нет дополнительных провалов напряжения при пуске и проблем с релейной защитой.

Конденсатор в звене постоянного напряжения является накопителем энергии и служит своеобразным барьером между процессами в нагрузка и процессами в сети. Например, асинхронный двигатель является источником реактивной мощности, но благодаря барьеру эта реактивная мощность не сказывается на процессах в электрической сети.

Первичное звено преобразователя частоты может быть выполнено [10] на элементах с полной управляемостью (транзисторы), элементах с частичной управляемостью (тиристоры) или неуправляемых элементах (диоды).

Наиболее совершенным является первый вариант, но он экономически оправдан только при возможности рекуперации энергии в сеть. Данных об этом в задании на выпускную квалификационную работу нет. Поэтому считаем, что рекуперация энергии невозможна и отвергаем преобразователи частоты с транзисторным исполнением первичного звена.

Первичное звено, выполненное на тиристорах, позволяет регулировать величину напряжения в звене постоянного тока. Данная функция бесполезна для работы двигателя, т.к. его режим работы проще всего регулировать при помощи инвертора. Эта функция крайне вредна для остальных потребителей, подключенных к той же секции шин, поскольку обеспечивает большую реактивную мощность в точке присоединения к сети. Поэтому такие типы преобразователей мы также не принимаем.

В результате выбран преобразователь частоты с диодным выпрямителем [10] (рисунок 3.3). Этот тип преобразователей наиболее дешевый и в случае асинхронного двигателя обеспечивает дополнительный бонус – существенное улучшение коэффициента мощности в точке присоединения к сети.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

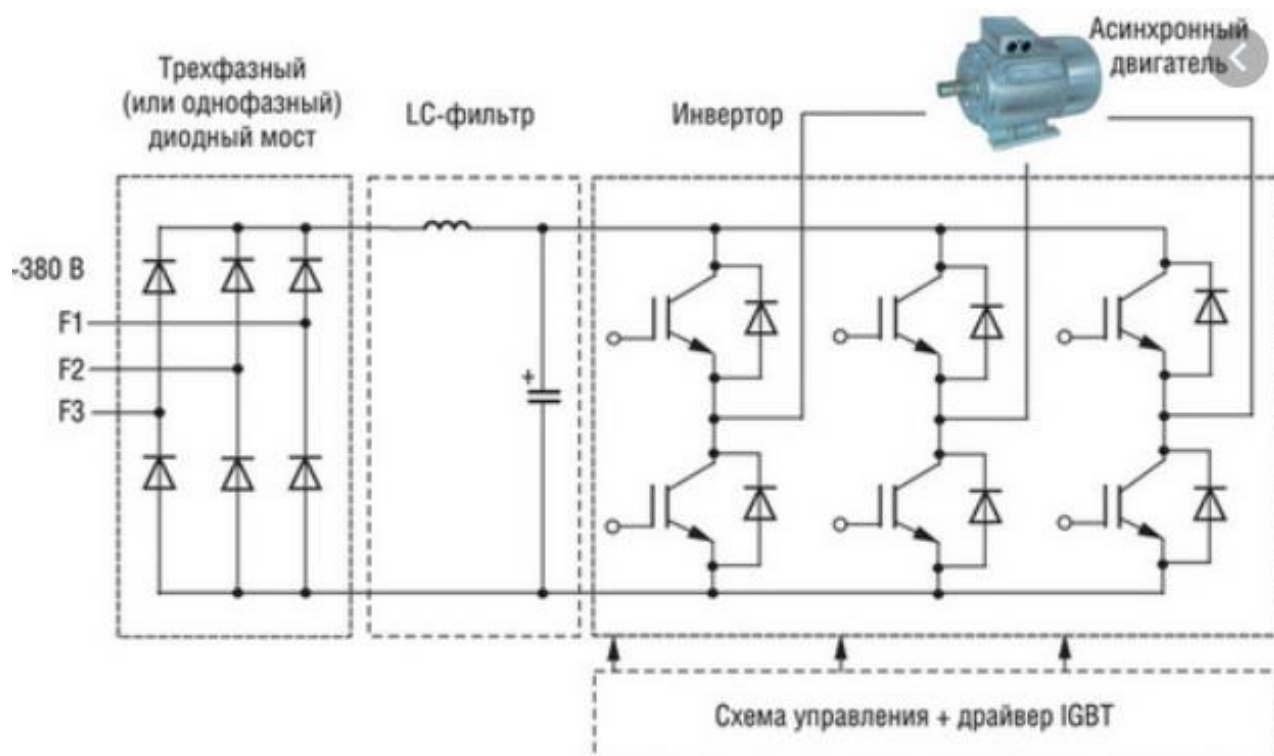


Рисунок 3.3 – Преобразователь частоты

По заданию коэффициент мощности двигателей

Вывод к разделу 3:

Рассмотрены преимущества и недостатки нескольких вариантов пуска и регулирования двигателей. Для дальнейшего применения выбраны варианты тиристорного пуска двигателей и пуска при помощи преобразователя частоты с диодным звеном в качестве выпрямителя. Регулирование работы двигателя при помощи преобразователя частоты также может оказаться полезной функцией. Для принятия окончательного решения требуется технико-экономическое сравнение вариантов.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ

Лист

29

4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ

4.1 Сравнимые варианты

Расчеты, проведенные в разделах 2 и 3, позволяют сделать вывод, что варианты резервирования можно сравнивать отдельно от вариантов выбора способа пуска двигателя, поскольку эти варианты не имеют общих показателей.

Для сравнения вариантов выбраны вариант с кабельной вставкой и вариант с дизель-генераторами. Коммутационная аппаратура в обоих вариантах одинакова, поэтому ее можно при сравнении не учитывать. Остальное оборудование (кабели, дизель генераторы, источники бесперебойного питания) функционирует только в послеаварийном режиме. Следовательно, потери электроэнергии в обоих вариантах можно не учитывать. Таким образом, при выборе оптимального решения нужно только сравнить стоимость оборудования. В варианте 1 это кабельная линия длиной 100 м и сечением 150 мм² и прокладку этого кабеля. Во втором варианте это два дизель-генератора мощностью 120 кВт, и два источника бесперебойного питания, обеспечивающего мощность 120 кВт на время пуска двигателя (30 секунд).

Для сравнения вариантов пуска двигателя и управление режимом его работы нужно сравнивать стоимость оборудования (тиристорный контактор и преобразователь частоты), а также стоимость сэкономленной электроэнергии. При выборе тиристорного контактора для плавного пуска двигателя сэкономить электроэнергию не удастся, поскольку устройство используется только для пуска двигателя. При выборе преобразователя частоты экономия достигается как за счет более эффективного потребления энергии двигателем, так и за счет уменьшения потерь активной мощности в трансформаторе и кабельной линии 10 кВ при уменьшении трафика реактивной мощности.

Данных о технологическом процессе, в котором задействованы двигатели, отсутствуют, поэтому примем среднестатистические данные об использовании преобразователей частоты. В работе [12] отмечено, что экономия электроэнергии составляет 3.2% для спокойной нагрузки. При этом указано, что увеличение КПД двигателя составляет только 1%. Остальная экономия достигается исключительно из-за снижения расходов на передачу реактивной мощности по сетям. Это экономия возникает из-за уменьшения реактивной мощности в точке подключения к сети до реактивной мощности, создаваемой нерегулируемым выпрямителем. Поскольку для подключения двигателей на 0.4 кВ используются безтрансформаторные схемы, то коэффициент мощности в точке подключения снижается до $\cos(\varphi) = 0.15$ [11].

Экономия электроэнергии, потребляемой электроприводом, значительно выше для резкопеременной нагрузки составляет 15% [11].

4.2 Методика сравнения вариантов

При технико-экономическом сравнении будем учитывать стоимость основного оборудования (трансформаторов, кабельных линий и т.д.) и потерь электро-

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

энергии в кабельных линиях. Методика для технико-экономического сравнения изложена в [13].

Потери электрической энергии в кабельных линиях

$$\Delta A = 3nI_{\text{р.л.}}^2 r_0 l \tau, \quad (4.1)$$

где l – длина линии, км;

r_0 – погонное активное сопротивление линии, Ом/км;

n – количество линий;

$\tau = 2800$ ч – время использования максимума потерь (для работы цеха в одну смену).

Потери мощности в трансформаторе равны

$$\Delta A = \Delta P_{\text{xx}} T + K_3^2 \Delta P_{\text{кз}} \tau, \quad (4.2)$$

где ΔP_{xx} – потери в режиме холостого хода, кВт;

$\Delta P_{\text{кз}}$ – потери в режиме короткого замыкания, кВт;

T – продолжительность работы трансформатора, 8760 ч в году;

$\tau = 2800$ ч – время использования максимума потерь (для работы цеха в одну смену).

Стоимость потерь электрической энергии для промышленных предприятий по двухставочному тарифу:

$$C = \delta \left(\frac{\alpha K_M}{\tau} + \beta \right), \quad (4.3)$$

где $\delta = 1.05$ – поправочный коэффициент;

$\alpha = 1214,22 \cdot 12 = 14570,64$ руб/ кВт·год – основная ставка тарифа 2021 г. [14];

$K_M = 1$ – отношение потерь активной мощности предприятия ΔP_3 в момент наибольшей активной нагрузки энергосистемы к максимальным потерям ΔP_3 активной мощности предприятия;

$\beta = 1,4661$ руб/ кВт·ч – стоимость одного кВт·ч электроэнергии 2021 г. [14].

Согласно формуле (4.3) стоимость электроэнергии составляет 6.6 руб за кВт*ч.

Поскольку сравниваемые варианты СЭС характеризуются одинаковыми денежными потокам, то сравнение вариантов проводим на основе минимума годовых приведенных затрат [18]:

$$Z = \sum_i^n E_i k_i + C_3, \quad (4.4)$$

где $E_i = E_n + E_{ai} + E_{oi}$ – общие ежегодные отчисления от капитальных вложений;

k_i – сумма капитальных затрат i -ой группы одинаковых электроприемников;

C_3 – стоимость годовых потерь электроэнергии.

$E_n = 0,12$ – нормативный коэффициент эффективности;

E_{ai} и E_{oi} – отчисления на амортизацию и на обслуживание.

Экономия электроэнергии в сети (трансформатор и кабельная линия) определяется выражением

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

$$\Delta W = \frac{R}{U^2} \tau (P_{конт}^2 + Q_{конт}^2 - P_{прч}^2 - Q_{прч}^2), \quad (4.5)$$

где $R=0.6$ Ом – сопротивление участка сети;

$P_{конт}$ – активная мощность нагрузки при установке контактора;

$Q_{конт}$ – реактивная мощность нагрузки при установке контактора;

$P_{прч}$ – активная мощность нагрузки при установке преобразователя частоты;

$Q_{прч}$ – реактивная мощность нагрузки при установке преобразователя частоты;

$U = 10$ кВ – номинальное линейное напряжение сети;

$\tau = 2800$ ч – время использования максимума потерь (для работы цеха в одну смену).

Экономия электроэнергии в нагрузке за счет оптимизации режима работы двигателя

$$\Delta W = \tau K_{иа} (P_{конт} - P_{прч}), \quad (4.6)$$

где $P_{конт}$ – активная мощность нагрузки при установке контактора;

$P_{прч}$ – активная мощность нагрузки при установке преобразователя частоты;

$K_{иа}$ – коэффициент использования нагрузки;

$\tau = 2800$ ч – время использования максимума потерь (для работы цеха в одну смену).

4.3 Выбор оптимального варианта

Сначала выполним сравнение вариантов резервирования. Сравнение можно выполнить только по капитальным затратам, поскольку оборудование предполагается использовать только в послеаварийном режиме.

Стоимость кабельной линии сечением 95 мм² с 4-я жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена [15]: 1.280 руб/м*100м=12.8 т.р.

Стоимость дизель генераторов FUBAG DSI 137 DAC ES мощностью 100 кВт напряжением 380 В [16]: 1.2 млн. руб. *2=2.4 млн. руб.

Стоимость устройства бесперебойного питания Eaton 9390-100U с трехфазным выходом [17]: 2.3 млн. руб. *2=4.6 млн. руб.

Итого по варианту с кабельной вставкой: 12.8 т.р.

Итого по варианту с дизель генераторами: 7 млн.руб.

Таким образом, очевидное преимущество варианта с кабельной вставкой. При этом вариант с дизель генераторами невыгоден, даже если не ставить требование бесперебойного питания.

Теперь выполним сравнение вариантов управления двигателем и пуска двигателя:

Стоимость тиристорного контактора [18]: $C_{т}=54$ тыс.руб.

Стоимость преобразователя частоты ESQ-A3000-043-110K/132KF для двигателя мощностью 110-132 кВт и напряжением 380 В [19]: $C_{пч}=360$ тыс.руб.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

В данном случае необходимо учитывать также предполагаемый расход электроэнергии. Расчет мощностей нагрузки трансформатора и кабельной линии проведен по методике, изложенной в п.1.3, и представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Расчет экономии энергии в сети.

Показатель	Цех 1 без преобразователя	Цех 1 с преобразователем	Цех 2 без преобразователя	Цех 2 с преобразователем
Эквивалентное число приемников, n_3	1	1	1	1
Коэффициент использования $K_{иа}$	0.487	0.486	0.645	0.625
Коэффициент расчетной нагрузки $K_{ра}$	1.65	1.65	1.25	1.3
Расчетная активная мощность, P_p , кВт	283	273	299	297
Расчетная реактивная мощность, Q_p , кВАр	158	110	171	111

Таким образом, согласно формуле (4.5) и таблице 4.1 (столбцы 2 и 3) годовая экономия энергии в электрической сети цеха 1 составляет $\Delta W_1 = 309$ кВт/ч. Также по формуле (4.5) и таблице 4.1 (столбцы 4 и 5) получаем годовую экономию в сети цеха 2: $\Delta W_2 = 304$ кВт/ч.

Формула (4.6) и данные об экономии электроэнергии, которые обсуждались в конце раздела 4.1, позволяют оценить годовую экономию электроэнергии в электродвигателе цеха 1 $\Delta W_{1д} = 16800$ кВт/ч. Аналогичный результат для цеха 2 - $\Delta W_{2д} = 2240$ кВт/ч.

При цене электроэнергии, определенной по (4.3), стоимость сэкономленной энергии:

- для двигателя цеха 1 $D_1 = (\Delta W_{1д} + \Delta W_1)C = 112.6$ т.р.;

- для двигателя цеха 2 $D_2 = (\Delta W_{2д} + \Delta W_2)C = 16.5$ т.р

Согласно [18] примем нормативный коэффициент эффективности $E=0.12$. Итого по варианту с тиристорным контактором для двигателя цеха 1 приведенные доходы: $-E C_T = -6.5$ т.р.

Итого по варианту с преобразователем частоты для двигателя цеха 1 приведенные доходы: $D_1 - E C_{пр} = 68.8$ т.р.

Итого по варианту с тиристорным контактором для двигателя цеха 2 приведенные расходы: $-E C_T = -6.5$ т.р.

Итого по варианту с преобразователем частоты для двигателя цеха 2 приведенные расходы: $D_2-EC_{пр}=-26.7$ т.р.



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Производитель	ESQ
Мощность (кВт)	110
Мощность подключаемого двигателя (кВт)	110/132
Напряжение (В)	380
Номинальный выходной ток (А)	220/260
Степень защиты (IP)	20
Протокол связи ModBus	есть
Работа с энкодером	да
Тип нагрузки	тяжёлая
Дискретные входы	10
Габариты (ШxВxГ, мм)	370x590x300
Протокол Profibus DP	опционально
Съёмный пульт	есть

Рисунок 4.1 – Преобразователь частоты и его характеристики

Напомним, что установка тиристорного контактора или преобразователя частоты является обязательным техническим требованием. Поэтому для цеха 1 (для резкопеременной нагрузки) выбран вариант с преобразователем частоты. Внешний вид преобразователя и его технические характеристики показаны на рисунке 4.1.

Для спокойной нагрузки выбран тиристорный контактор. Внешний вид контактора и его технические характеристики показаны на рисунке 4.2, а характеристики контактора приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 Характеристики контактора

Характеристика	Значение
Количество фаз	3
Линейное напряжение сети	400 В
Схема подключения нагрузки	«звезда» или «треугольник»
Вспомогательное питание системы управления	198-242 В 50 Гц, 20 ВА
Номинальный ток нагрузки I_n	200 А
Коммутационный элемент	тиристор
Перегрузочная способность	$3I_n$ - 3сек, $2I_n$ - 5сек, $1.5I_n$ - 10сек, $1.25I_n$ - 30сек, $1.1I_n$ - 60сек.
Изоляция	2.5 кВ



Рисунок 4.2 – Тиристорный контактор

Вывод к разделу 4

В результате выбран наиболее экономически целесообразный вариант, показанный на плакате 5. В качестве варианта резервирования принят вариант с кабельной вставкой между цехами. Для резкопеременной нагрузки (двигатель в цехе 1) принято решение об установке преобразователя частоты, а для спокойной нагрузки (двигатель в цехе 2) – тиристорного контактора.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

5 КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для принятого варианта системы электроснабжения основными проблемами с качеством электроэнергии будут проблемы с падением напряжения в сети и проблемы несинусоидальности напряжения, возникшие после установки преобразователя частоты.

5.1 Падение напряжения

Схема для расчета падения напряжения показана на рисунке 5.1.

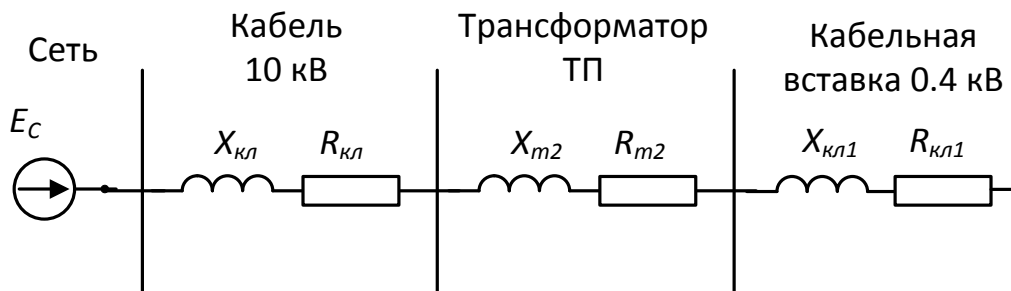


Рисунок 5.1 – Схема замещения для расчета падения напряжения

Сопrotивление кабельной линии 10 кВ длиной $L=300$ м [4] ($r_0=0.268$ Ом/км, $x_0=0.187$ Ом/км) активное

$$r_{кл} = r_0 L = 0.086 \text{ Ом},$$

реактивное

$$x_{кл} = x_0 L = 0.056 \text{ Ом}.$$

Сопrotивление трансформатора ТП [21] ($S_H=400$ кВА, $P_{кз}=5.5$ кВт, $u_k=0.045$) активное

$$r_m = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = 0.5 \text{ Ом},$$

реактивное

$$x_m = \frac{u_k U_H^2}{S_H} = 11.3 \text{ Ом}.$$

Падение напряжения на участке, состоящем из кабельной линии и трансформатора

$$\Delta U = \frac{P_p r + Q_p x}{U_H^2} 100\% = 1.8\% ,$$

где $r=0.6$ Ом – активное сопротивление участка;

$x=11.4$ Ом – реактивное сопротивление участка;

$U_H=10$ кВ – номинальное напряжение сети;

$P_p = 275$ кВт - передаваемая активная мощность;

$Q_p = 146$ кВАр - передаваемая реактивная мощность.

Полученное значение падения напряжения в нормальном режиме удовлетворяет нормативным требованиям [20].

В послеаварийном режиме изменяется падение напряжения на рассмотренном участке и добавляется падение напряжения в кабельной вставке. Мощность, пере-

даваемая по участку (трансформатор и кабельная линия) в послеаварийном режиме составляет $P_p = 371$ кВт и $Q_p = 224$ кВАр. Тогда падение напряжения

$$\Delta U = \frac{P_p r + Q_p x}{U_H^2} 100\% = 2.7\% ,$$

Сопротивление кабельной вставки длиной $L=100$ м [4] ($r_0=0.193$ Ом/км, $x_0=0.111$ Ом/км) активное

$$r_{кл1} = r_0 L = 0.019 \text{ Ом},$$

реактивное

$$x_{кл} = r_0 L = 0.011 \text{ Ом}.$$

Мощность, передаваемая по кабельной вставке $P_p = 90$ кВт и $Q_p = 65$ кВАр. В данном случае учтен наихудший режим, когда по кабельной вставке запитан двигатель с тиристорным контактором. В случае, когда по кабельной вставке запитан двигатель с преобразователем частоты падение напряжения меньше, т.е. преобразователь частоты компенсирует часть реактивной мощности двигателя. Падение напряжения на участке, состоящем из кабельной вставки

$$\Delta U = \frac{P_p r + Q_p x}{U_H^2} 100\% = 1.5\% .$$

Таким образом, общее падение напряжения в послеаварийном режиме составляет 4.2 %, что также находится в допустимых пределах [20].

5.2 Несинусоидальность напряжения

Порядок построения схемы замещения изложен в [2, 6].

Сопротивление одной фазы сети

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k} = 1 \text{ Ом}.$$

где $E_c=10$ кВ – линейное напряжение сети;

$S_k=100$ МВА – мощность короткого замыкания на шинах 10 кВ главной понижающей подстанции.

Сопротивление кабельной линии вычисляется по формуле

$$x_{кл} = x_0 L = 0.056 \text{ Ом} \text{ и } r_{кл} = r_0 L = 0.086 \text{ Ом},$$

где $r_0=0.268$ Ом/км погонное активное сопротивление кабеля;

$x_0=0.187$ Ом/км погонное реактивное сопротивление кабеля;

$L=300$ м длина кабеля 10 кВ от ГПП до цеховой ТП.

Сопротивления трансформатора рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{u_k U_H^2}{S_H} = 11.3 \text{ Ом} \text{ и } r_m = \frac{P_{кз} U_H^2}{S_H^2} = 0.5 \text{ Ом},$$

где $U_H=10$ кВ – номинальное напряжение трансформатора;

$u_k=4.5\%$ - напряжение короткого замыкания;

$S_H=400$ кВА – номинальная мощность трансформатора.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Пересчитывая параметры схемы замещения сети на напряжение 0.4 кВ получаем: $E_c=0.4$ кВ,

$$r_{0.4} = (r_{кл} + r_m) / K_m^2 = 0.94 \text{ мОм}, \quad x_{0.4} = (x_{кл} + x_m) / K_m^2 = 18.2 \text{ мОм}.$$

Наиболее сложный режим работы составляет нагрузка, состоящая только из преобразователя частоты. Поэтому комплексную нагрузку моделировать не будем. Для выпрямителя мощностью $S=P=80$ кВт 1-я гармоника фазного тока

$$I_{(1)} = \frac{S}{U\sqrt{3}} = 115.5 \text{ А}.$$

Источники высших гармоник на схеме замещения представляют источниками тока [2]. Величину тока различных гармоник выпрямителя можно оценить по следующей формуле

$$I_{(k)} = \frac{I_{(1)}}{k}.$$

где $I_{(1)}$ – ток 1-ой гармоники. Для трехфазной мостовой схемы выпрямителя могут генерироваться 5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д. гармоники.

Схема замещения для к-ой гармоники представлена на рисунке 5.2.

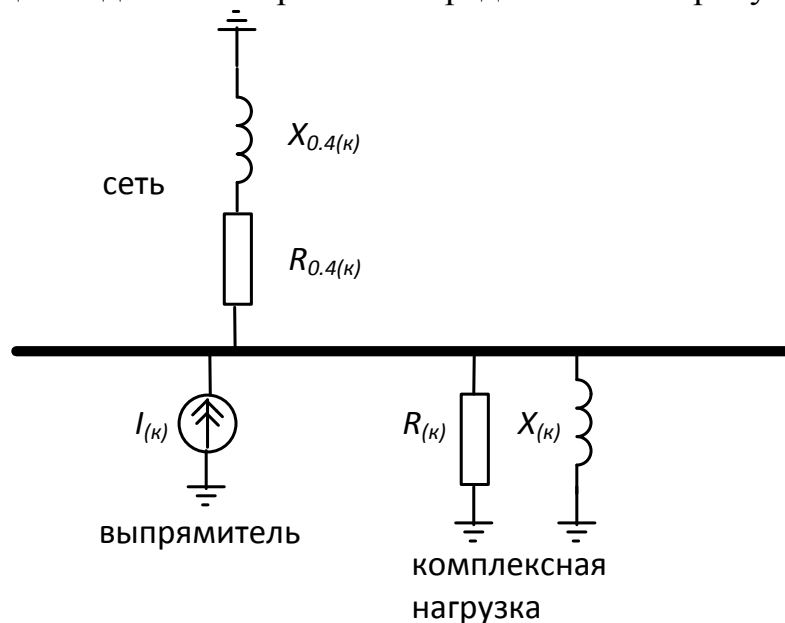


Рисунок 5.2 – Схема замещения для к-ой гармоники

Для определения качества электрической энергии необходимо рассчитать напряжение на секции шин. Сопротивления элементов для к-ой пересчитывается по формулам

$$r_{0.4(k)} = r_{0.4(1)} \sqrt{k},$$

$$x_{0.4(k)} = x_{0.4(1)} k,$$

где $r_{0.4(k)}$ - активное сопротивление к-ой гармоники, изменяющееся из-за скин-эффекта;

$x_{0.4(k)}$ - реактивное сопротивление к-ой гармоники.

Напряжение для k-ой гармоники

$$U_{(k)} = \frac{I_{(1)}}{k} \sqrt{kr_{0,4}^2 + (kx_{0,4})^2}.$$

Результаты расчета для 5-ой, 7-ой, 11-ой и 13-ой гармоник приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Показатель	$U_{(5)}, В$	$U_{(7)}, В$	$U_{(11)}, В$	$U_{(13)}, В$
Значение	2.1	2.1	2.1	2.1

Для оценки соответствия коэффициентов гармоник и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения нормам стандарта [20] измеряют действующие значения гармонических составляющих напряжения. Коэффициент k-ой гармоники

$$K_{(k)} = \frac{U_{(k)}}{U_{(1)}} 100\%,$$

где $U_{(1)}$ - действующее значение напряжения 1-ой гармоники;

$U_{(k)}$ - действующее значение напряжения k-ой гармоники.

Коэффициент несинусоидальности напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100,$$

где $U_{(1)}$ - действующее значение напряжения 1-ой гармоники;

$U_{(k)}$ - действующее значение напряжения k-ой гармоники.

Результаты проверки нормативных требований приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Показатель	$K_{(5)}$	$K_{(7)}$	$K_{(11)}$	$K_{(13)}$	K_U
Расчетное значение	1%	1%	1%	1%	3.8%
Нормативное значение	4%	3%	3%	2.5%	8%

Таким образом, установка преобразователя частоты не приводит к нарушению нормативных требований по качеству электроэнергии для остальных потребителей цеха.

Вывод к разделу 5:

Нормативные требования к качеству электроэнергии выполняются.

6 ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В ЦЕХЕ

6.1 Общие правила электробезопасности

Электробезопасность обеспечивается конструкцией электроустановок, системой организационных и технических мероприятий [1, 21, 22], обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электромагнитного поля и статического электричества, а также с помощью применения специальных средств защиты.

К техническим способам и средствам защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям [22] относятся:

- защитные оболочки (крышки и кожухи для предотвращения случайного прикосновения);
- защитные ограждения (сетчатые ограждения в распределительных устройствах);
- безопасное расположение токоведущих частей согласно [1];
- предупредительная сигнализация.

Для безопасного проведения работ выполняются следующие организационные мероприятия:

- назначение лиц, ответственных за безопасное проведение работ;
- выдача разрешения на подготовку рабочего места и на допуск;
- подготовка рабочего места и допуск;
- надзор при выполнении работ;
- перевод бригады на другое рабочее место;
- оформление перерывов в работе и ее окончания;
- выдача наряда или распоряжения (имеет разовый характер; срок его действия определяется продолжительностью рабочего дня исполнителей).

Согласно [22] выдавать наряды (распоряжения) могут работники из числа административно-технического персонала, имеющие соответствующую группу по электробезопасности: V группу - в электроустановках напряжением выше 1000 В, IV группу – в электроустановках напряжением до 1000 В.

Для подготовки рабочего места при работе, требующей снятия напряжения, (вывод в ремонт вводного автоматического выключателя РУ-0,4 кВ) должны быть выполнены в указанном порядке следующие технические мероприятия, работниками, из числа электротехнического персонала:

- проведены необходимые отключения и приняты меры, препятствующие ошибочному или самопроизвольному включению коммутационной аппаратуры;
- проверено отсутствие напряжения на токоведущих частях, которые должны быть заземлены для защиты людей от поражения током;
- установлено заземление (установлены переносные заземления);
- ограждены при необходимости рабочие места и оставшиеся под напряжением токоведущие части, и вывешены на ограждениях соответствующие плакаты.

Все средства электрозащиты в электроустановках, используемые в цехе удовлетворяют требованиям стандартов [23]. Средства защиты разделяют на средства общего пользования (хранятся в помещениях электроустановок), а также могут выдаваться для индивидуального пользования.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Основные электробезопасные средства: изолирующие штанги всех видов, указатели напряжения, электроизмерительные клещи, изолирующие клещи, диэлектрические перчатки, инструмент ручной, с изолирующими рукоятками.

Дополнительные электробезопасные средства: диэлектрические галоши, лестницы приставные, стремянки изолирующие стеклопластиковые, изолирующие колпаки, покрытия, накладки, диэлектрические ковры и изолирующие подставки.

Средства защиты от электрических полей: плакаты и знаки безопасности (запрещающие, предписывающие, предупреждающие, указательные), переносные заземления, различные съемные и переносные экранирующие устройства, индивидуальные экранирующие комплекты (для работ на открытых распределительных устройствах).

Кроме перечисленных средств защиты также применяются средства индивидуальной защиты: каски защитные, противогазы и респираторы, очки и щитки защитные, рукавицы, пояса предохранительные и канаты страховочные (от падения с высоты).

В соответствии с [23] установлены порядок и общие правила пользования средствами индивидуальной защиты.

6.2 Требования безопасности при обслуживании электроустановок

В цехе в сети 0,4 кВТ применяется четырехпроводная сеть TN-C. Система TN – это система с глухозаземленной нейтралью, при которой открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника с помощью нулевых защитных проводников. Подсистема TN-C, это TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены на всем ее протяжении. Четырехпроводная сеть TN-C с совмещенным проводником PEN показана на рисунке 6.1.

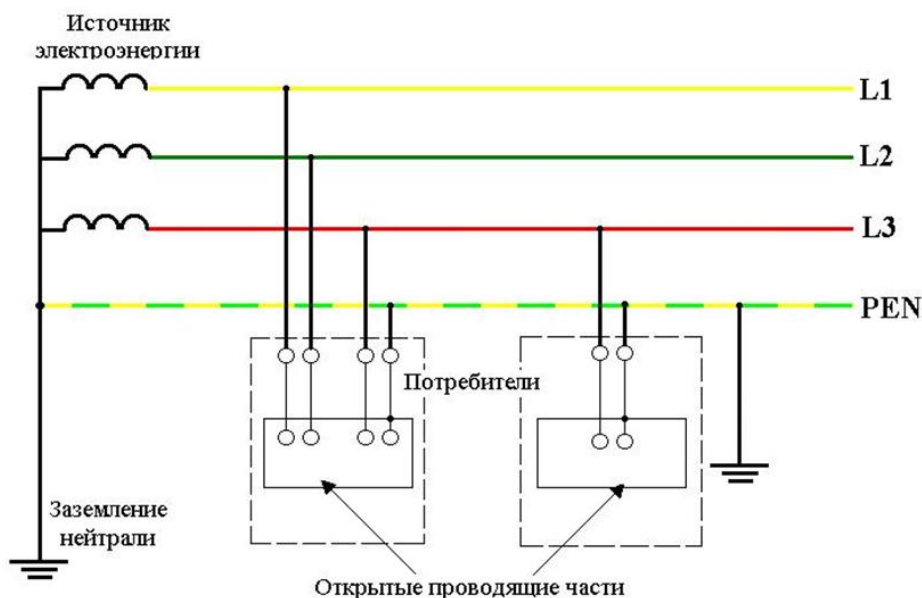


Рисунок 6.1 – Четырехпроводная сеть TN-C

В электроустановках до 1000 В оперативно-ремонтный персонал, обслуживающий электроустановку, должен соответствовать требованиям правил техниче-

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

ской эксплуатации [22]. Для самостоятельного обслуживания электроустановки организация должна иметь службу эксплуатации и аттестованный оперативно-ремонтный персонал. Согласно [22] ответственный за электрохозяйство назначается из числа административно-технического персонала – руководителей и специалистов, на которых возложены обязанности по организации технического обслуживания, ремонта, монтажных и наладочных работ.

Сотрудники из числа административно-технического персонала проходят аттестацию в комиссии Ростехнадзора и имеют IV группу по электробезопасности. Назначение ответственного за электрохозяйство оформляется приказом по предприятию. Техническое обслуживание и эксплуатация электроустановки осуществляется оперативно-ремонтным персоналом, т.е. персоналом, обеспечивающим техническое обслуживание и ремонт, монтаж, наладку и испытание электрооборудования, специально обученным и подготовленным для оперативного обслуживания в утвержденном объеме закрепленных за ним электроустановок.

Работы по техническому обслуживанию и текущему ремонту, а также другие виды работ по электрооборудованию выполняются в полном соответствии с [22] и [24]. В связи с опасностью для жизни и здоровья людей при выполнении многих видов работ, системой охраны труда предусматриваются организационные мероприятия по обеспечению их безопасности. Все работы должны оформляться нарядом-допуском или распоряжением, а также перечнем работ в порядке текущей эксплуатации.

Ответственными за безопасность работ, выполняемых по нарядам-допускам, являются: лицо, выдающее наряд-допуск, ответственный руководитель работ, производитель работ, допускающий к работе, наблюдающий, члены бригады.

Лицом, оформляющим и выдающим наряд-допуск, выступают начальник цеха или участка, где будут выполняться работы. Право выдачи нарядов-допусков имеют также главный механик, главный энергетик предприятия.

Перечень работ, выполняемых по наряду-допуску в цехе:

- обслуживание осветительных устройств, расположенных на потолке цеха (выполняют не менее двух человек, один из которых имеет III группу допуска по электробезопасности);
- работы на сборных шинах распределительного устройства, присоединениях по которым возможна подача напряжения на сборные шины;
- работы на отключенном электродвигателе или механизме, приводимом им в движение, если работа связана с прикосновением к токоведущим или вращающимся частям;
- работы на коммутационных аппаратах с их опробованием;
- работа по одному наряду на нескольких электродвигателях одного напряжения, технологических линиях, выведенных в ремонт агрегатах;
- испытания электрооборудования, в том числе вне электроустановок с использованием передвижной испытательной установки;
- работы во вторичных цепях, устройствах релейной защиты, автоматики, при их расположении в РУ;
- неотложные работы, более 1 часа, с участием более трех работников.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Все работы, проводимые в электроустановках без наряда, выполняются по распоряжению лиц, уполномоченных на это, с оформлением в оперативном журнале или в порядке текущей эксплуатации с последующей записью в оперативный журнал.

Распоряжение на производство работ имеет разовый характер, срок его действия определяется продолжительностью рабочего дня исполнителей. При необходимости повторения работы при изменении ее условий или состава бригады распоряжение должно отдаваться заново с оформлением в оперативном журнале.

По распоряжению производятся:

- ремонт осветительной аппаратуры и замена ламп, расположенных вне камер и ячеек (при снятии напряжения с участка осветительной сети, на котором производятся работы);
- уход за щетками электродвигателей и их замена;
- уход за кольцами и коллекторами электрических машин, возобновление надписей на кожухах оборудования и ограждениях и т.п.;
- надзор за сушкой временно выведенных из схемы трансформаторов и другого оборудования, обслуживание маслоочистительной и прочей вспомогательной аппаратуры при очистке и сушке масла выведенного из схемы оборудования;
- работы по монтажу, проверке, регулировке, снятию для ремонта и установке измерительных приборов, счетчиков, устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, работы на приводах коммутационных аппаратов, на вторичных цепях и в цепях электроприводов схем автоматического и дистанционного управления.

В порядке текущей эксплуатации производятся следующие работы.

Со снятием напряжения:

- присоединение, отсоединение проводов, кабелей электродвигателей, другого оборудования;
- текущий ремонт отдельных двигателей;
- ремонт контакторов, пускателей, автоматических выключателей, пусковых кнопок, рубильников, установленных вне РУ сборок, щитов;
- замена ламп, чистка светильников, ремонт осветительной арматуры, электропроводки, электроустановочных изделий на высоте до 2,5 метров с постоянных приспособлений.

Без снятия напряжения на токоведущих частях и вблизи них:

- поиск неисправности в электроприводе станка;
- проверка отсутствия напряжения в осветительной цепи, коммутационной аппаратуре до 1000 В.

6.3 Особенности послеаварийного режима для принятого варианта

Функционирование системы электроснабжение цехов в нормальном режиме показано на рисунке 6.2. На рисунках 6.2-6.4 выключатели, которые в рассматриваемом режиме замкнуты, показаны без штриховки. На рисунках 6.2-6.4 выключатели, которые в рассматриваемом режиме разомкнуты, показаны со штриховкой.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Проведенные расчеты показывают, что принятое решение обеспечивает резервный источник питания только для вновь вводимых в эксплуатацию двигателей. Поэтому при потере питания секции шин трансформатора 1 автоматика обеспечивает отключение выключателя В1 и включение выключателей В3 и В4.

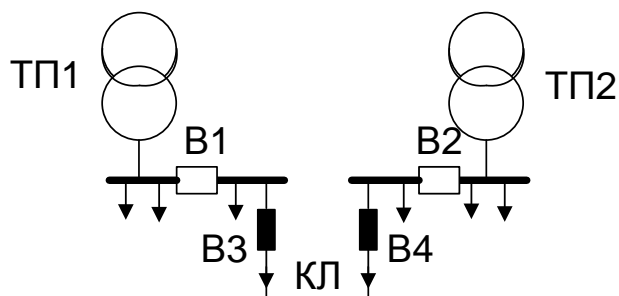


Рисунок 6.2 – Нормальный режим работы

Работа системы электроснабжения при аварии трансформатора ТП1 (на рис. заштрихован) показана на рисунке 6.3. В послеаварийном режиме трансформатор ТП2 питает все нагрузку своего цеха и двигатель цеха 1. Аналогичная ситуация возникает при аварии трансформатора ТП2 (рисунок 6.3).

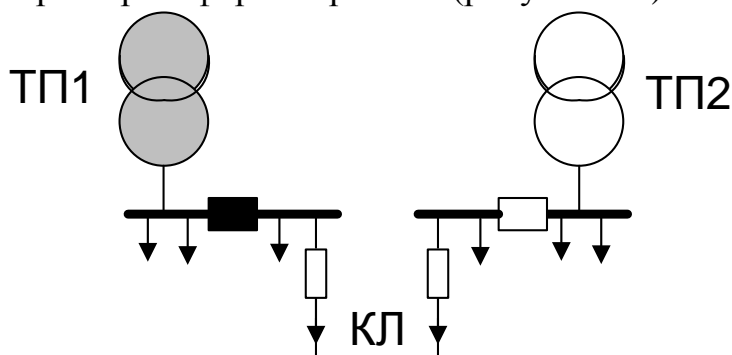


Рисунок 6.3 – Режим работы при ремонте трансформатора 1

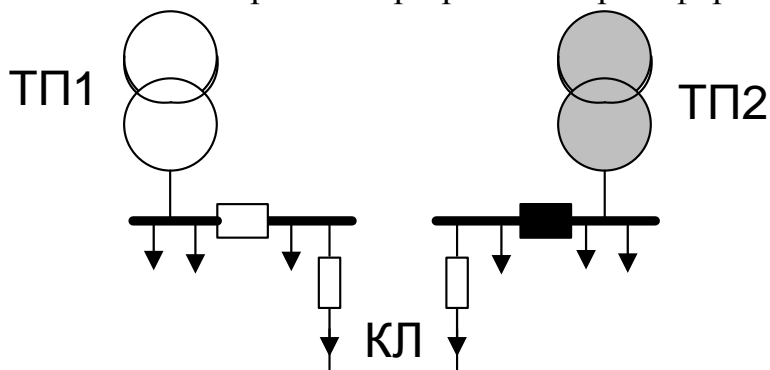


Рисунок 6.4 – Режим работы при ремонте трансформатора 2

Организацию переключений лучше организовать в автоматическом режиме, поскольку ошибка персонала – не отключение нагрузки, относящейся к 3-ей категории, может создать аварийную ситуацию. В этом случае возникает недопустимое падение напряжения, и как следствие недопустимая перегрузка по току оборудования.

Выводы по разделу 6:

Рассмотрены основные правила обеспечения электробезопасности в цехах, а также особенности эксплуатации кабельной перемычки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе найдено оптимальное решение по подключению двух двигателей (потребителей 2-й категории по надежности электроснабжения) к системе электроснабжения цехов. Устройство кабельной перемычки между цехами оказалось наиболее экономически целесообразным способом резервирования для нагрузок 2-ой категории.

Возникшие при этом проблемы с пуском двигателей решены с помощью установки устройства для плавного пуска (двигатель со спокойной нагрузкой) и преобразователя частоты (двигатель с резкопеременной нагрузкой). Во втором случае установка преобразователя частоты экономически оправдана, поскольку обеспечивает серьезную экономию электроэнергии при работе двигателя в нормальном режиме и частичную компенсацию реактивной мощности на шинах трансформаторной подстанции.

Принятое решение обеспечивает нормативные требования по качеству электроэнергии для остальных электроустановок цеха.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: ООО «Центр безопасности труда», 2006. – 848 с.
- 2 Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
- 3 РТМ 36.18.32.4-92. Указания по расчету электрических нагрузок. – М.: Тяж-промэлектропроект, 1992. – 12 с.
- 4 Электротехнический справочник В 4 т. Т.2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов) – 9-е изд. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 518 с.
- 5 НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 48 с.
- 6 Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
- 7 Ершов, А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 1: Токи короткого замыкания: учебное пособие / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 168 с.
- 8 Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 359 с.
- 9 Розанов, Ю.К. Силовая электроника Текст учеб. для вузов по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 631, [1] с. ил. 25 см.
- 10 Гельман, М.В. Преобразовательная техника Текст учеб. пособие по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский ; Юж.-Урал. гос. ун-т, Каф. Электропривод и автоматизация пром. установок; ЮУрГУ. - Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2009. – 423, [1] с. ил.
- 11 Электротехника: Учебное пособие для студентов вузов. В 3-х книгах. Книга 3-я: Электроприводы. Электроснабжение /Под ред. Бутырина П.А., Гафиятуллина Р.Х., Шестакова А.Л. – Челябинск – Москва: Изд-во ЮУрГУ, 2005 – 640с)
- 12 Шабанов, В.А., Эффективность использования безтрансформаторных многоуровневых преобразователей частоты в электроприводе магистральных насосов / Электронный научный журнал Нефтегазовое дело / Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р., Хакимьянов М.И. Токмаков Д.А., Шепелин А.В.
- 13 Справочник по проектированию электрических сетей /под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. :ЭНАС, 2012 – 376 с.
- 14 Информация на сайте ТОО «Астанаэнергосбыт», для юридических лиц, в разделе «Тарифы. – http://www.astanaenergobyt.kz/tarif_ur.
- 15 Стоимость кабелей https://www.pulscen.ru/price/070401-kabel-silovoj/f:31206_3kh150.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

16 Стоимость дизель-генераторов <https://www.vseinstrumenti.ru/instrument/generatory-elektrostantsii/dizelnye/100-kvt/>.

17 Стоимость источников бесперебойного питания <https://www.Bespereboynik.ru/dlya-promishlennosti>.

18 Стоимость тиристорных контакторов www.zvezda-el.ru.

19 Стоимость преобразователей частоты www.en22.ru.

20 ГОСТ 13109-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Энергоатомиздат, 2013. – 52 с.

21 ГОСТ 12.1.019-79 (2009) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 32 с.

22 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Челябинск: ООО «Центр безопасности труда», 2006. – 273 с.

23 СО 153-34.03.603-2003 Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. www.elec.ru/library/direction/so_153-34_03_603-2003.

24 Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – М.: Росминтруд, 2013. – 45 с.

					13.03.02.2021.152.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47