

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурсов Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 05.06.2026 09:53:28

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba81860b0b0aa62

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

для студентов направления подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

№ п/п	Стр.
	Введение
1.	Цель и задачи изучения дисциплины
2.	Оборудование и материалы
3.	Наименование лабораторных работ
4.	Содержание лабораторных работ
4.1	Лабораторная работа № 1. Расчетные электрические нагрузки потребителей, элементов и коммутационных узлов. Выбор параметров основного электрооборудования и нагрузочная способность.
4.2	Лабораторная работа № 2. Нагрузочная способность и выбор параметров основного электрооборудования. Регулирование напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия и компенсация реактивной мощности.
4.3.	Лабораторная работа №3. Режимы работы схем распределительных электросетей до и выше 1000 В. Изменений напряжения, фликер, несинусоидальность и несимметрия напряжений в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ.
4.4	Лабораторная я работа №4. Вероятностно-статистический метод как основа практических методик определения расчетной нагрузки элементов систем электроснабжения на различных ее уровнях. Регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях.
4.5	Лабораторная работа №5. Учет категории надежности электроснабжения электроприемников и величин, допускаемых систематических и послеаварийных перегрузок при выборе количества и мощности трансформаторов городских и цеховых подстанций. Регулирование потерь по электропитанию в промышленных электросетях.
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

Введение

Лабораторные занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Приемники и потребители электроэнергии в системах электроснабжения», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Лабораторные занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Лабораторные занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении экспериментных задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью лабораторных занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Цель изучения дисциплины

- формирование у студентов систематических знаний по вопросам проектирования и эксплуатации комплексных систем электроснабжения городов и промышленных предприятий.

Задачами дисциплины является:

- Знать взаимосвязи между потребителями и системой электроснабжения; показатели графиков нагрузки электроприемников и потребителей;
- Уметь анализировать графики нагрузки.
- Владеть навыками разработки основных энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения.

2. Оборудование и материалы

Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Энергосбережение в системах электроснабжения и электропотребления». Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электрические станции и подстанции». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Умная местная распределительная электрическая сеть». Научно-исследовательский комплекс «Оптимизация режимов работы электрических сетей с активными элементами, выполненными на базе силовых полупроводниковых преобразователей», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс «Автоматизированные средства управления и защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс

«Применение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии с целью повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения», исполнение стендовое ручное. Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы». Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические машины». Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические машины». Лабораторное оборудование «Электроэнергетика-релейная защита и автоматика». Учебный стенд «Теория электрических цепей и основы электротехники».

3. Наименование лабораторных работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы:

Лабораторная работа №4. Нагрузочная способность и выбор параметров основного электрооборудования- 4 часа, Лабораторная работа №6 Режимы работы схем распределительных электросетей до и выше 1000 В- 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
6 семестр			

1	Лабораторная работа № 1. Расчетные электрические нагрузки потребителей, элементов и коммутационных узлов. Выбор параметров основного электрооборудования и нагрузочная способность.	4	—
2	Лабораторная работа № 2. Нагрузочная способность и выбор параметров основного электрооборудования. Регулирование напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия и компенсация реактивной мощности.	4	—
3	Лабораторная работа №3. Режимы работы схем распределительных электросетей до и выше 1000 В. Изменений напряжения, фликер, несинусоидальность и несимметрия напряжений в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ.	4	—
4	Лабораторная я работа №4. Вероятностно-статистический метод как основа практических методик определения расчетной нагрузки элементов систем электроснабжения на различных ее уровнях. Регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях.	4	—
5	Лабораторная работа №5. Учет категории надежности электроснабжения электроприемников и величин, допускаемых систематических и послеаварийных перегрузок при выборе количества и мощности трансформаторов городских и цеховых подстанций. Регулирование потерь по электропитанию в промышленных электросетях.	2	—
Итого		18	—

Лабораторная работа №1
Тема занятия Структуры и параметры систем энергоснабжения.

Цель занятия. Рассчитать параметры основного оборудования и научиться подбирать его по показателям системы.

Теоретическая часть

1.1. Нагрузочная способность и выбор параметров основного электрооборудования.

1.2. Цель работы

Изучение конструкции лабораторной установки, принципа ее работы и параметров моделируемых элементов СЭПП.

Исследование режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени и определение параметров режимов.

1.3. Введение

Основные номинальные параметры моделируемых элементов СЭПП приведены в табл.1. Для трехфазных силовых трансформаторов в практических расчетах используются следующие параметры при замещении трансформатора Г – образной однолинейной эквивалентной схемой:

U_1, U_2 — фазные напряжения, приведенные к одной ступени напряжения;

I_1, I_2 — токи первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$I_{xx} = I_a - jI_p$ — ток холостого хода трансформатора;

$X_\mu = \frac{3U_1^2}{Q_{xx}}$ — индуктивная составляющая сопротивления ветви намагничивания;

$r_a = \frac{3U_1^2}{\Delta P_{xx}}$ — активная составляющая сопротивления ветви намагничивания;

$R = \frac{\Delta P_{кз} \cdot 10^3}{3I_H^2} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_H^2}{S_H^2}$ — активное сопротивление трансформатора, Ом;

$X = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_k \cdot U_H}{100}\right)^2 - (I_H R)^2}}{I_H}$ — индуктивное сопротивление трансформатора, Ом;

Ом;

$\Delta \dot{S} = 3I_2^2 R - j3I_2^2 X = \Delta P_{кз} \cdot K_3^2 - j\Delta Q_{кз} K_3^2$ — нагрузочные потери в

трансформаторе ($K_3 = \frac{I_2}{I_H}$ — коэффициент загрузки), кВт;

$\Delta \dot{U} = \dot{I}_2 R + j\dot{I}_2 X$ - потери напряжения в трансформаторе, В.

Оборудование

Основной особенностью режимов работы СЭПП на длительных циклах времени (сутки, неделя, год) является их изменчивость, что обусловлено изменчивостью электрических нагрузок. Режимы СЭПП характеризуются параметрами двух типов: текущие и

интегральные за время T . К текущим параметрам относятся значение токов, напряжений, мощностей в узлах сети, изменяющиеся во времени. К интегральным за время T — средние значения токов, напряжений, мощностей, их дисперсии, потери электроэнергии и др.

На суточных интервалах времени текущие значения параметров режимов СЭПП принято представлять в форме суточных графиков (тока, напряжения, мощности и др.) их осредненных значений на последовательных интервалах θ ($\theta = 30$ или 60 мин).

Интегральные параметры, например, для графика тока

$$I_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i; \quad \sigma_I^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{cp})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2 - I_{cp}^2 = I_{\vartheta}^2 - I_{cp}^2,$$

где n — число интервалов θ в суточном графике тока;

I_{ϑ} — среднеквадратическое значение графика тока.

Потери электроэнергии в линии с сопротивлением R за время T :

$$\Delta W = 3I_{cp}^2 RT + 3\sigma_I^2 RT = \theta \sum_{i=1}^n 3I_i^2 R.$$

Потери электроэнергии в трансформаторе за время T :

$$\Delta W = \Delta P_{xx} T + \left(\frac{I_{cp}}{I_H} \right)^2 \Delta P_{кз} T + \frac{\sigma_I^2}{I_H^2} \Delta P_{кз} T = \Delta P_{xx} T +$$

$$+ \theta \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i}{I_H} \right)^2 \Delta P_{кз}.$$

1.4. (задание)

1.3.1. Изучить конструкцию лабораторной установки. Рассчитать все сопротивления эквивалентной схемы для трансформаторов Т2 и Т4.

1.3.2. Подготовиться к регистрации графиков активных и реактивных нагрузок, заготовить табл.3 в двух экземплярах (для трансформаторов Т2 и Т4).

Таблица 3

Регистрация и расчет текущих параметров режима СЭПП напряжение суточном интервале времени для трансформатора Т2(Т4)

Номер часа суток	Показания счетчиков				Графики нагрузок				
	Активного		Реактивного		Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Полная мощность, кВА	$tg\phi_k$	То
	Показания	Разность	Показания	Разность					
0									
1									
2									
...									
3									
Среднее значение Среднеквадратическое отклонение									

1.3.3. Подготовить установку и самопишущий прибор для регистрации текущих параметров режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени;

включить трансформатор Т4, обобщенную нагрузку S_1 на шинах 10,5 кВ ГПП, синхронный электродвигатель; отключить трансформатор Т3, конденсаторные батареи БК1, БК2 и БК3, а также силовой фильтр ФКУ; установить РПН трансформатора Т2 и ПБВ трансформатора Т4 в нулевое положение; подготовить к работе самопишущий прибор и подключить его с помощью соединительных проводов к соответствующему трансформатору тока (рис.2) для регистрации графика тока в трансформаторе Т4.

1.3.4. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4 путем считывания и записи в табл.3 (графы 2, 4) показаний соответствующих счетчиков. График тока трансформатора Т4 записать с помощью самопишущего прибора.

Содержание отчета

1.3.5. Произвести расчет графиков активной, реактивной и полной мощностей путем умножения разности показаний счетчиков на соответствующий масштабный коэффициент (табл.2). Рассчитать средние значения и среднеквадратические отклонения графиков нагрузки. Для Т4 значения тока (графа 10) определить расчетным путем или по регистрограмме, разбив ее на 24 равных интервала, измерив среднее значение на каждом интервале линейкой (в миллиметрах и умножив их на соответствующий масштабный коэффициент). Для самоконтроля рекомендуется сопоставить полученные значения тока со значениями, рассчитанными по полной мощности.

1.3.6. Рассчитать потери электроэнергии за сутки в трансформаторах Т2, Т4 и в кабельной линии (в киловатт – часах и в процентах). В величине потерь выделить составляющую, обусловленную неравномерностью графиков нагрузок.

1.3.7. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- мнемосхему установки, краткое описание и параметры моделируемых элементов типовой СЭПП, цель работы;
- расчет сопротивлений эквивалентной схемы трансформаторов Т2 и Т4;
- результаты регистрации и расчета графиков нагрузки и их параметров для трансформаторов Т2 и Т4 (табл.3);
- графики нагрузок Т2 и Т4 (активной, реактивной, полной мощности и тока);
- расчет потерь электроэнергии в трансформаторах Т2, Т4 и в кабельной линии, питающей трансформатор Т4;
- оценку (в % к полным потерям) потерь в указанных элементах схемы, обусловленных реактивными нагрузками;
- выводы по полученным результатам работы.

1.5. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к лабораторной работе должна включать:

- изучение теоретического материала курса ЭСПП по разделу «Режимы электропотребления промышленных предприятий»;
- выполнение п.1.3.1 и 1.3.2 задания.

1.6. Контрольные вопросы

1.5.1. Каковы причины изменчивости параметров режимов работы СЭПП во времени?

1.5.2. Какие потери имеются в трансформаторах и от чего они зависят?

1.5.3. Как определяются потери электроэнергии в промышленных электросетях?

1.5.4. Неравномерность режимов электропотребления осложняет и ухудшает работу электроэнергетических систем. Почему?

Лабораторная работа №2

Тема занятия Регулирование напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия и компенсация реактивной мощности.

Цель занятия. Приобрести навыки регулирования напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия и компенсация реактивной мощности.

Теоретическая часть

Компенсация реактивной мощности и регулирование напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия.

2.1. Цель работы

Изучение основных принципов компенсации реактивных нагрузок (КРН) в промышленных электрических сетях (ПЭС). С этой целью в работе предусмотрено: вычисление общей мощности компенсирующих устройств (КУ) для потребителя, реализация расчетного режима реактивной мощности на лабораторной модели, оценка влияния КРН на режим напряжения и расчет экономического эффекта.

2.2. Введение

Обмен реактивной мощностью между системой электроснабжения предприятия и электроэнергетической системой (ЭЭС) регламентирован «Правилами пользования электрической и тепловой энергией». Установление конкретных требований к режиму реактивной мощности каждого из предприятий осуществляется при ежегодном заключении договора на поставку электроэнергии от электроснабжающей организации. Экономически обоснованные входные реактивные мощности ($Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$) $\angle 4 \searrow$ задаются предприятием дифференцированно, в зависимости от потребляемой мощности и электрической удаленности предприятия от основных источников энергии (электростанций). Числовые значения $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ определяются в результате расчетов оптимальных режимов работы энергосистемы в периоды ее максимальных ($Q_{Э1}$) и минимальных ($Q_{Э1}$) нагрузок.

В работе исследуется узел нагрузки, схема замещения которого показана на рис.7.

Схема содержит только одну из секций ГПП (правую секцию), поскольку вторая условно считается аналогичной. Граница балансовой принадлежности находится на уровне высоковольтных вводов трансформаторов ГПП. На границе сводятся контрольные балансы активной и реактивной мощностей. Контроль осуществляется на последовательных получасовых интервалах времени при помощи счетчиков энергии с фиксированием максимумов или при помощи специальных автоматизированных информационно-измерительных систем.

В лабораторной модели источниками реактивной мощности являются: электроэнергетическая система ($Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$), синхронный электродвигатель ($Q_{д}$), конденсаторные установки БК1, БК2 напряжением 10 кВ (Q_{KB}) и БК3 напряжением 0,4 кВ (Q_{KH}); потребителями – нагрузка на шинах 10,5 кВ (Q_1) и нагрузка ТП (Q_2).

Рис.7. Схема замещения узла нагрузки

Наилучшим (оптимальным) режимом компенсации реактивных нагрузок будет режим, соответствующий минимальной величине годовых расчетных затрат и удовлетворяющий требованиям электроэнергетической системы $\angle 4 \searrow$. Для нахождения этого режима составляется функция расчетных затрат (целевая функция) и записываются ограничения $\angle 4,5 \searrow$. Оптимальными считаются такие мощности компенсирующих устройств, при которых целевая функция принимает минимальное значение в области допустимых решений. Область допустимых решений определяется ограничениями, накладываемыми на мощности КУ. Расчет оптимальных мощностей КУ, в описанной выше постановке задачи, производится с помощью методов математического программирования.

В лабораторной установке моделируется не вся ПЭС, а только ГПП и одна из цеховых подстанций с питающей ее кабельной линией. Нагрузка Q_1 представляет собой суммарную реактивную мощность, потребляемую остальными ТП, число и мощность которых не известны. В этих условиях задачу оптимизации размещения КУ можно решать без применения оптимизационных методов, разделив ее на два этапа.

Этап первый. Рассматривается ТП (рис.8) и определяется Q_{KH}

Рис.8. Расчетная схема замещения для первого этапа расчетов

Для определения Q_{KH} записывается функция годовых расчетных затрат.

$$z(Q_{KH}) = E \cdot \Delta K_H \cdot Q_{KH} + C_o \left[\Delta P_H Q_{KH} + \frac{R_{ТЛ}}{U^2 \cdot 10^3} (Q_2^m - Q_{KH})^2 \right] \quad (5.1)$$

где E – коэффициент отчислений от капиталовложений (нормативные отчисления, отчисления на эксплуатацию и восстановление оборудования). Численные значения E следует принять по указанию преподавателя в пределах (0,2 — 0,4);

ΔK_H — Удельная стоимость конденсаторных установок низкого напряжения (150 руб/кВАр);

C_o — удельная стоимость потерь активной мощности (задается преподавателем в пределах от 800 до 1200 руб/кВт);

ΔP — удельные потери активной мощности в конденсаторных установках напряжения (0,003 кВт/кВАр);

R_{TL} — приведенное к напряжению 10 кВ сопротивление трансформатора цеховой ТП и питающей его линии электропередачи, Ом.

Величина этого сопротивления определяется по данным табл.1 описания лабораторной установки;

U — среднее напряжение на шинах ГПП (10 кВ);

Q_2^m — наибольшая реактивная мощность нагрузки трансформатора Т4 в период максимальной активной мощности нагрузки энергосистемы (для упрощения работы считаем, что трансформатор Т3 отключен и в расчетах не учитывается). Определяется по графику нагрузки Т4, полученному в работе №1. Период максимума задается преподавателем.

$$R_{TL} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U^2}{S_{HT}^2} \cdot 10^3 + R_o \cdot l \quad (5.2)$$

где ΔP_{K3} — потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт (табл.1.1);

S_{HT} — номинальная мощность трансформатора, кВА;

R_o — удельное активное сопротивление линии электропередачи, Ом/км;

l — длина линии электропередачи, км.

Мощность конденсаторной батареи определяется из уравнения

$$\frac{\partial z(Q_{KH})}{\partial Q_{KH}} = 0, \quad (5.3)$$

Расчетное выражение имеет вид

$$Q_{KH} = Q_2^m - \frac{E \cdot \Delta K_H + C_o \cdot \Delta P_H}{2 \cdot C_o \cdot R_{TL}} \cdot U^2 \cdot 10^3 \quad (5.4)$$

Этап второй. На этом этапе рассматривается задача нахождения оптимальных значений Q_{KB} и Q_{∂} (рис.9). Величина некомпенсированной мощности, передаваемой через трансформатор Т4, показана на схеме как Q_T .

Функция годовых расчетных затрат для этого этапа расчетов имеет вид $z(Q_{KB}, Q_{\partial}) = E \cdot \Delta K_B \cdot Q_{KB} + C_o \cdot (\Delta P_{KB} \cdot Q_{KB} + K_1 \cdot Q_{\partial} + K_2 \cdot Q_{\partial}^2)$, руб/год, (5.5)

где E, C_o — см. выражение (5.1);

ΔK_B — удельная стоимость конденсаторных батарей высокого напряжения (120 руб/кВАр);

Рис.9. Расчетная схема замещения

для второго этапа расчетов

ΔP_{KB} — удельные потери активной мощности в конденсаторных установках высокого напряжения (0,002 кВт/кВАр);

K_1, K_2 — коэффициенты, характеризующие потери активной мощности в СД, зависящие от Q_{∂} ($K_1 = 0,011$ кВт/кВАр, $K_2 = 0,00019$ кВт/кВАр²).

Функция Лагранжа

$$L(Q_{KB}, Q_{\partial}, \lambda) = z(Q_{KB}, Q_{\partial}) + \lambda(Q_1^m + Q_T - Q_{\partial} - Q_{KB} - Q_{\partial}), \quad (5.6)$$

где Q_1^m — реактивная мощность нагрузки на шинах 10 кВ ГПП в период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС.

Мощности Q_{KB} и Q_{∂} определяются решением системы уравнений

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{K3}} = 0,$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{\partial}} = 0, \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$$

Из (5.7) можно получить выражение для расчета Q_{KB} , Q_{∂} в общем виде:

$$Q_{\partial} = \frac{1}{K2} \left(\frac{E \cdot \Delta K_B}{C_o} + \Delta P_{KB} - K1 \right), \text{ кВАр} \quad (5.8)$$

$$Q_{KB} = Q_1^m + Q_T - Q_{\Sigma 1} - Q_{\partial}, \text{ кВАр} \quad (5.9)$$

С помощью (5.4), (5.8), (5.9) вычисляются необходимые установленные мощности конденсаторных батарей и наибольшая реактивная мощность СД. Отрицательные значения расчетных мощностей свидетельствуют об отсутствии экономической целесообразности использования соответствующего источника реактивной мощности. Его значение принимается равным нулю. Величина Q_{∂} не должна превышать допустимых значений по условиям нагрева статора и ротора СД с учетом его загрузки по активной мощности. Проверка СД по условиям нагрева в лабораторной работе не предусмотрена.

Оборудование

Полное использование всех КУ экономически обосновано только в период максимальной нагрузки ЭЭС. При существенно изменяющемся графике реактивной мощности нагрузки требуется регулирование КУ. В лабораторной установке предусмотрено ручное дискретное регулирование Q_{∂} и автоматическое регулирование конденсаторных батарей. Графики регулирования КУ строятся на основании оптимизационных расчетов с учетом требований ЭЭС ($Q_{\Sigma 1}$, $Q_{\Sigma 2}$). Регулирование КУ должно обеспечить минимальные потери электроэнергии и требуемый уровень качества напряжения.

Для отдельного узла нагрузки, который исследуется в данной работе, оптимизация не требуется. Графики регулирования КУ в этом случае могут быть построены без расчетов. Основой для их построения являются графики реактивной нагрузки на шинах 10 кВ и 0,4 кВ. При построении графиков регулирования следует учесть:

1. В период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС потребление реактивной мощности не должно превосходить величину $Q_{\Sigma 1}$.

2. В период минимальной нагрузки потребляемая реактивная мощность должна быть меньше, чем $Q_{\Sigma 2}$.

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Получить у преподавателя следующую исходную информацию:

а) $Q_{\Sigma 1}$, $Q_{\Sigma 2}$;

б) интервалы времени, соответствующие периодам максимума и минимума активной мощности нагрузки ЭЭС;

в) удельную стоимость потерь активной мощности C_o

2.3.2. По формулам (5.4), (5.8), (5.9) определить мощности КУ (два этапа). Полученные значения округлить до ближайших возможных величин, указанных на мнемосхеме лабораторной установки.

Мощность нагрузки взять по графику, полученному в лабораторной работе №1, прочую необходимую информацию следует взять из табл.1.

2.3.3. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в часы максимума активной нагрузки ЭЭС. В случае необходимости выполнить корректировку мощностей КУ с целью обеспечения баланса.

2.3.4. Построить графики регулирования мощностей конденсаторных батарей (Q_{KB} , Q_{KH}) и синхронного двигателя (Q_{∂}). При построении графиков рекомендуется обратить внимание на технико-экономические характеристики и эффективность располагаемых КУ.

2.3.5. Проверить баланс реактивной мощности на шинах ГПП в часы минимума активной нагрузки ЭЭС.

5.3.6. Собрать схему автоматического управления анцапфами Т2 (работа №5) и мощностями конденсаторных батарей в соответствии с построенными графиками их

регулирования. Привести лабораторную модель в исходное рабочее состояние (включить S_1 , Т4, СД; отключить Т3, БК1, БК2, БК3).

2.3.7. Включить лабораторный стенд и выполнить следующее:

а) по показаниям счетчиков записать графики изменения активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4 с учетом расчетных мощностей КУ и их регулирования;

б) записать с помощью СП напряжение на шинах 0,4 кВ ТП с учетом реализации мероприятий по их улучшению (см. работу №4).

Запись графиков нагрузок и напряжений (п.«а» и «б») необходимо производить одновременно.

2.3.8. Построить графики нагрузки (P и Q) с учетом КУ и сравнить их с графиками, полученными в работе №1.

5.3.9. Построить гистограммы, вычислить математические ожидания и дисперсии напряжений на шинах 10 и 0,4 кВ с учетом КРН. Оценить влияние КУ на режим напряжения, сравнив полученные результаты с соответствующими данными работы №4.

2.3.10. Оценить экономический эффект КРН на суточном интервале времени в киловатт-часах сэкономленной электроэнергии. Оценку эффекта выполнить сравнением потерь энергии в трансформаторах Т2, Т4 и кабельной линии, вычисленных в работе №1 по графикам нагрузки, не учитывающим КУ и потерь в тех же элементах, но с учетом КУ и их регулирования.

Содержание отчета

2.3.11. Оформить отчет о лабораторной работе, который должен содержать:

а) таблицу исходных данных для выполнения работы, включая параметры, полученные у преподавателя;

б) расчет мощностей КУ;

в) графики регулирования КУ;

г) графики активной и реактивной мощностей нагрузки Т2 и Т4 с учетом КУ;

д) графики изменения напряжений на шинах 0,4 кВ ТП, полученные с помощью самопишущего вольтметра СП;

е) гистограммы напряжений на шинах 0,4 кВ ТП;

ж) расчет экономического эффекта;

з) выводы по результатам работы.

5.4. Подготовка к работе

В процессе подготовки к работе необходимо ознакомиться с ее описанием, изучить рекомендованную литературу и соответствующие разделы конспекта лекций. Заготовить бланки для записи показаний приборов и продумать ответы на контрольные вопросы.

2.5. Контрольные вопросы

2.5.1. Дать понятие реактивной мощности, пояснить ее физический смысл и особенности в сравнении с активной.

2.5.2. Чем определяются предельные значения реактивной мощности, которую может выдать в сеть синхронная машина?

2.5.3. Дать сравнительную характеристику источников реактивной мощности, используемых в СЭПП.

2.5.4. Каким образом реактивная мощность влияет на режим напряжения электрической сети?

2.5.5. Требования, предъявляемые ЭЭС к режиму реактивной мощности СЭПП.

2.5.6. Как оценивается экономический эффект внедрения расчетного оптимального режима компенсации нагрузок предприятия?

2.5.7. С какой целью выполняется регулирование мощностей компенсирующих устройств?

2.5.8. Перечислить и пояснить принципы построения графиков регулирования КУ.

2.5.9. Почему входные реактивные мощности задаются предприятием индивидуально?

2.5.10. Что понимается под оптимизацией режима компенсации реактивных мощностей нагрузок?

2.5.11. Пояснить преимущества и недостатки индивидуальной компенсации реактивной мощности.

Лабораторная работа №3

Тема занятия Изменений напряжения, фликер, несинусоидальность и несимметрия напряжений в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ

Цель занятия. Изучить изменение напряжения фликер, несинусоидальность и несимметрия напряжений в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ.

Теоретическая часть

Отклонения напряжения, размах изменений напряжения, фликер, несинусоидальность и несимметрия напряжений в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ

. Цель работы

Изучить методику оценки уровней напряжения в сети и способы их улучшения на суточном интервале времени.

3.2. Введение

Имеются две основные причины, обуславливающие изменчивость напряжения в электрических сетях: изменчивость нагрузок, вызывающая изменчивость потерь напряжения, и регулирование напряжения с целью поддержания его в заданных пределах.

Уровни напряжения принято оценивать отклонениями напряжения от номинального V [1], которые также изменчивы во времени по указанным выше причинам.

Наилучшим напряжением на зажимах электроприемников, с точки зрения технико-экономической эффективности их работы, является $U(t) = U_n = \text{const}$, т.е. $V=0$. Обеспечить такой режим напряжения для всей массы электроприемников в сети практически невозможно, поэтому всегда $V \neq 0$. Причем чем больше величина V , тем хуже напряжение. Из этого правила имеется ряд исключений, например, для слабо загруженного асинхронного электродвигателя наилучшим является напряжение, меньшее номинального. Величина допустимых значений V нормируется ГОСТ [2] в целом для электрических сетей в зависимости от их напряжения. Наиболее жесткие требования к величине V в ГОСТ предъявляются, естественно, к тем сетям, которые питают основную массу электроприемников (сети до 1000 В).

Таблица 3

Допустимые значения отклонений напряжения по ГОСТ 13109—97

Напряжение сети	Допустимые значения	
	нормальные	максимальные
До 1 кВ	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
6...20 кВ	—	$\pm 10\%$
35 кВ и выше	—	—

Оборудование

Для сетей напряжением до 1000 В с интегральной вероятностью 0,95 допустимы отклонения напряжения $\pm 5\%$, с вероятностью 0,05 допустимы большие отклонения, но они не должны превышать $\pm 10\%$.

Оценку максимальных отклонений напряжения обычно проводят для режимов максимальных и минимальных нагрузок с помощью построения диаграммы отклонений напряжения в сети.

Для моделируемой сети расчетная схема и диаграмма V показаны на рис. 6.

На этом рисунке:

$V_{\text{цп}}$ — отклонения напряжения в центре питания;

ΔU_1 — потеря напряжения в воздушной линии 110 кВ, питающей трансформатор ГПП;

V_0 — отклонение напряжения на линии раздела балансовой принадлежности сетей энергоснабжающей организации и сетей потребителя электроэнергии;

V_1 — отклонение напряжения на шинах РУ 10 кВ ГПП;

ΔU_2 – потеря напряжения в трансформаторе ГПП;
 E_1 – добавка напряжения трансформатора ГПП;
 ΔU_3 – потеря напряжения в кабельной линии, питающей трансформатор Т4 цеховой ТП;
 E_2 – добавка напряжения трансформатора цеховой ТП;
 V_2 – отклонение напряжения на шинах РУ 380 / 220 В цеховой ТП;
 ΔU_4 – потеря напряжения в цеховой сети (например, в шинной магистрали ШМ);
 V_3 – отклонение напряжения в сети в точке присоединения наиболее удаленного электроприемника.

В условиях эксплуатации все потребители рассчитывают требуемые значения V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок с учетом своих средств регулирования напряжения. Если энергоснабжающая организация не выдерживает эти значения, то к ней предъявляются экономические санкции. Поэтому выполнение настоящей лабораторной работы ориентировано на исследование отклонений напряжения в промышленной электросети, проводимое с целью решения данной задачи – расчет требуемых значений V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

Потеря напряжения в элементе сети с сопротивлением $z=R+jX$ и током $\dot{I} = I' - jI''$ определяются по формуле

$$\Delta U = \frac{I'R + I''X}{U_H} 100\%$$

Все необходимые параметры элементов моделируемой сети приведены в табл.1, а параметры трансформатора Т2 рассчитаны в п.1.3.1. лабораторной работы №1.

3.3. задание)

3.3.1. Подготовить установку к работе:

- 1) для измерения напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 380 / 220 В цеховой ТП в суточном цикле времени подключить самопишущие приборы в соответствии со схемой рис 2;
- 2) включить питание установки и трансформатор Т4, отключить Т3, включить обобщенную нагрузку на шинах 10 кВ S_1 , включить СД, отключить конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3 и фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ;
- 3) переключатель анцапф трансформатора Т2 и переключатель ПБВ трансформатора Т4 установить в нулевое положение;
- 4) переключатель задания уровня напряжения в сети 110 кВ установить в положение, указанное преподавателем.

3.3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков $U(t)$ на шинах 10 кВ ГПП и на шинах 380 / 220 В цеховой ТП на суточном цикле времени с помощью самопишущих приборов. При невозможности использовать самопишущие приборы провести регистрацию графиков $U(t)$ по щитовым приборам.

3.3.3. Обработать результаты измерений:

- 1) построить графики $V(t)$ для шин 10 кВ ГПП и для шин 380/220 В цеховой ТП;
- 2) построить гистограммы отклонений напряжения и вычислить их средние значения и дисперсии.

3.3.4. Проанализировать полученные результаты. Определить оптимальную ступень ПБВ трансформатора Т4 и разработать график переключения анцапф РПН трансформатора Т2. При этом возможность регулирования напряжения с помощью КБ в данной работе не учитывать.

3.3.5. Установить переключателем, расположенным на лицевой панели, необходимую ступень ПБВ трансформатора Т4 и на наборном поле с помощью переключателя программу переключения анцапф РПН трансформатора Т2. Подключить и подготовить к работе самопишущие приборы.

3.3.6. Запустить установку и провести регистрацию напряжений на суточном цикле аналогично п.4.3.2.

3.3.7. Обработать результаты измерений в соответствии с п.4.3.3. и оценить соответствие напряжения в моделируемой сети требованиям ГОСТ $\sqrt{2}\%$.

3.3.8. По полученным в пункте 4.3.7. результатам построить для режимов максимальных и минимальных нагрузок диаграммы отклонений напряжения для моделируемой сети (аналогично рис.4.1). Отклонения V_1 и V_2 определяются при этом экспериментально, V_0 — расчетным путем по формуле (4.1). Так как на модели не представлена цеховая сеть 380/220 В (ШМ на рис.5), то потери в этой сети (ΔU_4) не учитываются и V_3 не оценивается.

3.3.9. Приняв для шин 380/220 В цеховой ТП допустимые значения отклонений $V^{(+)}_{2\text{ доп}} = 5\%$, $V^{(-)}_{2\text{ доп}} = 0$, определить соответствующие отклонения V_0 , которые должна обеспечить энергоснабжающая организация на линии раздела балансовой принадлежности сетей для режимов максимума и минимума нагрузок.

Принять время максимума с 8 до 12 часов утра, минимума – с 2 до 5 часов ночи. При этом необходимо помнить, что в реальной практике расчета требуемых значений V_0 необходим учет работы компенсирующих устройств, что в настоящей лабораторной работе не производится для упрощения ее выполнения и еще в связи с тем, что вопросы компенсации реактивных нагрузок рассматриваются в следующей лабораторной работе.

Содержание отчета 3.3.10. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задач исследований;
- результаты оценки отклонений напряжений в моделируемой сети по п.4.3.3.;
- суточный график переключения анцапф трансформатора Т2;
- результаты по п.4.3.7, полученные после реализации мероприятий;
- напряжения по п.4.3.8 и 4.3.9;
- выводы по работе.

3.4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

- 1) повторение теоретического материала $\swarrow 1 \searrow$;
- 2) подготовка к ответам на контрольные вопросы;
- 3) расчет потерь напряжения в трансформаторе Т2 для режимов максимальных и минимальных нагрузок, необходимых для выполнения п.4.3.8 и 4.3.9 задания.

3.5. Контрольные вопросы

3.5.1. Какие допускаются отклонения напряжения в промышленных электросетях по ГОСТ 13109—97 и почему?

3.5.2. Как зависит работа различных электроприемников от величины напряжения в сети?

3.5.3. Какие способы улучшения напряжения используются в промышленных электросетях и в сетях энергосистем?

3.5.4. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для простейшей сети с сопротивлением $R+jX$ и током $I-jI^p$.

3.5.5. Какие имеются оценки отклонений напряжения и как они вычисляются?

Лабораторная работа № 4

Тема занятия Регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях.

Цель занятия. Приобрести навыки регулирования уровней напряжения в промышленных электросетях.

Теоретическая часть

Исследование и регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях

4.1. Цель работы

Изучить методику оценки уровней напряжения в сети и способы их улучшения на суточном интервале времени.

4.2. Введение

Имеются две основные причины, обуславливающие изменчивость напряжения в электрических сетях: изменчивость нагрузок, вызывающая изменчивость потерь напряжения, и регулирование напряжения с целью поддержания его в заданных пределах.

Уровни напряжения принято оценивать отклонениями напряжения от номинального V [1], которые также изменчивы во времени по указанным выше причинам.

Оборудование

Наилучшим напряжением на зажимах электроприемников, с точки зрения технико-экономической эффективности их работы, является $U(t) = U_n = \text{const}$, т.е. $V=0$. Обеспечить такой режим напряжения для всей массы электроприемников в сети практически

невозможно, поэтому всегда $V \neq 0$. Причем чем больше величина V , тем хуже напряжение. Из этого правила имеется ряд исключений, например, для слабо загруженного асинхронного электродвигателя наилучшим является напряжение, меньшее номинального. Величина допустимых значений V нормируется ГОСТ [2] в целом для электрических сетей в зависимости от их напряжения. Наиболее жесткие требования к величине V в ГОСТ предъявляются, естественно, к тем сетям, которые питают основную массу электроприемников (сети до 1000 В).

Таблица 4

Допустимые значения отклонений напряжения по ГОСТ 13109—97

Напряжение сети	Допустимые значения	
	нормальные	максимальные
До 1 кВ	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
6...20 кВ	—	$\pm 10\%$
35 кВ и выше	—	—

Для сетей напряжением до 1000 В с интегральной вероятностью 0,95 допустимы отклонения напряжения $\pm 5\%$, с вероятностью 0,05 допустимы большие отклонения, но они не должны превышать $\pm 10\%$.

Оценку максимальных отклонений напряжения обычно проводят для режимов максимальных и минимальных нагрузок с помощью построения диаграммы отклонений напряжения в сети.

Для моделируемой сети расчетная схема и диаграмма V показаны на рис. 6.

На этом рисунке:

$V_{\text{цп}}$ – отклонения напряжения в центре питания;

ΔU_1 – потеря напряжения в воздушной линии 110 кВ, питающей трансформатор ГПП;

V_0 – отклонение напряжения на линии раздела балансовой принадлежности сетей энергоснабжающей организации и сетей потребителя электроэнергии;

V_1 – отклонение напряжения на шинах РУ 10 кВ ГПП;

ΔU_2 – потеря напряжения в трансформаторе ГПП;

E_1 – добавка напряжения трансформатора ГПП;

ΔU_3 – потеря напряжения в кабельной линии, питающей трансформатор Т4 цеховой ТП;

E_2 – добавка напряжения трансформатора цеховой ТП;

V_2 – отклонение напряжения на шинах РУ 380 / 220 В цеховой ТП;

ΔU_4 – потеря напряжения в цеховой сети (например, в шинной магистрали ШМ);

V_3 – отклонение напряжения в сети в точке присоединения наиболее удаленного электроприемника.

В условиях эксплуатации все потребители рассчитывают требуемые значения V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок с учетом своих средств регулирования напряжения. Если энергоснабжающая организация не выдерживает эти значения, то к ней предъявляются экономические санкции. Поэтому выполнение настоящей лабораторной работы ориентировано на исследование отклонений напряжения в промышленной электросети, проводимое с целью решения данной задачи – расчет требуемых значений V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

Потеря напряжения в элементе сети с сопротивлением $z=R+jX$ и током $\dot{I} = I' - jI''$ определяются по формуле

$$\Delta U = \frac{I'R + I''X}{U_N} 100\%$$

Все необходимые параметры элементов моделируемой сети приведены в табл.1, а параметры трансформатора Т2 рассчитаны в п.1.3.1. лабораторной работы №1.

4.3 (задание)

4.3.1. Подготовить установку к работе:

5) для измерения напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 380 / 220 В цеховой ТП в суточном цикле времени подключить самопишущие приборы в соответствии со схемой рис 2;

6) включить питание установки и трансформатор Т4, отключить Т3, включить обобщенную нагрузку на шинах 10 кВ S_1 , включить СД, отключить конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3 и фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ;

7) переключатель анцапф трансформатора Т2 и переключатель ПБВ трансформатора Т4 установить в нулевое положение;

8) переключатель задания уровня напряжения в сети 110 кВ установить в положение, указанное преподавателем.

4.3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков $U(t)$ на шинах 10 кВ ГПП и на шинах 380 / 220 В цеховой ТП на суточном цикле времени с помощью самопишущих приборов. При невозможности использовать самопишущие приборы провести регистрацию графиков $U(t)$ по щитовым приборам.

Содержание отчета 4.3.3. Обработать результаты измерений:

3) построить графики $V(t)$ для шин 10 кВ ГПП и для шин 380/220 В цеховой ТП;

4) построить гистограммы отклонений напряжения и вычислить их средние значения и дисперсии.

4.3.4. Проанализировать полученные результаты. Определить оптимальную ступень ПБВ трансформатора Т4 и разработать график переключения анцапф РПН трансформатора Т2. При этом возможность регулирования напряжения с помощью КБ в данной работе не учитывать.

4.3.5. Установить переключателем, расположенным на лицевой панели, необходимую ступень ПБВ трансформатора Т4 и на наборном поле с помощью переключателей программу переключения анцапф РПН трансформатора Т2. Подключить и подготовить к работе самопишущие приборы.

4.3.6. Запустить установку и провести регистрацию напряжений на суточном цикле аналогично п.4.3.2.

4.3.7. Обработать результаты измерений в соответствии с п.4.3.3. и оценить соответствие напряжения в моделируемой сети требованиям ГОСТ $\sqrt{2}$.

4.3.8. По полученным в пункте 4.3.7. результатам построить для режимов максимальных и минимальных нагрузок диаграммы отклонений напряжения для моделируемой сети (аналогично рис.4.1). Отклонения V_1 и V_2 определяются при этом экспериментально, V_0 — расчетным путем по формуле (4.1). Так как на модели не представлена цеховая сеть 380/220 В (ШМ на рис.5), то потери в этой сети (ΔU_4) не учитываются и V_3 не оценивается.

4.3.9. Приняв для шин 380/220 В цеховой ТП допустимые значения отклонений $V^{(+)}_{2\text{ доп}} = 5\%$, $V^{(-)}_{2\text{ доп}} = 0$, определить соответствующие отклонения V_0 , которые должна обеспечить энергоснабжающая организация на линии раздела балансовой принадлежности сетей для режимов максимума и минимума нагрузок.

Принять время максимума с 8 до 12 часов утра, минимума — с 2 до 5 часов ночи. При этом необходимо помнить, что в реальной практике расчета требуемых значений V_0 необходим учет работы компенсирующих устройств, что в настоящей лабораторной работе не производится для упрощения ее выполнения и еще в связи с тем, что вопросы компенсации реактивных нагрузок рассматриваются в следующей лабораторной работе.

Содержание отчета

4.3.10. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задач исследований;
- результаты оценки отклонений напряжений в моделируемой сети по п.4.3.3.;
- суточный график переключения анцапф трансформатора Т2;
- результаты по п.4.3.7, полученные после реализации мероприятий;
- напряжения по п.4.3.8 и 4.3.9;
- выводы по работе.

4.4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

4) повторение теоретического материала $\sqrt{1}$;

5) подготовка к ответам на контрольные вопросы;

6) расчет потерь напряжения в трансформаторе Т2 для режимов максимальных и минимальных нагрузок, необходимых для выполнения п.4.3.8 и 4.3.9 задания.

4.5. Контрольные вопросы

4.5.1. Какие допускаются отклонения напряжения в промышленных электросетях по ГОСТ 13109—97 и почему?

4.5.2. Как зависит работа различных электроприемников от величины напряжения в сети?

4.5.3. Какие способы улучшения напряжения используются в промышленных электросетях и в сетях энергосистем?

4.5.4. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для простейшей сети с сопротивлением $R+jX$ и током $I-jI^p$.

4.5.5. Какие имеются оценки отклонений напряжения и как они вычисляются?

Лабораторная работа № 5

Тема занятия Регулирование потерь по электропитанию в промышленных электросетях.

Цель занятия. Приобрести навыки регулирования потерь по электропитанию в промышленных электросетях

Теоретическая часть

Исследование и регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях

6.1. Цель работы

Изучить методику оценки уровней напряжения в сети и способы их улучшения на суточном интервале времени.

6.2. Введение

Имеются две основные причины, обуславливающие изменчивость напряжения в электрических сетях: изменчивость нагрузок, вызывающая изменчивость потерь напряжения, и регулирование напряжения с целью поддержания его в заданных пределах.

Уровни напряжения принято оценивать отклонениями напряжения от номинального V [1], которые также изменчивы во времени по указанным выше причинам.

Оборудование

Наилучшим напряжением на зажимах электроприемников, с точки зрения технико-экономической эффективности их работы, является $U(t)=U_n=const$, т.е. $V=0$. Обеспечить такой режим напряжения для всей массы электроприемников в сети практически невозможно, поэтому всегда $V \neq 0$. Причем чем больше величина V , тем хуже напряжение. Из этого правила имеется ряд исключений, например, для слабо загруженного асинхронного электродвигателя наилучшим является напряжение, меньшее номинального. Величина допустимых значений V нормируется ГОСТ [2] в целом для электрических сетей в зависимости от их напряжения. Наиболее жесткие требования к величине V в ГОСТ предъявляются, естественно, к тем сетям, которые питают основную массу электроприемников (сети до 1000 В).

Таблица 6

Допустимые значения отклонений напряжения по ГОСТ 13109—97

Напряжение сети	Допустимые значения	
	нормальные	максимальные
До 1 кВ	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
6...20 кВ	—	$\pm 10\%$
35 кВ и выше	—	—

Для сетей напряжением до 1000 В с интегральной вероятностью 0,95 допустимы отклонения напряжения $\pm 5\%$, с вероятностью 0,05 допустимы большие отклонения, но они не должны превышать $\pm 10\%$.

Оценку максимальных отклонений напряжения обычно проводят для режимов максимальных и минимальных нагрузок с помощью построения диаграммы отклонений напряжения в сети.

Для моделируемой сети расчетная схема и диаграмма V показаны на рис. 6.

На этом рисунке:

$V_{\text{цп}}$ – отклонения напряжения в центре питания;

ΔU_1 – потеря напряжения в воздушной линии 110 кВ, питающей трансформатор ГПП;

V_0 – отклонение напряжения на линии раздела балансовой принадлежности сетей энергоснабжающей организации и сетей потребителя электроэнергии;

V_1 – отклонение напряжения на шинах РУ 10 кВ ГПП;

ΔU_2 – потеря напряжения в трансформаторе ГПП;

E_1 – добавка напряжения трансформатора ГПП;

ΔU_3 – потеря напряжения в кабельной линии, питающей трансформатор Т4 цеховой ТП;

E_2 – добавка напряжения трансформатора цеховой ТП;

V_2 – отклонение напряжения на шинах РУ 380 / 220 В цеховой ТП;

ΔU_4 – потеря напряжения в цеховой сети (например, в шинной магистрали ШМ);

V_3 – отклонение напряжения в сети в точке присоединения наиболее удаленного электроприемника.

В условиях эксплуатации все потребители рассчитывают требуемые значения V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок с учетом своих средств регулирования напряжения. Если энергоснабжающая организация не выдерживает эти значения, то к ней предъявляются экономические санкции. Поэтому выполнение настоящей лабораторной работы ориентировано на исследование отклонений напряжения в промышленной электросети, проводимое с целью решения данной задачи – расчет требуемых значений V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

Потеря напряжения в элементе сети с сопротивлением $z=R+jX$ и током $\dot{I} = I' - jI''$ определяются по формуле

$$\Delta U = \frac{I'R + I''X}{U_n} 100\%$$

Все необходимые параметры элементов моделируемой сети приведены в табл.1, а параметры трансформатора Т2 рассчитаны в п.1.3.1. лабораторной работы №1.

6.3 (задание)

6.3.1. Подготовить установку к работе:

9) для измерения напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 380 / 220 В цеховой ТП в суточном цикле времени подключить самопишущие приборы в соответствии со схемой рис 2;

10) включить питание установки и трансформатор Т4, отключить Т3, включить обобщенную нагрузку на шинах 10 кВ S_1 , включить СД, отключить конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3 и фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ;

11) переключатель анцапф трансформатора Т2 и переключатель ПБВ трансформатора Т4 установить в нулевое положение;

12) переключатель задания уровня напряжения в сети 110 кВ установить в положение, указанное преподавателем.

4.3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков $U(t)$ на шинах 10 кВ ГПП и на шинах 380 / 220 В цеховой ТП на суточном цикле времени с помощью самопишущих приборов. При невозможности использовать самопишущие приборы провести регистрацию графиков $U(t)$ по щитовым приборам.

Содержание отчета 4.3.3. Обработать результаты измерений:

5) построить графики $V(t)$ для шин 10 кВ ГПП и для шин 380/220 В цеховой ТП;

6) построить гистограммы отклонений напряжения и вычислить их средние значения и дисперсии.

6.3.4. Проанализировать полученные результаты. Определить оптимальную ступень ПБВ трансформатора Т4 и разработать график переключения анцапф РПН трансформатора Т2. При этом возможность регулирования напряжения с помощью КБ в данной работе не учитывать.

6.3.5. Установить переключателем, расположенным на лицевой панели, необходимую ступень ПБВ трансформатора Т4 и на наборном поле с помощью переключателей программу переключения анцапф РПН трансформатора Т2. Подключить и подготовить к работе самопишущие приборы.

6.3.6. Запустить установку и провести регистрацию напряжений на суточном цикле аналогично п.4.3.2.

6.3.7. Обработать результаты измерений в соответствии с п.4.3.3. и оценить соответствие напряжения в моделируемой сети требованиям ГОСТ $\angle 2 \searrow$.

6.3.8. По полученным в пункте 4.3.7. результатам построить для режимов максимальных и минимальных нагрузок диаграммы отклонений напряжения для моделируемой сети (аналогично рис.4.1). Отклонения V_1 и V_2 определяются при этом экспериментально, V_0 — расчетным путем по формуле (4.1). Так как на модели не представлена цеховая сеть 380/220 В (ШМ на рис.5), то потери в этой сети (ΔU_4) не учитываются и V_3 не оценивается.

6.3.9. Приняв для шин 380/220 В цеховой ТП допустимые значения отклонений $V^{(+)}_{2\text{ доп}} = 5\%$, $V^{(-)}_{2\text{ доп}} = 0$, определить соответствующие отклонения V_0 , которые должна обеспечить энергоснабжающая организация на линии раздела балансовой принадлежности сетей для режимов максимума и минимума нагрузок.

Принять время максимума с 8 до 12 часов утра, минимума — с 2 до 5 часов ночи. При этом необходимо помнить, что в реальной практике расчета требуемых значений V_0 необходим учет работы компенсирующих устройств, что в настоящей лабораторной работе не производится для упрощения ее выполнения и еще в связи с тем, что вопросы компенсации реактивных нагрузок рассматриваются в следующей лабораторной работе.

Содержание отчета

6.3.10. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задач исследований;
- результаты оценки отклонений напряжений в моделируемой сети.;
- суточный график переключения анцапф трансформатора Т2;
- результаты, полученные после реализации мероприятий;
- напряжения;
- выводы по работе.

6.4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в следующем:

- 7) повторение теоретического материала $\angle 1 \searrow$;
- 8) подготовка к ответам на контрольные вопросы;
- 9) расчет потерь напряжения в трансформаторе Т2 для режимов максимальных и минимальных нагрузок,.

6.5. Контрольные вопросы

6.5.1. Какие допускаются отклонения напряжения в промышленных электросетях по ГОСТ 13109—97 и почему?

6.5.2. Как зависит работа различных электроприемников от величины напряжения в сети?

6.5.3. Какие способы улучшения напряжения используются в промышленных электросетях и в сетях энергосистем?

6.5.4. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для простейшей сети с сопротивлением $R+jX$ и током $I-jI''$.

6.5.5. Какие имеются оценки отклонений напряжения и как они вычисляются?

Лабораторная работа №5

Тема занятия Выбор параметров основного электрооборудования и нагрузочная способность.

Цель занятия. Приобрести навыки выполнения расчета электрических нагрузок в электроустановках напряжением выше 1 кВ методом упорядоченных диаграмм.

Теоретическая часть

Исследование помех по электропитанию в промышленных электросетях

5.1. Цель работы

Исследование провалов напряжения в промышленных электросетях, являющихся помехами по электропитанию для цифровых технических средств.

5.2. Введение

В ГОСТ [2] установлены новые показатели качества электроэнергии, характеризующие кратковременные искажения напряжения в сети, возникающие при различных переходных процессах. Это вызвано тем, что кратковременные искажения напряжения являются помехами по электропитанию в наибольшей степени для цифровых технических средств (ЦТС) [3]. Все помехи по электропитанию принято делить на два вида: длительные (провалы и выбросы напряжения длительностью от единиц миллисекунд до нескольких секунд) и импульсные – коммутационные перенапряжения длительностью, измеряемой миллисекундами и микросекундами.

Оборудование

В данной лабораторной работе исследуются только провалы напряжения, для которых ГОСТ [2] устанавливает следующие параметры:

Δt — длительность провала напряжения, с; ΔU — глубина провала напряжения, %.

Причины возникновения провалов напряжения в электрических сетях предприятий рассмотрены в работе [3]. Все множество этих причин можно разделить на два вида. Первый – провалы напряжения «приходящие» из сетей энергосистемы, второй — провалы, вызываемые явлениями в электросетях предприятия (пиковые нагрузки, аварийные переключения и др).

Техника безопасности

В лабораторной установке смоделированы оба указанных вида провалов. Причем провал второго вида вызывается пиковой нагрузкой на стороне 0,4 кВ цеховой ТП и обусловлен потерей напряжения от пиковой нагрузки на сопротивлении трансформатора 10/0,4 кВ.

В лабораторной работе необходимо с помощью электронного осциллографа определить время провалов напряжения, их глубину и длительность, а также среди зафиксированных провалов выделить провалы первого и второго вида. Глубина ΔU провалов второго вида может быть уменьшена при параллельной работе трансформатора Т3 и Т4.

5.3. (задание)

5.3.1. Включить питание лабораторного стенда, включить нагрузку S_1 , отключить трансформатор Т3. Остальные элементы мнемосхемы могут быть в любом состоянии (включено или выключено). Подключить электронный осциллограф для контроля напряжения на шинах 0,4 кВ цеховой ТП (рис.2). Настроить осциллограф таким образом, чтобы можно было оценить глубину и длительность провала наблюдаемого на экране напряжения.

5.3.2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и, внимательно наблюдая на экране осциллографа за исследуемым напряжением, зафиксировать провалы напряжения (время, глубину, длительность). Проанализировать результаты наблюдений, выявив среди зафиксированных провалов те, которые вызваны пиковой нагрузкой в сети 0,4 кВ цеховой ТП.

5.3.3. Включить трансформатор Т3 на параллельную работу с трансформатором Т4 и повторить эксперимент в соответствии с п.5.3.2. Оценить степень уменьшения глубины провалов напряжения, обусловленных пиковой нагрузкой в сети 0,4 кВ.

Содержание отчета

5.3.4. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- формулировку задачи лабораторного исследования;
- результаты наблюдений по пп.5.3.2 и 5.3.3 в форме таблицы с указанием времени посадки, ее длительности и глубины, а также вида (первый и второй);
- выводы по работе.

5.4. Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в изучении теоретического материала по литературе [3] и в подготовке ответов на контрольные вопросы.

5.5. Контрольные вопросы

5.5.1. Каковы причины провалов напряжения в промышленных электросетях?

5.5.2. Опишите механизм воздействия провалов напряжения на ЦТС.

- 5.5.3. Какими путями можно обеспечить устойчивость ЦТС к провалам напряжения?
- 5.5.4. Какие нормы на провалы напряжения установлены в ГОСТ 13109-97 [2]?

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка является физической моделью системы электроснабжения промышленного предприятия (СЭПП) и предназначена для учебной работы студентов. На установке моделируется суточный цикл работы типовой СЭПП.

Мнемосхема установки, приведенная на ее лицевой панели, включает следующие элементы типовой СЭПП (рис.1):

1) главную понизительную подстанцию (ГПП) 110/10 кВ, состоящую из трансформаторов Т1, Т2 номинальной мощностью по 10000 кВА и распределительного устройства (РУ) 10 кВ. Имеется возможность ручного или автоматического по времени суток переключения анцаф РПН трансформатора Т2;

2) цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ, состоящую из трансформаторов Т3 и Т4 номинальной мощностью по 1000 кВА. Трансформатор Т4 оснащен устройством переключения отпаяк без возбуждения (ПБВ);

3) синхронный двигатель СДН-10-1250, имеющий ручную регулировку возбуждения;

4) батареи силовых конденсаторов на номинальное напряжение 10,5 кВ (БК1 и БК2) и на напряжение 0,4 кВ (БК3). Имеется возможность ручного или автоматического по времени суток включения и отключения батареи. Мощность батарей задается тумблерами, расположенными под их мнемосимволами на схеме;

5) силовой пункт СП в цеховой сети 380/220 В, к которому подключена нелинейная нагрузка S_3 , вызывающая появление на шинах СП высших гармоник напряжения;

6) фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ, предназначенное для уменьшения уровня высших гармоник напряжения на шинах СП.

На мнемосхеме размещены следующие измерительные приборы:

V_1 — щитовой киловольтметр для измерения напряжения с высокой стороны трансформатора ГПП Т2 (на линии раздела балансовой принадлежности сетей);

V_2 — киловольтметр для контроля напряжения на шинах РУ 10 кВ;

V_3 — вольтметр для контроля напряжения на шинах РУ 380/220 В цеховой ТП;

V_4 — вольтметр для контроля напряжения на шинах 220 В СП.

$СП$ — универсальный самопишущий прибор, клеммы подключения которого выведены на гнезда «Измерит. приборы», размещенные на лицевой панели установки;

$A_1 - A_3$ — щитовые амперметры, служащие для контроля токов в моделируемой сети.

Параметры моделируемых элементов приведены в табл. I.

График нагрузки S_2 цеховой ТП моделируется близким к реальному. Он программно задан и всегда один и тот же для конкретной установки (на разных установках графики S_2 отличаются).

Остальные (по отношению к приведенной на мнемосхеме цеховой ТП) потребители 10 кВ ГПП представлены обобщенной нагрузкой S_1 , график которой задается жесткой программой. Нагрузка синхронного двигателя, подключенного к шинам 10 кВ ГПП, неизменна во времени.

В моделируемой сети 0,4/0,23 кВ представлен на мнемосхеме один из силовых пунктов СП с нелинейной нагрузкой (однофазный выпрямитель), которая обуславливает наличие в напряжении на шинах СП высших гармоник напряжения. Для компенсации этих гармоник установлено фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ, подключение которого производится тумблером, расположенным на лицевой панели. На лицевую панель выведены также клеммы для измерения напряжения на шинах СП, а также токов в НН и ФКУ.

Все органы управления установкой расположены на лицевой панели. В нижнем правом углу панели установлен автомат включения питания. У изображения коммутационных аппаратов установлены кнопки включения (черная кнопка) и отключения (красная кнопка) этих аппаратов. Сигнальные лампы показывают состояние коммутационного аппарата. Измерительные приборы, размещенные на лицевой панели, служат для измерения токов в линиях и напряжений на шинах 10,5 кВ и 0,4 кВ. Активная и реактивная энергия в цепях Т2

и Т4 измеряются индукционными счетчиками, установленными внутри стенда. Счетчики снабжены датчиками числа оборотов их дисков. Рядом с мнемосимволом трансформатора Т2 расположены кнопки переключения анцапф трансформатора и сигнальные лампы.

Таблица 1

Параметры элементов системы электроснабжения, моделируемой на лабораторной установке

Обозначение на мнемосхеме (рис.1.1)	Тип	Номинальное напряжение	Параметры
Т1, Т2	ТДН – 10000/110	115/11	$S_H = 10000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 27$ кВт, $\Delta P_{кз} = 74$ кВт, $U_K = 10,5\%$, $I_{xx} = 0,9\%$; Ступени РПН: +5 %, +2,5%, 0, -2,5%, -5%
Т3, Т4	ТМЗ-1000/10	10/0,4	$S_H = 1000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 2,4$ кВт, $\Delta P_{кз} = 12,2$ кВт, $U_K = 5,5\%$, $I_{xx} = 2\%$; $T_o = 1,5$ ч, $V_{\mu} = 55^{\circ}\text{C}$; Ступени ПБВ: +5%, +2,5%, 0, -2,5%, -5%
БК1 БК2		10/5	$Q_H = 4 \times 350 = 1400$ кВАр (каждая батарея имеет 4 ступени по 350 кВАр) $\Delta P_o = 0,0025 \frac{\text{кВт}}{\text{кВАр}}$
БК3	УКЛ-0,38	0,4	$Q_H = 210 + 105 + 42 + 3 \cdot 21 = \text{кВАр}$; $\Delta P_o = 0,0045$ кВАр
Кабель питающий Т4	АСБ – 10(3·50)	10,5	$I_{\partial\partial} = 140$ А; $R_o = 0,62$ Ом/км; $X_o = 0,04$ Ом/км; $l = 1$ км; $T_o = 15$ мин; $V_{\partial\partial} = 45^{\circ}\text{C}$
СД	СДН-10-1250	10	$P_H = 1250$ кВт; $\cos \psi_H = 0,9$; $K_3 = 0,8$; $D_1 = 6,77$ кВт; $D_2 = 6,98$ кВт
ФКУ		0,4	Фильтр 3-ей гармоники

Тумблеры «Мощность БК» и переключатель »Реактивная мощность СД» предназначены для задания величины генерируемой

реактивной мощности конденсаторных батарей и синхронного двигателя соответственно (мощность указана в кВАр). Переключателем «Отпайкм Т4» производится установка отпайки трансформатора Т4. В центральной части лицевой панели расположены органы управления режимами работы всей установки: кнопка «Пуск» – для запуска установки в работу; кнопка «Сброс» – для возврата установки в работу; кнопка «Остановка» – фиксирование какого-либо режима установки; цифровое табло для контроля модельного времени суток. Коммутационное поле, расположенное в правом верхнем углу, предназначено для задания автоматического режима работы элементов схемы. В лабораторной установке возможно автоматическое по времени суток переключение анцапф трансформатора Т2, а также включение и отключение трансформатора Т3 и конденсаторных, батарей БК1, БК2, БК3.

Лабораторная установка имеет два режима работы:

1. При включении питания – режим подготовки (исходный режим). В этом режиме задаются начальные условия (включение и отключение соответствующих элементов системы); устанавливается программа работы по времени суток устройства РПН трансформатора Т2; трансформатора Т3 конденсаторных батарей БК1, БК2, БК3 (на коммутационном поле). Подключаются и настраиваются необходимые измерительные приборы, а также проверяется готовность установки к «прогонке» суточного цикла.

2. При нажатии кнопки «Пуск» включается процесс моделирования нагрузок суточного цикла. Загорается цифра 0I на цифровом табло, и происходит подача питания на моделируемую схему, которая до этого была обесточена.

Суточный цикл работы системы электроснабжения моделируется за 12 мин (1 час реальной системы за 30 с установки). Модельное время суток в часах показывается на цифровом табло.

По окончании суточного цикла установка автоматически возвращается в исходный режим. При необходимости установку можно вернуть в исходный режим принудительным нажатием «Сброс». Кнопкой «Остановка» останавливается программа моделирования суточного цикла.

Шкалы всех амперметров и вольтметров на лицевой панели стенда проградуированы в действительных величинах. Эти приборы используются для визуального контроля параметров режима моделируемой системы.

Для проведения необходимых измерений при выполнении лабораторных работ имеется самопишущий прибор СП. Схема подключения измерительных трансформаторов тока, напряжения и самопишущего прибора показана на рис.2. Гнезда «Измерительная аппаратура» (ИА) расположены на лицевой панели установки.

Масштабы всех величин приведены в табл.2.

При выполнении ряда измерений используется дополнительная аппаратура (осциллограф, измеритель нелинейных искажений и др.). Устройство и работа этой аппаратуры изучаются в соответствующих лабораторных работах.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

1. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- прикасаться к вращающимся частям электрических машин;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование или приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

2. Проверку наличия подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности. При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

Таблица 2
Масштабы модели

Наименование		Обозначение	Единица измерения	Числовые значения
Масштабы модели		μ_t	$\frac{с.действ}{с.модели}$	240
Масштабы счетчиков электроэнергии	Wh1	$\mu_{aэ}$	$\frac{кВт \cdot ч}{импульс}$	250
	Varh1 Wh2 Varh2	$\mu_{рэ}$	$\frac{кВар \cdot ч}{импульс}$	
	Wh2	$\mu_{aэ}$	$\frac{кВт \cdot ч}{импульс}$	35(70)
	Varh2	$\mu_{рэ}$	$\frac{кВар \cdot ч}{импульс}$	
Масштабы измерительных трансформаторов напряжения (рис.2)	TH1	μ_u	$\frac{В \cdot действ}{В \cdot модели}$	100
	TH2	μ_u	$\frac{В \cdot действ}{В \cdot модели}$	10
	TH3	μ_u	$\frac{В \cdot действ}{В \cdot модели}$	10
	TT1	μ_I	$\frac{А \cdot действ}{А \cdot модели}$	
	TT2	μ_I	$\frac{А \cdot действ}{В \cdot модели}$	
	TT3	μ_I	$\frac{А \cdot действ}{В \cdot модели}$	
Масштаб блока определения температуры перегрева кабеля (рис.2)	БОТ	μ_V	$\frac{^{\circ}C}{В \cdot модели}$	

Контрольные вопросы

1. Назначение и конструктивное исполнение электрических сетей.
2. Условия пользования и расчета за электроэнергию.
3. Общие требования к выбору и прокладке электрических сетей.
4. Схемы и конструктивные исполнения междоуличных электрических сетей.
5. Схемы и конструктивные исполнения внутридворовых электрических сетей.
6. Защитная аппаратура в сетях до 1 кВ. Основные характеристики.
7. Защитная и коммутационная аппаратура в сетях выше 1000 В. Основные характеристики.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

8.1.1. Перечень основной литературы:

1. Гужов Н. П. , Ольховский В. Я. , Павлюченко Д. А. Системы электроснабжения: учебник/ Гужов Н. П. , Ольховский В. Я. , Павлюченко Д. А. Новосибирск: НГТУ, 2015.– 262 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=438343
2. Соколова, Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование. Общепромышленные механизмы и бытовая техника : учебник/Е,М. Соколова. - 9-е изд., испр.-М.: Академия, 2014. - 224 с.

8.1.2. Перечень дополнительной литературы:

- 1 Смирнов, Ю. А. Физические основы электротехники : учеб, пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2013. - 560 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Библиогр.: с. 558-559. - ISBN 978-5-8114-1369-0
- 2.Акимова, Н. А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования : учебник / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрихин ; под ред. Н.Ф. Котеленца. - 10-е изд., испр. - М. : Академия, 2013. - 304 с. - Прил.: с. 284-295. - Библиогр.. с. 296.

8.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам.
2. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы.

8.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению контрольной работы
по дисциплине «ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

№ п/п	Содержание	Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование контрольных работ	
4.	Список контрольных работ	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	

Введение

Контрольная работа создаёт оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Приемники и потребители электроэнергии в системах электроснабжения». Контрольные работы проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью контрольных работ является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Цель изучения дисциплины

- формирование у студентов систематических знаний по вопросам проектирования и эксплуатации комплексных систем электроснабжения городов и промышленных предприятий.

Задачами дисциплины является:

- Знать взаимосвязи между потребителями и системой электроснабжения; показатели графиков нагрузки электроприемников и потребителей;

- Уметь анализировать графики нагрузки.

- Владеть навыками разработки основных энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения

1. Расчет коэффициента несинусоидальности

1.1. Вентильные преобразователи

В настоящее время самой распространенной схемой выпрямления для мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова), представленная на рис. 1.1, *а*. Эта схема выпрямления позволяет осуществить так называемую шестифазную или шестиимпульсную схему выпрямления. Соединение последовательно или параллельно двух или нескольких выпрямительных мостов при питании их напряжением, сдвинутым на соответствующий угол, позволяет получить 12, 18, 24, 36, 48...-фазные схемы выпрямления (кратные шести). Сдвиг угла напряжения осуществляется применением соответствующих схем соединения первичных или вторичных обмоток трансформатора: Y — звезда, Δ — треугольник, Z — зигзаг, которые позволяют осуществить практически схемы любой фазности (импульсности) выпрямления.

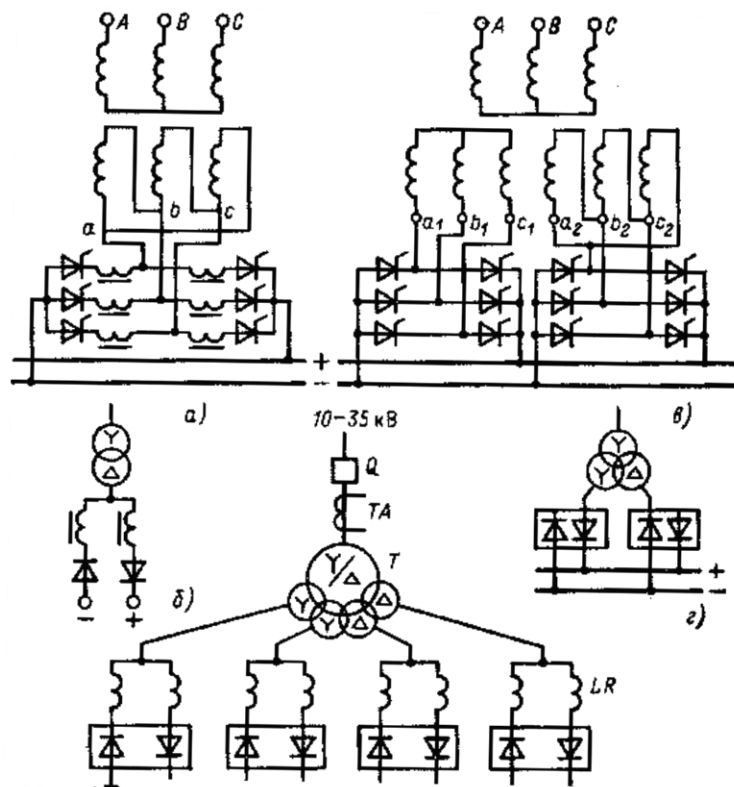


Рис. 1.1. Схемы полупроводниковых преобразовательных агрегатов:

а — агрегат до 6300 А шестифазного режима выпрямления (трехлинейная схема); *б* — однолинейная схема; *в* — трехлинейная схема агрегата 12500 А двенадцати-фазного режима выпрямления; *г* — однолинейная схема; *д* — однолинейная схема агрегата 25 000 А и его коммутационная аппаратура

Первичным является появление в питающей сети коммутационных искажений напряжения, а гармонический анализ их позволяет выявить наличие высших гармоник напряжения. Порядок высших гармоник определяется формулой $n = mk \pm 1$, где m — число фаз выпрямления; $k=0, 1, 2, 3, \dots$ — последовательный ряд натуральных чисел.

Для шестифазной системы напряжения в кривой питающего напряжения имеются высшие гармоники следующего порядка, называемые каноническими: $n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, \dots$; для 12-фазной схемы $n=11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots$; для 24-фазной схемы $n=23, 25, 47, 49, 71, 73$ и т. д.

Методика расчета коэффициента несинусоидальности напряжения k_U основывается на вычислении в любой точке питающей сети действующих значений коммутационных искажений напряжения, что равносильно учету всех высших гармоник. Следовательно, для определения k_U при работе вентильных преобразователей нет необходимости определять уровни отдельных гармоник. При этом удастся избежать ошибки, возникающей при учете только определенного числа высших гармоник.

Методика позволяет вычислять k_U в любой точке питающей сети, используя параметры, полученные при вычислении токов КЗ, и основывается на следующих допущениях: проводимости элементов питающей сети считаются неемкостными. При этом допущении ошибка в расчете не превышает 10—15%. Предполагается, что в узлах сети, расположенных в непосредственной близости от вентильных преобразователей, отсутствуют БК, предназначенные для компенсации реактивной мощности; не учитываются аномальные гармоники.

Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле [2]

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 \quad (1.1)$$

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей может быть определен по формуле [2]

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{\text{пр}}} - 0,91} \quad (1.2)$$

где $x_c = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{кз},6}}$ — эквивалентное сопротивление системы в относительных

единицах, приведенное к мощности преобразователя $S_{\text{пр}}$, т. е. сопротивление от условной точки сети бесконечной мощности до точки сети, в которой определяется k_U ; $S_{\text{кз}}$ — мощность КЗ в точке, в которой определяется k_U ; $x_{\text{пр}}$ — индуктивное сопротивление цепи преобразователя в относительных

единицах, приведенное к $S_{\text{пр}}$, т. е. сопротивление от точки возникновения коммутационных КЗ до точки, в которой определяется k_U .

Формула (1.3) справедлива для преобразователей с любой последовательностью чередования фаз.

Кроме коэффициента несинусоидальности ГОСТ нормирует коэффициенты n-ой гармонической составляющей. Согласно [4]

$$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, \% \quad (1.3)$$

При определении k_U особое внимание следует обращать на $x_{пр}$. Чаще всего требуется определять k_U на шинах питания мощных тиристорных преобразователей. Под преобразователем подразумеваются выпрямительный мост (или их группа) и питающий понижающий трансформатор.

В этом случае $x_{пр}$ равно сопротивлению преобразовательного трансформатора и определяется по формуле [2]

$$x_{пр} = \frac{u_{k\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{ном,Т}} \quad (1.4)$$

где $S_{ном,Т}$ — номинальная мощность преобразовательного трансформатора; k_p — коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора; $u_k \%$ — сквозное напряжение КЗ трансформатора, приведенное к полной номинальной мощности трансформатора.

Для двухобмоточных трансформаторов, применяемых в шестифазных (трехфазных мостовых) схемах выпрямления, $k_p = 0$, трехобмоточных трансформаторов, применяемых в преобразователях, выполненных по двенадцатифазной схеме, в общем виде

$$k_p = \frac{u_{k(НН1-НН2)}}{u_k}$$

где $u_{k(НН1-НН2)}$ — напряжение КЗ между расщепленными вторичными обмотками трансформатора.

В общем случае для трансформаторов с расщепленными обмотками $k_p = 0 \div 4$, если ветви низшего напряжения трансформатора имеют хорошую электромагнитную связь друг с другом, $k_p = 0$; если обмотки НН не имеют магнитной связи друг с другом или преобразователь выполнен по схеме с двумя трансформаторами, имеющими разные схемы соединения, то $K_p = 4$.

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последовательностью чередования фаз выпрямления может быть определено по формуле [2]

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{ном} \frac{x_c}{x_c + x_{пр}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.5)$$

где $\gamma = \frac{3(x_c + x_{пр})}{m \cdot \sin \varphi}$ - угол коммутации, рад.

Действующее значение тока любой гармоники в цепи преобразователя определяется из выражения [2]

$$I_n = \frac{m}{\sqrt{3}\pi} \frac{S_{пр}}{U_{ном} (x_c + x_{пр}) n^2} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.6)$$

При работе группы вентильных преобразователей порядок расчета k_U следующий. По приведенным формулам определяются уровни высших гармоник напряжения для каждого преобразователя.

Одинаковые гармоники напряжения всех преобразователей геометрически суммируются. Затем определяется коэффициент несинусоидальности:

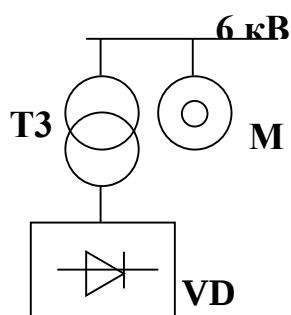
$$k_{U\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^p U_{n\Sigma}^2}}{U_{ном}} 100$$

Особое внимание необходимо обращать на количество учитываемых гармоник, чтобы избежать ошибки в вычислении k_U . Чем больше количество преобразователей и фаз выпрямления, тем большее количество гармоник необходимо учитывать. Предлагается следующая эмпирическая формула:

$$p = n_{max} = 4qm + 1, \quad (1.7)$$

где n_{max} — наибольшая гармоника; q — число работающих преобразователей; m — число фаз выпрямления.

Пример 1. Для вентильного выпрямителя рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 6 кВ.



Исходные данные:

C: $S_{кз,6}=150$ МВА

T3: $S_{T3}=10$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=10,5\%$

VD: $S_{пр}=10$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

M: $P_M=220$ кВт; $\cos \varphi=0,9$; $K_M=1,2$; $K_I=5,1$

Решение: Считаем сопротивление преобразователя по формуле (1.4)

$$x_{пр} = \frac{u_{к\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{T3}} = \frac{10,5}{100} \left(1 + \frac{0}{4}\right) \frac{10}{150} = 0,066$$

где k_p — коэффициент расщепления обмоток (для двухобмоточного трансформатора равен 0)

Сопротивление системы

$$x_c = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{кз},6}} = \frac{10}{150} = 0,067$$

Коэффициент несинусоидальности по упрощенной формуле (1.2)

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{\text{пр}}}} - 0,91 = 100 \cdot 0,067 \sqrt{\frac{0,955 \cdot 0,6}{0,067 + 0,066}} - 0,91 = 12\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 6 кВ составляет 5%. Так как расчетный коэффициент больше допустимого, необходима установка фильтрующих устройств.

Согласно [2] для вентильных преобразователей необходимо учитывать в расчетах только 5, 7, 11, 13 гармоники.

Угол коммутации в радианах

$$\gamma = \frac{3(x_c + x_{\text{пр}})}{m \cdot \sin \varphi} = \frac{3(0,067 + 0,066)}{6 \cdot 0,6} = 0,11 \text{ рад}$$

где m – число фаз преобразователя.

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n -ной гармонической составляющей по (1.5) и (1.3)

$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{\text{НОМ}} \frac{x_c}{x_c + x_{\text{пр}}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma), [\text{kB}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} 100, [\%]$
$U_5 = \frac{6}{\pi \cdot 5} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(5 \cdot 0,11) = 0,36 \text{ kB}$	$k_{U(5)} = \frac{0,36}{6} 100 = 6\%$
$U_7 = \frac{6}{\pi \cdot 7} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(7 \cdot 0,11) = 0,35 \text{ kB}$	$k_{U(7)} = \frac{0,35}{6} 100 = 5,8\%$
$U_{11} = \frac{6}{\pi \cdot 11} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(11 \cdot 0,11) = 0,29 \text{ kB}$	$k_{U(11)} = \frac{0,29}{6} 100 = 4,8\%$
$U_{13} = \frac{6}{\pi \cdot 13} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(13 \cdot 0,11) = 0,26 \text{ kB}$	$k_{U(13)} = \frac{0,26}{6} 100 = 4,3\%$

1.2. Дуговые сталеплавильные печи

Искажения питающего тока и напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей возникают за счет нелинейной характеристики дуги и за счет нелинейной характеристики печного трансформатора, работающего при повышенных значениях магнитной индукции. Уровень высших гармоник тока при работе дуговых сталеплавильных печей сравнительно невелик, особенно по сравнению с высшими гармониками, генерируемыми вентильными преобразователями. Однако с ними следует считаться, так как мощность дуговых печей постоянно растет.

На основании экспериментальных исследований [2] получено соотношение для определения максимальных значений уровней отдельных гармоник тока при работе дуговых печей.

$$I_n = \frac{I_T}{n^2} \quad (1.8)$$

где I_T — ток печного трансформатора в расчетном режиме (для расчета максимальных значений гармоник надо брать в расчет номинальный ток печного трансформатора); $n=2, 3, 4, 5...$ — номер соответствующей гармоники. Из соотношения видно, что достаточно в расчетах учитывать только до 7-й гармоники, так как остальные гармоники малы.

Для группы одинаковых дуговых сталеплавильных печей

$$I_{n,r} = I_n \sqrt[4]{N} \quad (1.9)$$

где N — число печей, одновременно работающих в режиме расплавления.

Для группы печей разной мощности

$$I_{n,r} = I_{n,max} \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{n,Ti} / S_{n,Tmax}} \quad (1.10)$$

где $S_{n,Ti}$ — мощность i -го печного трансформатора; $S_{n,Tmax}$ — наибольшая мощность трансформатора в группе дуговых печей; $I_{n,max}$ — ток n -ой гармоники печного трансформатора наибольшей мощности; N — общее число работающих печей.

Для определения k_U в соответствующей точке сети необходимо определить уровни напряжения отдельных гармоник, генерируемых ДСП. Фазное напряжение гармоники в расчетной точке питающей сети находится из выражения

$$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{ном}^2}{S_K} \quad (1.11)$$

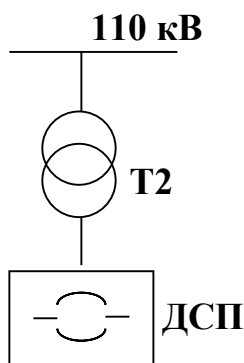
где I_n — действующее значение фазного тока n -ой гармоники; n — порядковый номер гармоники; $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение в расчетной точке; S_K — мощность КЗ в расчетной точке.

Общий коэффициент несинусоидальности в расчетной точке при работе дуговых сталеплавильных печей, %,

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (1.12)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение основной частоты в расчетной точке.

Пример 2. Для дуговой сталеплавильной печи рассчитать коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 110 кВ.



Исходные данные:

С: $S_{кз,110}=2300$ МВА

Т2: $S_{Т2}=60$ МВА; $U_{ном}=110$ кВ

Решение: Считаем номинальный ток печного трансформатора

$$I_T = \frac{S_{Т2}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,31 \text{ кА}$$

Согласно [2] в практических расчетах для дуговых сталеплавильных печей учитываются гармоники со 2-ой по 7-ю.

Токи, напряжения высших гармоник и коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения рассчитываем по формулам (1.8), (1.11) и (1.3), где n – номер гармоники

$I_n = \frac{I_T}{n^2}, [\text{кА}],$	$U_n = \frac{\sqrt{3}I_n n U_{ном}^2}{S_{кз,110}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, [\%]$
$I_2 = \frac{0,31}{2^2} = 0,078 \text{ кА}$	$U_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,078 \cdot 2 \cdot 110^2}{2300} = 1,42 \text{ кВ}$	$k_{U(2)} = \frac{1,42}{110} 100 = 1,3\%$
$I_3 = \frac{0,31}{3^2} = 0,034 \text{ кА}$	$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,034 \cdot 3 \cdot 110^2}{2300} = 0,93 \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{0,93}{110} 100 = 0,85\%$
$I_4 = \frac{0,31}{4^2} = 0,019 \text{ кА}$	$U_4 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,019 \cdot 4 \cdot 110^2}{2300} = 0,7 \text{ кВ}$	$k_{U(4)} = \frac{0,7}{110} 100 = 0,64\%$
$I_5 = \frac{0,31}{5^2} = 0,012 \text{ кА}$	$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,012 \cdot 5 \cdot 110^2}{2300} = 0,55 \text{ кВ}$	$k_{U(5)} = \frac{0,55}{110} 100 = 0,5\%$
$I_6 = \frac{0,31}{6^2} = 0,009 \text{ кА}$	$U_6 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,009 \cdot 6 \cdot 110^2}{2300} = 0,49 \text{ кВ}$	$k_{U(6)} = \frac{0,49}{110} 100 = 0,45\%$
$I_7 = \frac{0,31}{7^2} = 0,006 \text{ кА}$	$U_7 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,006 \cdot 7 \cdot 110^2}{2300} = 0,38 \text{ кВ}$	$k_{U(7)} = \frac{0,38}{110} 100 = 0,35\%$

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 110 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{1,42^2 + 0,93^2 + 0,7^2 + 0,55^2 + 0,49^2 + 0,38^2}}{110} 100 = 1,83\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 110 кВ составляет 2%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 110 кВ не требуется.

1.3. Сварочные установки

По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электросварки переменного тока, установки дуговой электросварки постоянного тока.

Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. Включение сварочных машин контактной электросварки производится с помощью игнитронных или тиристорных ключей, которые для плавного регулирования сварочного тока снабжаются системами фазового регулирования угла зажигания, что приводит к искажению тока высшими гармониками, уровень которых аналогичен уровню гармоник для дуговой сварки переменного тока.

В общем случае для единичной установки электросварки переменного тока токи гармоник (рекомендуется учитывать только третью и пятую гармоники [2]) равны:

$$I_n = S_{\text{ном,т}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}} / (n^2 U_{\text{ном}}) \quad (1.13)$$

где $S_{\text{ном,т}}$ — номинальная мощность трансформатора; $\beta_{\text{св}}$ — коэффициент загрузки; ПВ — продолжительность включения.

Определение токов гармоник, генерируемых установками дуговой электросварки постоянного тока, аналогично определению гармоник для вентильных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5, 7, 11, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле

$$I_n = \frac{I_{\text{св}}}{n} \quad (1.14)$$

где $I_{\text{св}}$ — номинальный первичный ток установки.

Для группы установок электросварки независимо от режима работы суммарные отдельные токи гармоник определяются согласно [2]

$$I_{\text{н,г}} = \sqrt{\sum_i^N I_{\text{ни}}^2} \quad (1.15)$$

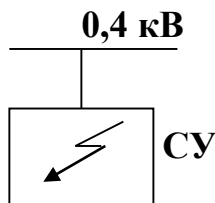
где I_{ni} — ток n -й гармоники i -й установки; N — общее число работающих установок.

Для оценки влияния сварочных нагрузок на сеть предприятия определяется общий коэффициент несинусоидальности по формуле, %,

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=5}^{13} U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad (1.16)$$

где $U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_K}$ - напряжение n -й гармоники.

Пример 3. Для группы сварочных установок переменного тока рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 0,4 кВ.



Исходные данные:

С: $S_{K3,0,4}=2 \text{ МВА}$

СУ: $S_{\text{НОМ}}=30 \text{ кВА}$; $U_{\text{НОМ}}=0,4 \text{ кВ}$; $\text{ПВ}=60\%$; $\beta_{\text{св}}=0,5$; $N=6$

Решение: Согласно [2] в практических расчетах для сварочных установок переменного тока учитываются 3 и 5 гармоники.

Токи высших гармоник для группы сварочных установок рассчитываем по формулам (1.13) и (1.15), где n – номер гармоники

$I_n = \frac{S_{\text{НОМ}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}}}{n^2 U_{\text{НОМ}}}$	$I_{n,\Gamma} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2}$
$I_3 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{3^2 \cdot 0,4} = 3,23 \text{ А}$	$I_{3,\Gamma} = \sqrt{6 \cdot 3,23^2} = 7,91 \text{ А}$
$I_5 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{5^2 \cdot 0,4} = 1,16 \text{ А}$	$I_{5,\Gamma} = \sqrt{6 \cdot 1,16^2} = 2,84 \text{ А}$

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n -ой гармонической составляющей рассчитываем по формулам (1.11) и (1.3)

$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_{K3,0,4}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} 100, [\%]$
$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 7,91 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 0,4^2}{2} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{3,29 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,82\%$

$$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 0,4^2}{2} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ кВ} \quad \left| \quad k_{U(5)} = \frac{1,97 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,5\%$$

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 0,4 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_3^5 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{0,82^2 + 0,5^2}}{0,4} 100 = 2,4\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 0,4 кВ составляет 8%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 0,4 кВ не требуется.

2. Расчет коэффициента несимметрии

При расчете напряжения обратной последовательности и коэффициента несимметрии однофазные нагрузки учитываются введением в схему замещения задающих токов обратной последовательности.

Модуль тока обратной последовательности, потребляемого однофазными нагрузками [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (2.1)$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc.

Схема замещения сети для нахождения напряжения обратной последовательности U_2 приведена на рис.2.1 [4].

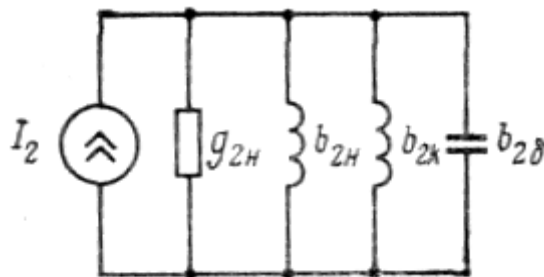


Рис. 2.1. Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности. На схеме обозначено: I_2 — ток обратной последовательности несимметричной нагрузки; b_{2K} и b_{2D} — проводимости короткого замыкания сети мощностью S_K и трехфазной батареи конденсаторов Q_6 (если последняя имеется); b_{2H} и g_{2H} — проводимость остальной нагрузки подстанции, рассматриваемой в качестве обобщенной; в относительных единицах

$$Y_{2H} = \frac{1}{0,18 + j0,24} = 2 - j2,67$$

Выражения для активных и реактивных проводимостей имеют вид:

$$b_{2K} = \frac{S_K}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad b_{26} = \frac{Q_6}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad b_{2H} = \frac{2,67S_H}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad g_{2H} = \frac{2S_H}{U_{\text{НОМ}}^2};$$

Модуль полного сопротивления обратной последовательности $z_{2\Sigma}$ сети после выполнения несложных преобразований представляется выражением [4]:

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{K}} + 2,67S_{\text{H}} - Q_6)^2}} \quad (2.2)$$

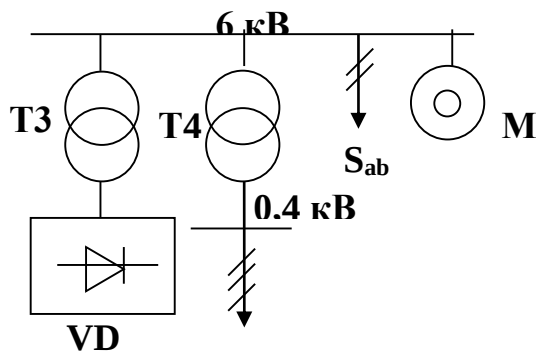
Напряжение обратной последовательности

$$U_2 = \sqrt{3}I_2 z_{2\Sigma} \quad (2.3)$$

Коэффициент несимметрии

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} 100\% \quad (2.4)$$

Пример 4. Для схемы на рисунке определить коэффициент несимметрии при подключении однофазной печи к фазам а и b.



Исходные данные:

С: $S_{\text{КЗ},6}=150 \text{ МВА}$

Т4: $S_{\text{Т4}}=1 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}}=6 \text{ кВ}$; $u_{\text{K},\%}=5,5\%$;

$\Delta P_{\text{КЗ}}=10,5 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{ХХ}}=1,9 \text{ кВт}$

VD: $S_{\text{пр}}=10 \text{ МВА}$; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

М: $P_{\text{М}}=220 \text{ кВт}$; $\cos \varphi=0,9$

Н: $S_{\text{нагр}}=1 \text{ МВА}$; $S_{\text{ab}}=5,5 \text{ МВА}$

Решение: Ток обратной последовательности находим по формуле (2.1)

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{НОМ}}} \sqrt{3S_{\text{ab}}^2 + (S_{\text{ab}} - 2S_{\text{bc}})^2} = \frac{\sqrt{3}}{6 \cdot 6} \sqrt{3 \cdot 5500^2 + (5500 - 2 \cdot 0)^2} = 530 \text{ А}$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc, кВА.

Суммарная нагрузка на шинах 6 кВ с учетом вентильного выпрямителя

$$S_{\text{H}} = S_{\text{пр}} + S_{\text{нагр}} + S_{\text{М}} = 10 + 1 + 0,22/0,9 = 11,24 \text{ МВА}$$

где $S_{\text{пр}}$ – мощность вентильного преобразователя, МВА; $S_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки, МВА; $S_{\text{М}}$ – мощность двигателя, МВА.

Модуль сопротивления обратной последовательности по (2.2)

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{КЗ},6} + 2,67S_{\text{H}} - Q_6)^2}} = \frac{6^2}{\sqrt{4 \cdot 11,24^2 + (150 + 2,67 \cdot 11,24 - 0)^2}} = 0,2 \text{ Ом}$$

где $S_{кз,6}$ – мощность короткого замыкания системы на шинах 6 кВ, МВА; Q_6 – мощность конденсаторной батареи (в данном случае не установлена, принимаем равной 0), Мвар.

Напряжение обратной последовательности по (2.3)

$$U_2 = \sqrt{3}I_2Z_{2\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 530 \cdot 0,2 = 182,17\text{В}$$

Коэффициент несимметрии по (2.4)

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} 100\% = \frac{182,17}{6000} 100\% = 3\%$$

Для напряжения 6 кВ допустимый коэффициент несимметрии согласно [1] составляет 2%. Так как расчетный коэффициент несимметрии превышает допустимый, необходима установка симметрирующих устройств.

3. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников

3.1. Расчет дополнительных потерь при несинусоидальности напряжения

Несинусоидальность напряжения влияет на все виды электроприемников. Вызвано это не только тепловым дополнительным нагревом ЭП от высших гармоник (ВГ) тока, но и тем, что ВГ образуют составляющие прямой последовательности (1, 4, 7 и т.д.), обратной последовательности (2, 5, 8 и т.д.) и нулевой последовательности (гармоники кратные трем). В частности, токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали в электрических машинах, что приводит к ухудшению характеристик этих ЭП и дополнительному нагреву сердечников (статоры АД, магнитопроводы трансформаторов).

Обычно ВГ напряжения, суммируясь с основной гармоникой, способствуют повышению действующего значения напряжения на зажимах ЭП.

Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях, ухудшаются условия работы батарей конденсаторов (БК), сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, возрастает аварийность в кабельных сетях, ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Высшие гармоники напряжения и тока влияют также на значения коэффициента мощности, вращающего момента электродвигателей. Однако снижение этих характеристик, даже при коэффициенте искажения формы кривой напряжения 10—15 %, оказывается весьма небольшим. Уровень дополнительных активных потерь от ВГ в основных сетях электрических

систем составляет несколько процентов от потерь при синусоидальном напряжении. В сетях предприятий, крупных промышленных центров, а также сетях электрифицированного железнодорожного транспорта эти потери могут достигать 10—15 %.

Во многих случаях в электрических сетях различных напряжений с источниками гармоник КБ, по существу, не работают: они или отключаются вследствие перегрузки по току, или в короткий срок выходят из строя в результате вспучивания, а иногда и разрушения. В условиях промышленных предприятий батареи конденсаторов способствуют созданию условий резонанса токов (или близких к этому режиму) на частоте какой-либо из гармоник, что приводит к опасной перегрузке их по току. В тяговых и промышленных электросетях с преобразователями такие перегрузки зафиксированы при резонансе на гармониках 40—50-го порядка, в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками - на гармониках 3—7-го порядка.

Особенно чувствительны к появлению ВГ конденсаторные батареи и кабели. В конденсаторах потери пропорциональны частоте $\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$. ВГ приводят к дополнительному нагреву конденсаторов и быстрому выходу их из строя. Ограничение по дополнительному нагреву КБ заданы допустимым увеличением действующего на его зажимах напряжения до 10 % от $U_{\text{ном}}$ и действующего значения тока до 30% от $I_{\text{ном}}$.

Кроме того, увеличение k_U приводит к старению изоляции, качество которой характеризуется $\operatorname{tg} \delta$. Работа КБ с $k_U=5\%$ в течение двух лет приводит к увеличению $\operatorname{tg} \delta$ в 2 раза.

Аналогично восприимчивы к ВГ и кабели, качество диэлектрика которых характеризуется током утечки. При $k_U=6,85\%$ за 2,5 года ток утечки возрастает на 36 %, а через 3,5 года - на 43 %.

При несинусоидальном напряжении наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей в результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей, создаваемых ВГ тока, а также повышенного нагрева токоведущих частей.

Для оценки дополнительных потерь мощности, обусловленных ВГ тока могут быть использованы следующие формулы [3]:

для асинхронных двигателей:

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2\Delta P_{\text{м,ном}} K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.1)$$

где $\Delta P_{\text{м,ном}}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_I — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; $K_{U(n)} = U_n / U_{\text{ном}}$ — относительное напряжение n -й гармоники.

для синхронных машин:

$$\Delta P_P = \frac{\sqrt{2}(r_2 - r_{CT})}{R_X^2 X_2^2} * P_{НОМ} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{K_{u(n)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

где r_2 , X_2 — активное и реактивное сопротивление обратной последовательности статора СМ; r_{CT} — активное сопротивление статора; R_X коэффициент, равный 0,71 для явнополусных машин и 0,88 — для неявнополусных.

В статоре СМ:

$$\Delta P_{CT} = K_{CT} P_{НОМ} \sum_{n=2}^{40} \frac{K_{U(N)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

где $K_{CT} = \frac{0,47 P_{M1НОМ}}{R_X^2 X_2^2 P_{НОМ}}$ — коэффициент, учитывающий потери в меди обмотки от тока основной частоты, а также глубину проникновения тока в проводник;

для силовых трансформаторов:

$$\Delta P_{T,n} = \Delta P_{xx} \sum k_{U(n)}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{T,НОМ}}{u_{k,\%}} \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.4)$$

где ΔP_{XX} , ΔP_{K3} , u_K - параметры трансформатора.

для силовых косинусных конденсаторов:

$$\Delta P_{KB} = C \omega \operatorname{tg} \delta \sum_{n=2}^{40} U_n^2 n, \quad (3.5)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора; U_n — действующее значение напряжения n-й ВГ;

для линий электропередачи:

$$\Delta P = 3 \sum_{n=2}^{40} I_n^2 r K_m,$$

3.2. Влияние несимметрии напряжения

При несимметрии в трехфазных сетях появляются дополнительные потери в элементах электросетей, сокращается срок службы ламп и электрооборудования и снижаются экономические показатели его работы.

При несимметрии напряжений в электрических машинах переменного тока возникают магнитные поля, вращающиеся не только с синхронной скоростью в направлении вращения ротора, но и в противоположном с удвоенной синхронной скоростью. В результате возникает тормозной электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев активных частей машины, главным образом, ротора за счет токов двойной частоты.

Ток I_2 обратной последовательности [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (3.6)$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc .

Этот ток создает вращающееся магнитное поле обратной последовательности, индуцируя в цепях роторов ЭДС и токи двойной частоты, что приводит к дополнительному нагреву машины.

В АД при коэффициентах обратной последовательности напряжения, встречающихся на практике ($K_{2U} \leq 0,05—0,06$), снижение вращающего момента оказывается пренебрежимо малым. Влияние несимметрии на потери в электродвигателе и, следовательно, нагрев и сокращение срока службы изоляции его проявляются в большей мере. В целом срок службы АД при $K_{2u}-2—4\%$ сокращается на 11 % [3].

При работе электродвигателя с номинальным вращающимся моментом и коэффициентом несимметрии напряжений $K_{2U} = 4\%$, срок службы его сокращается примерно в 2 раза только за счет дополнительного нагрева. Если напряжение на одной из фаз будет значительно превышать номинальное значение, сокращение срока службы изоляции будет еще больше. Для обеспечения нормальных условий работы электродвигателей в этом случае необходимо снижать располагаемую мощность их, а при проектировании — увеличивать номинальную мощность электродвигателей, если не предусматриваются специальные мероприятия по симметрированию напряжений сети. Эти обстоятельства возникают, например, при проектировании электрифицированного железнодорожного транспорта, на горно-обогатительных и некоторых других промышленных предприятиях. Для расчета дополнительных потерь, вызванных несимметрией напряжения на вводах АД может быть использовано следующее выражение [4]:

$$\Delta P_{\text{АД}} = 2,41 \Delta P_{\text{м1ном}} K_I \varepsilon_U^2 \quad (3.7)$$

где $\Delta P_{\text{м1ном}}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_I — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; ε_U — коэффициент несимметрии напряжения в отн. ед.

При несимметрии напряжений в синхронных машинах (СМ) наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут возникать опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, в особенности при недостаточной прочности или наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 % опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают. Снижение срока службы СД при $K_{2u} = 2—4\%$ составляет 16 % [3].

Дополнительные потери мощности в СМ при несимметричной нагрузке вызывают появление местных (локальных) нагревов обмотки возбуждения, что приводит к необходимости снижать ток возбуждения и тем самым уменьшать значение реактивной мощности, выдаваемой в сеть. При этом может возникнуть необходимость снизить активную нагрузку генератора или момент на валу синхронного двигателя. Дополнительные потери в статоре СМ значительно меньше аналогичных потерь в обмотке ротора, поэтому ими обычно пренебрегают

$$\Delta P_{\text{СМ}} = \Delta P_{\text{Дном}} \frac{U_2^2}{Z_{2\text{СМ}}^2}, \quad (3.8)$$

где $\Delta P_{\text{Дном}} = 3I_{\text{НОМ}}^2 r_{2\text{Р}}$ — дополнительные потери в СМ при токе обратной последовательности, равном номинальному; $r_{2\text{Р}}$ — активное сопротивление обратной последовательности обмотки ротора; $Z_{2\text{СМ}}$ — полное сопротивление обратной последовательности СМ.

Несимметрия напряжений не оказывает заметного влияния на работу воздушных и кабельных линий, в то же время нагрев трансформаторов и, следовательно, сокращение срока их службы могут оказаться существенными. В случае несимметрии токов трансформатора нагрев масла будет несколько меньше, чем в случае симметричной нагрузки при токе фаз, равном току наиболее загруженной фазы. Это объясняется более интенсивным охлаждением обмотки этой фазы. Такие условия имеют место в сетях 6—10—35 кВ промышленных предприятий, работающих с изолированной или компенсированной нейтралью. Расчеты показывают, что при номинальной нагрузке трансформатора и коэффициенте несимметрии токов равном 10 % срок службы изоляции трансформатора сокращается на 16 %.

Дополнительные потери в силовых трансформаторах можно оценить по формуле

$$\Delta P_{\text{Т,нс}} = \left(\Delta P_{\text{xx}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{к, \%}}} \right) \varepsilon_{\text{U}}^2 \quad (3.9)$$

где ΔP_{xx} , $\Delta P_{\text{кз}}$, $u_{\text{к}}$ — расчетные данные трансформатора.

Срок службы трансформаторов при $K_{2\text{U}} = 2—4$ % сокращается на 4 %[3].

При несимметрии линейных напряжений реактивная мощность, генерируемая батареей конденсаторов, изменяется по сравнению с номинальным значением $Q_{\text{НОМ}}$ на величину

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2 (1 + \varepsilon_{\text{U}}^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.10)$$

где U_1 — линейное напряжение прямой последовательности; $U_{ном}$ — номинальное напряжение батареи конденсаторов.

При $K_{2U} = 0,05—0,06$ значение $\Delta Q = (0,01—0,04)Q_{ном}$. Поскольку на практике напряжение U_1 может быть больше или меньше напряжения $U_{ном}$, то возможно как увеличение, так и уменьшение генерируемой реактивной мощности. В последнем случае в наиболее загруженной фазе значения тепловых потерь могут значительно превосходить номинальное значение, создавая местный перегрев изоляции, приводящий к сокращению срока ее службы на 20 % [3]

$$\Delta P_{кб} = Q_{ном} \operatorname{tg} \varepsilon_U, \quad (3.11)$$

где $Q_{ном}$ — номинальная мощность конденсаторной батареи (КБ); $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; ε_U — относительное значение коэффициента несимметрии.

Несимметрии напряжений и токов отрицательно влияет на работу рудно-термических печей, вызывая снижение их производительности, увеличение расхода электроэнергии и, тем самым, уменьшение КПД печи. Ухудшение основных показателей работы рудно-термических печей после некоторых граничных значений несимметрии, когда наблюдается резкое падение производительности и КПД печи при резком возрастании расхода электроэнергии. Последнее объясняется возникновением зон активного и пассивного хода реакции и, тем самым, неравномерностью распределения энергии по объему ванны печи. Увеличение напряжения обратной последовательности на 20 % приводит к снижению производительности рудно-термических печей на 30—40 % [3].

При появлении в 3-фазной сети 380 В напряжения нулевой последовательности ухудшаются режимы однофазных ЭП. Токи нулевой последовательности постоянно протекают через заземлители и значительно высушивают грунт, увеличивая сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимо для работы релейной защиты, из-за усиления воздействия токов нулевой последовательности на низкочастотные установки связи, устройства железнодорожных блокировок. При появлении токов обратной и нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах сети.

3.3. Расчет снижения срока службы электрооборудования при несинусоидальности и несимметрии напряжения

При работе электрооборудования в номинальном режиме дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения приводят к перегреву токоведущих частей выше допустимой температуры. К повышению температуры весьма чувствительна изоляция обмоток, срок службы которой снижается.

Согласно [4] прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{нс}}}{\Delta P_{\text{ном}}} \quad (3.12)$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура электрооборудования без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, °С, $\Delta P_{\text{н}}$ и $\Delta P_{\text{нс}}$ – дополнительные потери соответственно от токов высших гармоник и несимметрии напряжения.

Коэффициент снижения срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и несимметрии напряжения [4]

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} \quad (3.13)$$

Снижение срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности [4]

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} \quad (3.14)$$

где $t_{\text{норм}}$ – нормальный срок службы оборудования, лет.

Пример 5. Для схемы из примера 4 рассчитать дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения в асинхронном двигателе и цеховом трансформаторе Т4, а также снижение срока службы из-за перегрева токами высших гармоник и токами обратной последовательности. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C.

Решение:

а) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для асинхронного двигателя.

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{м,ном}} = \frac{P_{\text{м}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi} = \frac{0,22}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,9} = 0,024 \text{ кА}$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_{\text{м}} = \frac{K_{\text{м}}}{K_{\text{I}}^2} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{1,2}{5,1^2} \frac{6^2 \cdot 0,9}{0,22} = 6,8 \text{ Ом}$$

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{м,ном}} = 3 I_{\text{ном}}^2 R_{\text{м}} = 3 \cdot 24^2 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} = 11,74 \text{ кВт}$$

Дополнительные потери от токов высших гармоник считаем по формуле (3.1)

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2 \Delta P_{\text{м,ном}} K_{\text{I}}^2 \sum \left(k_{\text{U(n)}}^2 \frac{1}{n \sqrt{n}} \right),$$

где $k_{\text{U(n)}}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{м,п}} &= 2 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = \\ &= 0,37 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности при несимметрии напряжения считаем по (3.7)

$$\Delta P_{\text{м,нс}} = 2,41 \Delta P_{\text{м,ном}} K_{\text{I}}^2 \varepsilon_{\text{U}}^2 = 2,41 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \cdot 0,03^2 = 0,66 \text{ кВт}$$

где ε_{U} – коэффициент несимметрии напряжения на шинах 6 кВ из примера 4, о.е.

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{м,п}} + \Delta P_{\text{м,нс}}}{\Delta P_{\text{м,ном}}} = 75 \frac{0,37 + 0,66}{11,74} = 6,58^\circ\text{C}$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура двигателя без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент снижения срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 6,58 + \frac{(0,086 \cdot 6,58)^2}{2} = 0,73$$

Снижение срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,73 = 14,6 \text{ года}$$

б) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для цехового трансформатора Т4.

Номинальный ток трансформатора

$$I_{\text{Т4,ном}} = \frac{S_{\text{Т4}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 6} = 0,096 \text{ кА}$$

Активное сопротивление трансформатора

$$R_{\text{Т4}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{0,0105 \cdot 6^2}{1^2} = 0,378 \text{ Ом}$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери мощности короткого замыкания трансформатора, МВт.

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{Т4,ном}} = \Delta P_{\text{хх}} + 3I_{\text{Т4,ном}}^2 R_{\text{Т4}} = 1,9 + 3 \cdot 96^2 \cdot 0,378 \cdot 10^{-3} = 12,35 \text{ кВт}$$

где $\Delta P_{\text{хх}}$ – потери мощности холостого хода трансформатора, кВт.

Дополнительные потери от токов высших гармоник по (3.4)

$$\Delta P_{\text{Т4,п}} = \Delta P_{\text{хх}} \sum k_{\text{U(n)}}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{\text{Т4,ном}}}{u_{\text{k, \%}}} \sum \left(k_{\text{U(n)}}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right),$$

где $k_{\text{U(n)}}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Т4,п}} &= 1,9 \cdot \sum (0,06^2 + 0,058^2 + 0,048^2 + 0,043^2) + \\ &+ 0,6 \cdot \frac{12,35}{0,055} \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,103 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности по (3.9)

$$\Delta P_{T4,HC} = \left(\Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{T4,НОМ}}{u_{k,\%}} \right) \varepsilon_U^2 = \left(1,9 + \frac{12,35}{0,055} \right) 0,03^2 = 0,2 \text{ кВт}$$

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

$$\Delta \tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{T4,п} + \Delta P_{T4,HC}}{\Delta P_{T4,НОМ}} = 75 \frac{0,103 + 0,2}{12,35} = 1,86^\circ \text{C}$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура трансформатора без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент снижения срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

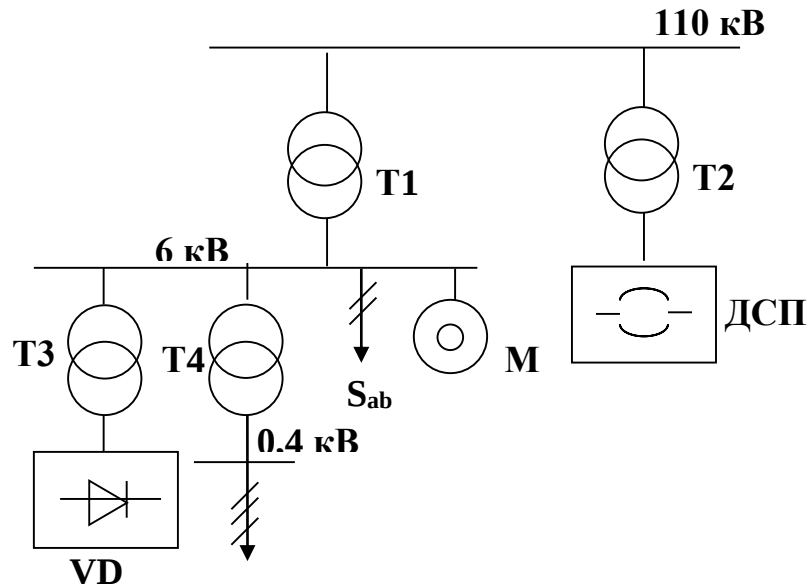
$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 1,86 + \frac{(0,086 \cdot 1,86)^2}{2} = 0,17$$

Снижение срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,17 = 3,45 \text{Года}$$

Задание на контрольную работу

Для заданной схемы рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несинусоидальности на шинах 110 и 6 кВ, дополнительные потери мощности и снижение срока службы цехового трансформатора Т4 и асинхронного двигателя М из-за перегрева токами высших гармоник и несимметрии напряжения. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C.



Исходные данные:

С: $S_{кз,110}$ – по таблице; $S_{кз,6}=170$ МВА; $S_{кз,0,4}=3$ МВА

Т2: $S_{Т2}=50$ МВА; $U_{ном}=110$ кВ

Т3: $S_{Т3}=10$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=10,5\%$

Т4: $S_{Т4}=1$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=5,5\%$; $\Delta P_{кз}=10,5$ кВт; $\Delta P_{xx}=1,9$ кВт

М: P_M – по таблице; $\cos \varphi=0,9$; $K_M=1,2$; $K_I=5,1$

VD: $S_{пр}=8$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

Н: $S_{нагр}=2$ МВА; $S_{ab}=4$ МВА

Данные по шифру зачетной книжки

Предпоследняя цифра	$S_{кз,110}$, МВА	Последняя цифра	P_M , кВт
0	1500	0	200
1	1600	1	210
2	1700	2	220
3	1800	3	230
4	1900	4	240
5	2000	5	250
6	2100	6	260
7	2200	7	270
8	2300	8	280
9	2400	9	290

Рекомендуемая литература

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.: ил. – (Экономия топлива и электроэнергии).
3. Карташов И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / Под ред. М.А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с., ил.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977 г. 128 с.: ил.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по организации и проведению самостоятельной работы обучающихся
по дисциплине «ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

Введение

- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»
- 2 План-график выполнения самостоятельной работы
- 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5 Список рекомендуемой литературы.

Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Приемники и потребители электроэнергии в системах электроснабжения»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

Задачами самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

Цель самостоятельного решения задач - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

Задачами самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

Целью самостоятельного выполнения контрольной работы по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Задачами данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании контрольной работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения объектов	ИД-1 _{ПК-1} Выполняет сбор и анализ данных для проектирования систем электроснабжения объектов	Знает взаимосвязи между потребителями и системой электроснабжения; показатели графиков нагрузки электроприемников и потребителей;
	ИД-2 _{ПК-1} Выбирает типовые проектные решения систем электроснабжения объектов	Владеет навыками разработки основных энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения.
ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения	ИД-2 _{ПК-2} Рассчитывает режимы работы систем электроснабжения	Умеет анализировать графики нагрузки.

План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
6 семестр ОФО					
ПК-1 ИД-1 ПК-1 ИД-2ПК-1 ИД-2ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	28,53	3,17	31,7
	Подготовка к лекциям	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Подготовка к контрольной работе	Собеседование	11,97	1,33	13,3
Итого:			48,6	5,4	54
6 семестр ЗФО					
ПК-1 ИД-1 ПК-1 ИД-2ПК-1 ИД-2ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	74,61	8,29	82,9
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,54	0,06	0,6
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2
	Подготовка к контрольной работе	Собеседование	11,97	1,33	13,3
			88,2	9,8	98

Контрольные точки и виды отчетности по ним

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
6 семестр			
1.	Лабораторное занятие № 1	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 5	10 неделя	15
3.	Лабораторное занятие № 8	20 неделя	15
	Итого		55

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Перечень основной литературы:

1. Гужов Н. П. , Ольховский В. Я. , Павлюченко Д. А. Системы электроснабжения: учебник/ Гужов Н. П. , Ольховский В. Я. , Павлюченко Д. А. Новосибирск: НГТУ, 2015. – 262 с. Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=438343
2. Соколова, Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование. Общепромышленные механизмы и бытовая техника : учебник/Е.М. Соколова. - 9-е изд., испр.-М.: Академия, 2014. - 224 с.

Перечень дополнительной литературы:

- 1 Смирнов, Ю. А. Физические основы электротехники: учеб, пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - СПб.: Лань, 2013. - 560 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). – Библиогр.: с. 558-559. - ISBN 978-5-8114-1369-0
- 2.Акимова, Н. А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования : учебник / Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец, Н.И. Сентюрихин ; под ред. Н.Ф. Котеленца. - 10-е изд., испр. - М.: Академия, 2013. - 304 с. - Прил.: с. 284-295. - Библиогр. с. 296.

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания для подготовки к лабораторным работам.
2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.
3. Методические указания по выполнению контрольной работы.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению контрольной работы
по дисциплине «ПРИЕМНИКИ И ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

№ п/п	Содержание	Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование контрольных работ	
4.	Список контрольных работ	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	

Введение

Контрольная работа создаёт оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Приемники и потребители электроэнергии в системах электроснабжения». Контрольные работы проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью контрольных работ является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Цель изучения дисциплины

- формирование у студентов систематических знаний по вопросам проектирования и эксплуатации комплексных систем электроснабжения городов и промышленных предприятий.

Задачами дисциплины является:

- Знать взаимосвязи между потребителями и системой электроснабжения; показатели графиков нагрузки электроприемников и потребителей;

- Уметь анализировать графики нагрузки.

- Владеть навыками разработки основных энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения

2. Расчет коэффициента несинусоидальности

3.4. Вентильные преобразователи

В настоящее время самой распространенной схемой выпрямления для мощных преобразователей является трехфазная мостовая схема (схема Ларионова), представленная на рис. 1.1, *а*. Эта схема выпрямления позволяет осуществить так называемую шестифазную или шестиимпульсную схему выпрямления. Соединение последовательно или параллельно двух или нескольких выпрямительных мостов при питании их напряжением, сдвинутым на соответствующий угол, позволяет получить 12, 18, 24, 36, 48...-фазные схемы выпрямления (кратные шести). Сдвиг угла напряжения осуществляется применением соответствующих схем соединения первичных или вторичных обмоток трансформатора: Y — звезда, Δ — треугольник, Z — зигзаг, которые позволяют осуществить практически схемы любой фазности (импульсности) выпрямления.

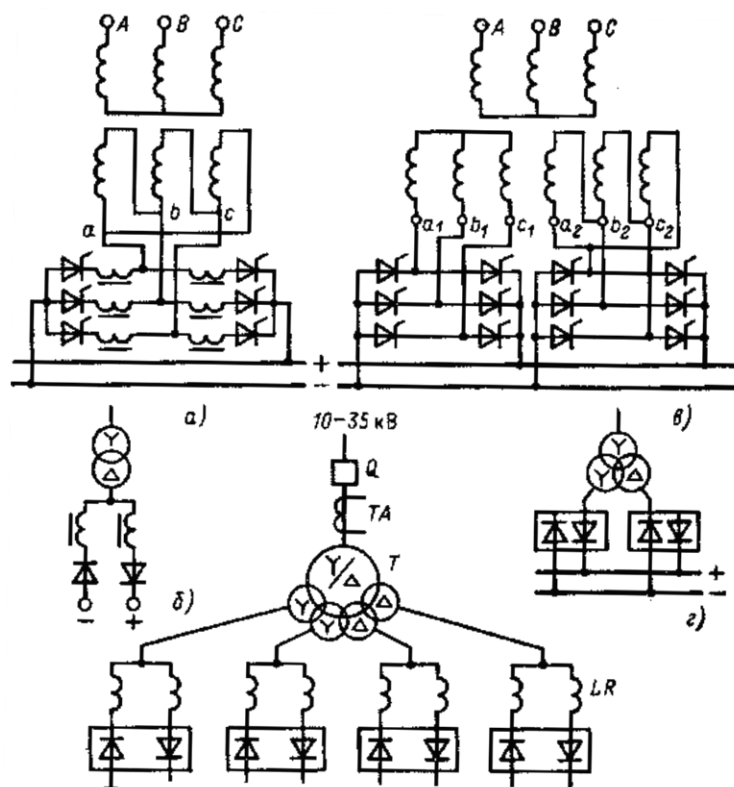


Рис. 1.1. Схемы полупроводниковых преобразовательных агрегатов:

а — агрегат до 6300 А шестифазного режима выпрямления (трехлинейная схема); *б* — однолинейная схема; *в* — трехлинейная схема агрегата 12500 А двенадцати-фазного режима выпрямления; *г* — однолинейная схема; *д* — однолинейная схема агрегата 25 000 А и его коммутационная аппаратура

Первичным является появление в питающей сети коммутационных искажений напряжения, а гармонический анализ их позволяет выявить наличие высших гармоник напряжения. Порядок высших гармоник определяется формулой $n = mk \pm 1$, где m — число фаз выпрямления; $k=0, 1, 2, 3...$ —последовательный ряд натуральных чисел.

Для шестифазной системы напряжения в кривой питающего напряжения имеются высшие гармоники следующего порядка, называемые каноническими: $n=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23...$; для 12-фазной схемы $n=11, 13, 23, 25, 35, 37...$; для 24-фазной схемы $n=23, 25, 47, 49, 71, 73$ и т. д.

Методика расчета коэффициента несинусоидальности напряжения k_U основывается на вычислении в любой точке питающей сети действующих значений коммутационных искажений напряжения, что равносильно учету всех высших гармоник. Следовательно, для определения k_U при работе вентильных преобразователей нет необходимости определять уровни отдельных гармоник. При этом удастся избежать ошибки, возникающей при учете только определенного числа высших гармоник.

Методика позволяет вычислять k_U в любой точке питающей сети, используя параметры, полученные при вычислении токов КЗ, и основывается на следующих допущениях: проводимости элементов питающей сети считаются неемкостными. При этом допущении ошибка в расчете не превышает 10—15%. Предполагается, что в узлах сети, расположенных в непосредственной близости от вентильных преобразователей, отсутствуют БК, предназначенные для компенсации реактивной мощности; не учитываются аномальные гармоники.

Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле [2]

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{ном}} 100 \quad (1.1)$$

Общий коэффициент несинусоидальности питающей сети при работе вентильных преобразователей может быть определен по формуле [2]

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{пр}} - 0,91} \quad (1.2)$$

где $x_c = \frac{S_{пр}}{S_{кз,6}}$ - эквивалентное сопротивление системы в относительных

единицах, приведенное к мощности преобразователя $S_{пр}$, т. е. сопротивление от условной точки сети бесконечной мощности до точки сети, в которой определяется k_U ; $S_{кз}$ — мощность КЗ в точке, в которой определяется k_U ; $x_{пр}$ — индуктивное сопротивление цепи преобразователя в относительных

единицах, приведенное к $S_{\text{пр}}$, т. е. сопротивление от точки возникновения коммутационных КЗ до точки, в которой определяется k_U .

Формула (1.3) справедлива для преобразователей с любой последовательностью чередования фаз.

Кроме коэффициента несинусоидальности ГОСТ нормирует коэффициенты n-ой гармонической составляющей. Согласно [4]

$$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, \% \quad (1.3)$$

При определении k_U особое внимание следует обращать на $x_{пр}$. Чаще всего требуется определять k_U на шинах питания мощных тиристорных преобразователей. Под преобразователем подразумеваются выпрямительный мост (или их группа) и питающий понижающий трансформатор.

В этом случае $x_{пр}$ равно сопротивлению преобразовательного трансформатора и определяется по формуле [2]

$$x_{пр} = \frac{u_{k\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{ном,Т}} \quad (1.4)$$

где $S_{ном,Т}$ — номинальная мощность преобразовательного трансформатора; k_p — коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора; $u_k \%$ — сквозное напряжение КЗ трансформатора, приведенное к полной номинальной мощности трансформатора.

Для двухобмоточных трансформаторов, применяемых в шестифазных (трехфазных мостовых) схемах выпрямления, $k_p = 0$, трехобмоточных трансформаторов, применяемых в преобразователях, выполненных по двенадцатифазной схеме, в общем виде

$$k_p = \frac{u_{k(НН1-НН2)}}{u_k}$$

где $u_{k(НН1-НН2)}$ — напряжение КЗ между расщепленными вторичными обмотками трансформатора.

В общем случае для трансформаторов с расщепленными обмотками $k_p = 0 \div 4$, если ветви низшего напряжения трансформатора имеют хорошую электромагнитную связь друг с другом, $k_p = 0$; если обмотки НН не имеют магнитной связи друг с другом или преобразователь выполнен по схеме с двумя трансформаторами, имеющими разные схемы соединения, то $K_p = 4$.

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последовательностью чередования фаз выпрямления может быть определено по формуле [2]

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{ном} \frac{x_c}{x_c + x_{пр}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.5)$$

где $\gamma = \frac{3(x_c + x_{пр})}{m \cdot \sin \varphi}$ - угол коммутации, рад.

Действующее значение тока любой гармоники в цепи преобразователя определяется из выражения [2]

$$I_n = \frac{m}{\sqrt{3}\pi} \frac{S_{пр}}{U_{ном} (x_c + x_{пр}) n^2} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma) \quad (1.6)$$

При работе группы вентильных преобразователей порядок расчета k_U следующий. По приведенным формулам определяются уровни высших гармоник напряжения для каждого преобразователя.

Одинаковые гармоники напряжения всех преобразователей геометрически суммируются. Затем определяется коэффициент несинусоидальности:

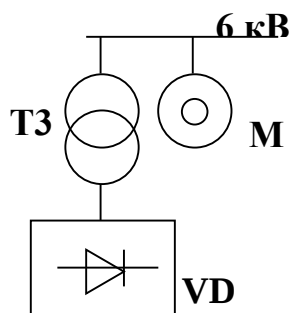
$$k_{U\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^p U_{n\Sigma}^2}}{U_{ном}} 100$$

Особое внимание необходимо обращать на количество учитываемых гармоник, чтобы избежать ошибки в вычислении k_U . Чем больше количество преобразователей и фаз выпрямления, тем большее количество гармоник необходимо учитывать. Предлагается следующая эмпирическая формула:

$$p = n_{max} = 4qm + 1, \quad (1.7)$$

где n_{max} — наибольшая гармоника; q — число работающих преобразователей; m — число фаз выпрямления.

Пример 1. Для вентильного выпрямителя рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 6 кВ.



Исходные данные:

C: $S_{кз,6}=150$ МВА

T3: $S_{T3}=10$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=10,5\%$

VD: $S_{пр}=10$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

M: $P_M=220$ кВт; $\cos \varphi=0,9$; $K_M=1,2$; $K_I=5,1$

Решение: Считаем сопротивление преобразователя по формуле (1.4)

$$x_{пр} = \frac{u_{к\%}}{100} \left(1 + \frac{k_p}{4}\right) \frac{S_{пр}}{S_{T3}} = \frac{10,5}{100} \left(1 + \frac{0}{4}\right) \frac{10}{150} = 0,066$$

где k_p — коэффициент расщепления обмоток (для двухобмоточного трансформатора равен 0)

Сопротивление системы

$$x_c = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{кз},6}} = \frac{10}{150} = 0,067$$

Коэффициент несинусоидальности по упрощенной формуле (1.2)

$$k_u = 100 \cdot x_c \sqrt{\frac{0,955 \cdot \sin \varphi}{x_c + x_{\text{пр}}}} - 0,91 = 100 \cdot 0,067 \sqrt{\frac{0,955 \cdot 0,6}{0,067 + 0,066}} - 0,91 = 12\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 6 кВ составляет 5%. Так как расчетный коэффициент больше допустимого, необходима установка фильтрующих устройств.

Согласно [2] для вентильных преобразователей необходимо учитывать в расчетах только 5, 7, 11, 13 гармоники.

Угол коммутации в радианах

$$\gamma = \frac{3(x_c + x_{\text{пр}})}{m \cdot \sin \varphi} = \frac{3(0,067 + 0,066)}{6 \cdot 0,6} = 0,11 \text{ рад}$$

где m – число фаз преобразователя.

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n -ной гармонической составляющей по (1.5) и (1.3)

$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} U_{\text{НОМ}} \frac{x_c}{x_c + x_{\text{пр}}} \sin \varphi \cdot \sin(n \cdot \gamma), [\text{kB}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} 100, [\%]$
$U_5 = \frac{6}{\pi \cdot 5} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(5 \cdot 0,11) = 0,36 \text{ kB}$	$k_{U(5)} = \frac{0,36}{6} 100 = 6\%$
$U_7 = \frac{6}{\pi \cdot 7} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(7 \cdot 0,11) = 0,35 \text{ kB}$	$k_{U(7)} = \frac{0,35}{6} 100 = 5,8\%$
$U_{11} = \frac{6}{\pi \cdot 11} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(11 \cdot 0,11) = 0,29 \text{ kB}$	$k_{U(11)} = \frac{0,29}{6} 100 = 4,8\%$
$U_{13} = \frac{6}{\pi \cdot 13} 6 \frac{0,067}{0,067 + 0,066} 0,6 \cdot \sin(13 \cdot 0,11) = 0,26 \text{ kB}$	$k_{U(13)} = \frac{0,26}{6} 100 = 4,3\%$

3.5. Дуговые сталеплавильные печи

Искажения питающего тока и напряжения при работе дуговых сталеплавильных печей возникают за счет нелинейной характеристики дуги и за счет нелинейной характеристики печного трансформатора, работающего при повышенных значениях магнитной индукции. Уровень высших гармоник тока при работе дуговых сталеплавильных печей сравнительно невелик, особенно по сравнению с высшими гармониками, генерируемыми вентильными преобразователями. Однако с ними следует считаться, так как мощность дуговых печей постоянно растет.

На основании экспериментальных исследований [2] получено соотношение для определения максимальных значений уровней отдельных гармоник тока при работе дуговых печей.

$$I_n = \frac{I_T}{n^2} \quad (1.8)$$

где I_T — ток печного трансформатора в расчетном режиме (для расчета максимальных значений гармоник надо брать в расчет номинальный ток печного трансформатора); $n=2, 3, 4, 5...$ — номер соответствующей гармоники. Из соотношения видно, что достаточно в расчетах учитывать только до 7-й гармоники, так как остальные гармоники малы.

Для группы одинаковых дуговых сталеплавильных печей

$$I_{n,r} = I_n \sqrt[4]{N} \quad (1.9)$$

где N — число печей, одновременно работающих в режиме расплавления.

Для группы печей разной мощности

$$I_{n,r} = I_{n,max} \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{n,Ti} / S_{n,Tmax}} \quad (1.10)$$

где $S_{n,Ti}$ — мощность i -го печного трансформатора; $S_{n,Tmax}$ — наибольшая мощность трансформатора в группе дуговых печей; $I_{n,max}$ — ток n -ой гармоники печного трансформатора наибольшей мощности; N — общее число работающих печей.

Для определения k_U в соответствующей точке сети необходимо определить уровни напряжения отдельных гармоник, генерируемых ДСП. Фазное напряжение гармоники в расчетной точке питающей сети находится из выражения

$$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{ном}^2}{S_K} \quad (1.11)$$

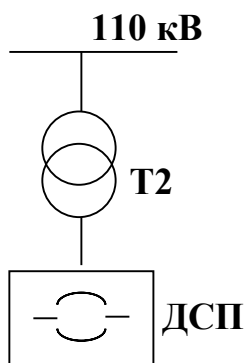
где I_n — действующее значение фазного тока n -ой гармоники; n — порядковый номер гармоники; $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение в расчетной точке; S_K — мощность КЗ в расчетной точке.

Общий коэффициент несинусоидальности в расчетной точке при работе дуговых сталеплавильных печей, %,

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (1.12)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение основной частоты в расчетной точке.

Пример 2. Для дуговой сталеплавильной печи рассчитать коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 110 кВ.



Исходные данные:

С: $S_{кз,110}=2300$ МВА

T2: $S_{T2}=60$ МВА; $U_{ном}=110$ кВ

Решение: Считаем номинальный ток печного трансформатора

$$I_T = \frac{S_{T2}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,31 \text{ кА}$$

Согласно [2] в практических расчетах для дуговых сталеплавильных печей учитываются гармоники со 2-ой по 7-ю.

Токи, напряжения высших гармоник и коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения рассчитываем по формулам (1.8), (1.11) и (1.3), где n – номер гармоники

$I_n = \frac{I_T}{n^2}, [\text{кА}],$	$U_n = \frac{\sqrt{3}I_n n U_{ном}^2}{S_{кз,110}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} 100, [\%]$
$I_2 = \frac{0,31}{2^2} = 0,078 \text{ кА}$	$U_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,078 \cdot 2 \cdot 110^2}{2300} = 1,42 \text{ кВ}$	$k_{U(2)} = \frac{1,42}{110} 100 = 1,3\%$
$I_3 = \frac{0,31}{3^2} = 0,034 \text{ кА}$	$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,034 \cdot 3 \cdot 110^2}{2300} = 0,93 \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{0,93}{110} 100 = 0,85\%$
$I_4 = \frac{0,31}{4^2} = 0,019 \text{ кА}$	$U_4 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,019 \cdot 4 \cdot 110^2}{2300} = 0,7 \text{ кВ}$	$k_{U(4)} = \frac{0,7}{110} 100 = 0,64\%$
$I_5 = \frac{0,31}{5^2} = 0,012 \text{ кА}$	$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,012 \cdot 5 \cdot 110^2}{2300} = 0,55 \text{ кВ}$	$k_{U(5)} = \frac{0,55}{110} 100 = 0,5\%$
$I_6 = \frac{0,31}{6^2} = 0,009 \text{ кА}$	$U_6 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,009 \cdot 6 \cdot 110^2}{2300} = 0,49 \text{ кВ}$	$k_{U(6)} = \frac{0,49}{110} 100 = 0,45\%$
$I_7 = \frac{0,31}{7^2} = 0,006 \text{ кА}$	$U_7 = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,006 \cdot 7 \cdot 110^2}{2300} = 0,38 \text{ кВ}$	$k_{U(7)} = \frac{0,38}{110} 100 = 0,35\%$

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 110 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^7 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{1,42^2 + 0,93^2 + 0,7^2 + 0,55^2 + 0,49^2 + 0,38^2}}{110} 100 = 1,83\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 110 кВ составляет 2%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 110 кВ не требуется.

3.6. Сварочные установки

По своему воздействию на несинусоидальность питающей сети сварочные нагрузки можно разделить на две категории: установки дуговой и контактной электросварки переменного тока, установки дуговой электросварки постоянного тока.

Установки дуговой электросварки переменного тока воздействуют на питающую сеть аналогично дуговым сталеплавильным печам. Включение сварочных машин контактной электросварки производится с помощью игнитронных или тиристорных ключей, которые для плавного регулирования сварочного тока снабжаются системами фазового регулирования угла зажигания, что приводит к искажению тока высшими гармониками, уровень которых аналогичен уровню гармоник для дуговой сварки переменного тока.

В общем случае для единичной установки электросварки переменного тока токи гармоник (рекомендуется учитывать только третью и пятую гармоники [2]) равны:

$$I_n = S_{\text{ном,т}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}} / (n^2 U_{\text{ном}}) \quad (1.13)$$

где $S_{\text{ном,т}}$ — номинальная мощность трансформатора; $\beta_{\text{св}}$ — коэффициент загрузки; ПВ — продолжительность включения.

Определение токов гармоник, генерируемых установками дуговой электросварки постоянного тока, аналогично определению гармоник для вентильных преобразователей. Токи гармоник (рекомендуется учитывать только 5, 7, 11, 13-ю гармоники) единичной установки дуговой электросварки постоянного тока определяются по формуле

$$I_n = \frac{I_{\text{св}}}{n} \quad (1.14)$$

где $I_{\text{св}}$ — номинальный первичный ток установки.

Для группы установок электросварки независимо от режима работы суммарные отдельные токи гармоник определяются согласно [2]

$$I_{\text{н,г}} = \sqrt{\sum_i^N I_{\text{ni}}^2} \quad (1.15)$$

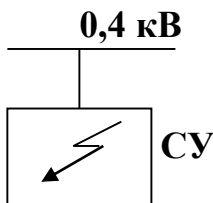
где I_{ni} — ток n -й гармоники i -й установки; N — общее число работающих установок.

Для оценки влияния сварочных нагрузок на сеть предприятия определяется общий коэффициент несинусоидальности по формуле, %,

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=5}^{13} U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \quad (1.16)$$

где $U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_K}$ - напряжение n -й гармоники.

Пример 3. Для группы сварочных установок переменного тока рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент несинусоидальности на шинах 0,4 кВ.



Исходные данные:

С: $S_{K3,0,4}=2 \text{ МВА}$

СУ: $S_{\text{НОМ}}=30 \text{ кВА}$; $U_{\text{НОМ}}=0,4 \text{ кВ}$; $\text{ПВ}=60\%$; $\beta_{\text{св}}=0,5$; $N=6$

Решение: Согласно [2] в практических расчетах для сварочных установок переменного тока учитываются 3 и 5 гармоники.

Токи высших гармоник для группы сварочных установок рассчитываем по формулам (1.13) и (1.15), где n – номер гармоники

$I_n = \frac{S_{\text{НОМ}} \beta_{\text{св}} \sqrt{\text{ПВ}}}{n^2 U_{\text{НОМ}}}$	$I_{n,\Gamma} = \sqrt{\sum_i^N I_{ni}^2}$
$I_3 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{3^2 \cdot 0,4} = 3,23 \text{ А}$	$I_{3,\Gamma} = \sqrt{6 \cdot 3,23^2} = 7,91 \text{ А}$
$I_5 = \frac{30 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{0,6}}{5^2 \cdot 0,4} = 1,16 \text{ А}$	$I_{5,\Gamma} = \sqrt{6 \cdot 1,16^2} = 2,84 \text{ А}$

Напряжения высших гармоник и коэффициенты n -ой гармонической составляющей рассчитываем по формулам (1.11) и (1.3)

$U_n = \frac{\sqrt{3} I_n n U_{\text{НОМ}}^2}{S_{K3,0,4}}, [\text{кВ}]$	$k_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} 100, [\%]$
$U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 7,91 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 0,4^2}{2} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}$	$k_{U(3)} = \frac{3,29 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,82\%$

$$U_5 = \frac{\sqrt{3} \cdot 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 0,4^2}{2} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ кВ}$$

$$k_{U(5)} = \frac{1,97 \cdot 10^{-3}}{0,4} 100 = 0,5\%$$

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 0,4 кВ

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_3^5 U_n^2}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{0,82^2 + 0,5^2}}{0,4} 100 = 2,4\%$$

Согласно [1] допустимый коэффициент несинусоидальности для напряжения 0,4 кВ составляет 8%. Так как расчетный коэффициент не превышает допустимый, установка фильтрующих устройств на шины 0,4 кВ не требуется.

4. Расчет коэффициента несимметрии

При расчете напряжения обратной последовательности и коэффициента несимметрии однофазные нагрузки учитываются введением в схему замещения задающих токов обратной последовательности.

Модуль тока обратной последовательности, потребляемого однофазными нагрузками [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (2.1)$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc.

Схема замещения сети для нахождения напряжения обратной последовательности U_2 приведена на рис.2.1 [4].

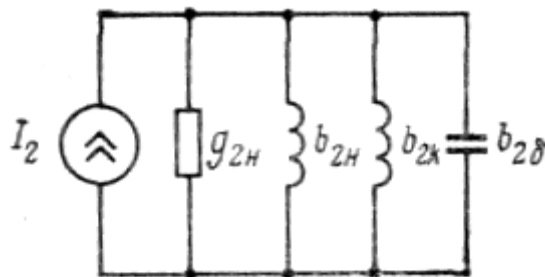


Рис. 2.1. Схема замещения сети для определения напряжения обратной последовательности. На схеме обозначено: I_2 — ток обратной последовательности несимметричной нагрузки; b_{2k} и $b_{2\delta}$ — проводимости короткого замыкания сети мощностью S_K и трехфазной батареи конденсаторов Q_6 (если последняя имеется); b_{2n} и g_{2n} — проводимость остальной нагрузки подстанции, рассматриваемой в качестве обобщенной; в относительных единицах

$$Y_{2H} = \frac{1}{0,18 + j0,24} = 2 - j2,67$$

Выражения для активных и реактивных проводимостей имеют вид:

$$b_{2K} = \frac{S_K}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad b_{2\phi} = \frac{Q_{\phi}}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad b_{2H} = \frac{2,67S_H}{U_{\text{НОМ}}^2}; \quad g_{2H} = \frac{2S_H}{U_{\text{НОМ}}^2};$$

Модуль полного сопротивления обратной последовательности $z_{2\Sigma}$ сети после выполнения несложных преобразований представляется выражением [4]:

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{K}} + 2,67S_{\text{H}} - Q_6)^2}} \quad (2.2)$$

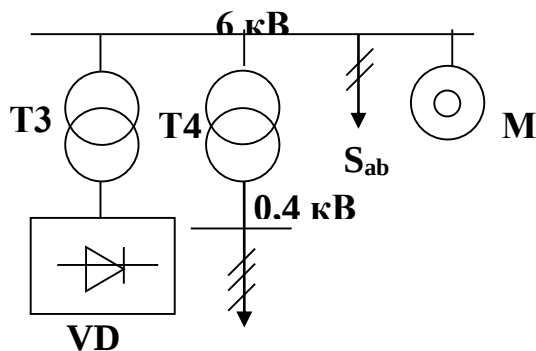
Напряжение обратной последовательности

$$U_2 = \sqrt{3}I_2 z_{2\Sigma} \quad (2.3)$$

Коэффициент несимметрии

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{\text{НОМ}}} 100\% \quad (2.4)$$

Пример 4. Для схемы на рисунке определить коэффициент несимметрии при подключении однофазной печи к фазам а и b.



Исходные данные:

С: $S_{\text{кз},6}=150 \text{ МВА}$

Т4: $S_{\text{Т4}}=1 \text{ МВА}$; $U_{\text{НОМ}}=6 \text{ кВ}$; $u_{\text{к},\%}=5,5\%$;

$\Delta P_{\text{кз}}=10,5 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{xx}}=1,9 \text{ кВт}$

VD: $S_{\text{пр}}=10 \text{ МВА}$; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

М: $P_{\text{М}}=220 \text{ кВт}$; $\cos \varphi=0,9$

Н: $S_{\text{нагр}}=1 \text{ МВА}$; $S_{\text{ab}}=5,5 \text{ МВА}$

Решение: Ток обратной последовательности находим по формуле (2.1)

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{НОМ}}} \sqrt{3S_{\text{ab}}^2 + (S_{\text{ab}} - 2S_{\text{bc}})^2} = \frac{\sqrt{3}}{6 \cdot 6} \sqrt{3 \cdot 5500^2 + (5500 - 2 \cdot 0)^2} = 530 \text{ А}$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc, кВА.

Суммарная нагрузка на шинах 6 кВ с учетом вентильного выпрямителя

$$S_{\text{H}} = S_{\text{пр}} + S_{\text{нагр}} + S_{\text{М}} = 10 + 1 + 0,22/0,9 = 11,24 \text{ МВА}$$

где $S_{\text{пр}}$ – мощность вентильного преобразователя, МВА; $S_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки, МВА; $S_{\text{М}}$ – мощность двигателя, МВА.

Модуль сопротивления обратной последовательности по (2.2)

$$z_{2\Sigma} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\sqrt{4S_{\text{H}}^2 + (S_{\text{кз},6} + 2,67S_{\text{H}} - Q_6)^2}} = \frac{6^2}{\sqrt{4 \cdot 11,24^2 + (150 + 2,67 \cdot 11,24 - 0)^2}} = 0,2 \text{ Ом}$$

где $S_{кз,6}$ – мощность короткого замыкания системы на шинах 6 кВ, МВА; Q_6 – мощность конденсаторной батареи (в данном случае не установлена, принимаем равной 0), Мвар.

Напряжение обратной последовательности по (2.3)

$$U_2 = \sqrt{3}I_2Z_{2\Sigma} = \sqrt{3} \cdot 530 \cdot 0,2 = 182,17\text{В}$$

Коэффициент несимметрии по (2.4)

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_{ном}} 100\% = \frac{182,17}{6000} 100\% = 3\%$$

Для напряжения 6 кВ допустимый коэффициент несимметрии согласно [1] составляет 2%. Так как расчетный коэффициент несимметрии превышает допустимый, необходима установка симметрирующих устройств.

5. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников

5.1. Расчет дополнительных потерь при несинусоидальности напряжения

Несинусоидальность напряжения влияет на все виды электроприемников. Вызвано это не только тепловым дополнительным нагревом ЭП от высших гармоник (ВГ) тока, но и тем, что ВГ образуют составляющие прямой последовательности (1, 4, 7 и т.д.), обратной последовательности (2, 5, 8 и т.д.) и нулевой последовательности (гармоники кратные трем). В частности, токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали в электрических машинах, что приводит к ухудшению характеристик этих ЭП и дополнительному нагреву сердечников (статоры АД, магнитопроводы трансформаторов).

Обычно ВГ напряжения, суммируясь с основной гармоникой, способствуют повышению действующего значения напряжения на зажимах ЭП.

Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях, ухудшаются условия работы батарей конденсаторов (БК), сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, возрастает аварийность в кабельных сетях, ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Высшие гармоники напряжения и тока влияют также на значения коэффициента мощности, вращающего момента электродвигателей. Однако снижение этих характеристик, даже при коэффициенте искажения формы кривой напряжения 10—15 %, оказывается весьма небольшим. Уровень дополнительных активных потерь от ВГ в основных сетях электрических

систем составляет несколько процентов от потерь при синусоидальном напряжении. В сетях предприятий, крупных промышленных центров, а также сетях электрифицированного железнодорожного транспорта эти потери могут достигать 10—15 %.

Во многих случаях в электрических сетях различных напряжений с источниками гармоник КБ, по существу, не работают: они или отключаются вследствие перегрузки по току, или в короткий срок выходят из строя в результате вспучивания, а иногда и разрушения. В условиях промышленных предприятий батареи конденсаторов способствуют созданию условий резонанса токов (или близких к этому режиму) на частоте какой-либо из гармоник, что приводит к опасной перегрузке их по току. В тяговых и промышленных электросетях с преобразователями такие перегрузки зафиксированы при резонансе на гармониках 40—50-го порядка, в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками - на гармониках 3—7-го порядка.

Особенно чувствительны к появлению ВГ конденсаторные батареи и кабели. В конденсаторах потери пропорциональны частоте $\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$. ВГ приводят к дополнительному нагреву конденсаторов и быстрому выходу их из строя. Ограничение по дополнительному нагреву КБ заданы допустимым увеличением действующего на его зажимах напряжения до 10 % от $U_{\text{ном}}$ и действующего значения тока до 30% от $I_{\text{ном}}$.

Кроме того, увеличение k_U приводит к старению изоляции, качество которой характеризуется $\operatorname{tg} \delta$. Работа КБ с $k_U=5\%$ в течение двух лет приводит к увеличению $\operatorname{tg} \delta$ в 2 раза.

Аналогично восприимчивы к ВГ и кабели, качество диэлектрика которых характеризуется током утечки. При $k_U=6,85\%$ за 2,5 года ток утечки возрастает на 36 %, а через 3,5 года - на 43 %.

При несинусоидальном напряжении наблюдается ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и кабелей в результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей, создаваемых ВГ тока, а также повышенного нагрева токоведущих частей.

Для оценки дополнительных потерь мощности, обусловленных ВГ тока могут быть использованы следующие формулы [3]:

для асинхронных двигателей:

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2\Delta P_{\text{м,ном}} K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.1)$$

где $\Delta P_{\text{м,ном}}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_I — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; $K_{U(n)} = U_n / U_{\text{ном}}$ — относительное напряжение n -й гармоники.

для синхронных машин:

$$\Delta P_P = \frac{\sqrt{2}(r_2 - r_{CT})}{R_X^2 X_2^2} * P_{НОМ} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{K_{u(n)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

где r_2 , X_2 — активное и реактивное сопротивление обратной последовательности статора СМ; r_{CT} — активное сопротивление статора; R_X коэффициент, равный 0,71 для явнополусных машин и 0,88 — для неявнополусных.

В статоре СМ:

$$\Delta P_{CT} = K_{CT} P_{НОМ} \sum_{n=2}^{40} \frac{K_{U(N)}^2}{n\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

где $K_{CT} = \frac{0,47 P_{M1НОМ}}{R_X^2 X_2^2 P_{НОМ}}$ — коэффициент, учитывающий потери в меди обмотки от тока основной частоты, а также глубину проникновения тока в проводник;

для силовых трансформаторов:

$$\Delta P_{T,n} = \Delta P_{xx} \sum k_{U(n)}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{T,НОМ}}{u_{k,\%}} \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right) \quad (3.4)$$

где ΔP_{XX} , ΔP_{K3} , u_K - параметры трансформатора.

для силовых косинусных конденсаторов:

$$\Delta P_{KB} = C \omega \operatorname{tg} \delta \sum_{n=2}^{40} U_n^2 n, \quad (3.5)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора; U_n — действующее значение напряжения n-й ВГ;

для линий электропередачи:

$$\Delta P = 3 \sum_{n=2}^{40} I_n^2 r K_m,$$

5.2. Влияние несимметрии напряжения

При несимметрии в трехфазных сетях появляются дополнительные потери в элементах электросетей, сокращается срок службы ламп и электрооборудования и снижаются экономические показатели его работы.

При несимметрии напряжений в электрических машинах переменного тока возникают магнитные поля, вращающиеся не только с синхронной скоростью в направлении вращения ротора, но и в противоположном с удвоенной синхронной скоростью. В результате возникает тормозной электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев активных частей машины, главным образом, ротора за счет токов двойной частоты.

Ток I_2 обратной последовательности [4]

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{\text{ном}}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} \quad (3.6)$$

где S_{ab} и S_{bc} – однофазная нагрузка соответственно между фазами ab и bc .

Этот ток создает вращающееся магнитное поле обратной последовательности, индуцируя в цепях роторов ЭДС и токи двойной частоты, что приводит к дополнительному нагреву машины.

В АД при коэффициентах обратной последовательности напряжения, встречающихся на практике ($K_{2U} \leq 0,05—0,06$), снижение вращающего момента оказывается пренебрежимо малым. Влияние несимметрии на потери в электродвигателе и, следовательно, нагрев и сокращение срока службы изоляции его проявляются в большей мере. В целом срок службы АД при $K_{2u}-2—4\%$ сокращается на 11 % [3].

При работе электродвигателя с номинальным вращающимся моментом и коэффициентом несимметрии напряжений $K_{2U} = 4\%$, срок службы его сокращается примерно в 2 раза только за счет дополнительного нагрева. Если напряжение на одной из фаз будет значительно превышать номинальное значение, сокращение срока службы изоляции будет еще больше. Для обеспечения нормальных условий работы электродвигателей в этом случае необходимо снижать располагаемую мощность их, а при проектировании — увеличивать номинальную мощность электродвигателей, если не предусматриваются специальные мероприятия по симметрированию напряжений сети. Эти обстоятельства возникают, например, при проектировании электрифицированного железнодорожного транспорта, на горно-обогатительных и некоторых других промышленных предприятиях. Для расчета дополнительных потерь, вызванных несимметрией напряжения на вводах АД может быть использовано следующее выражение [4]:

$$\Delta P_{\text{АД}} = 2,41 \Delta P_{\text{м1ном}} K_I \varepsilon_U^2 \quad (3.7)$$

где $\Delta P_{\text{м1ном}}$ — потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; K_I — кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты; ε_U — коэффициент несимметрии напряжения в отн. ед.

При несимметрии напряжений в синхронных машинах (СМ) наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут возникать опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, в особенности при недостаточной прочности или наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 % опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают. Снижение срока службы СД при $K_{2u} = 2—4\%$ составляет 16 % [3].

Дополнительные потери мощности в СМ при несимметричной нагрузке вызывают появление местных (локальных) нагревов обмотки возбуждения, что приводит к необходимости снижать ток возбуждения и тем самым уменьшать значение реактивной мощности, выдаваемой в сеть. При этом может возникнуть необходимость снизить активную нагрузку генератора или момент на валу синхронного двигателя. Дополнительные потери в статоре СМ значительно меньше аналогичных потерь в обмотке ротора, поэтому ими обычно пренебрегают

$$\Delta P_{\text{СМ}} = \Delta P_{\text{Дном}} \frac{U_2^2}{Z_{2\text{СМ}}^2}, \quad (3.8)$$

где $\Delta P_{\text{Дном}} = 3I_{\text{НОМ}}^2 r_{2\text{Р}}$ — дополнительные потери в СМ при токе обратной последовательности, равном номинальному; $r_{2\text{Р}}$ — активное сопротивление обратной последовательности обмотки ротора; $Z_{2\text{СМ}}$ — полное сопротивление обратной последовательности СМ.

Несимметрия напряжений не оказывает заметного влияния на работу воздушных и кабельных линий, в то же время нагрев трансформаторов и, следовательно, сокращение срока их службы могут оказаться существенными. В случае несимметрии токов трансформатора нагрев масла будет несколько меньше, чем в случае симметричной нагрузки при токе фаз, равном току наиболее загруженной фазы. Это объясняется более интенсивным охлаждением обмотки этой фазы. Такие условия имеют место в сетях 6—10—35 кВ промышленных предприятий, работающих с изолированной или компенсированной нейтралью. Расчеты показывают, что при номинальной нагрузке трансформатора и коэффициенте несимметрии токов равном 10 % срок службы изоляции трансформатора сокращается на 16 %.

Дополнительные потери в силовых трансформаторах можно оценить по формуле

$$\Delta P_{\text{Т,нс}} = \left(\Delta P_{\text{xx}} + \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{u_{\text{к, \%}}} \right) \varepsilon_{\text{U}}^2 \quad (3.9)$$

где ΔP_{xx} , $\Delta P_{\text{кз}}$, $u_{\text{к}}$ — расчетные данные трансформатора.

Срок службы трансформаторов при $K_{2\text{U}} = 2—4$ % сокращается на 4 %[3].

При несимметрии линейных напряжений реактивная мощность, генерируемая батареями конденсаторов, изменяется по сравнению с номинальным значением $Q_{\text{НОМ}}$ на величину

$$\Delta Q_{\text{НОМ}} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2 (1 + \varepsilon_{\text{U}}^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} = Q_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}^2 - U_1^2}{U_{\text{НОМ}}^2}, \quad (3.10)$$

где U_1 — линейное напряжение прямой последовательности; $U_{ном}$ — номинальное напряжение батареи конденсаторов.

При $K_{2U} = 0,05—0,06$ значение $\Delta Q = (0,01—0,04)Q_{ном}$. Поскольку на практике напряжение U_1 может быть больше или меньше напряжения $U_{ном}$, то возможно как увеличение, так и уменьшение генерируемой реактивной мощности. В последнем случае в наиболее загруженной фазе значения тепловых потерь могут значительно превосходить номинальное значение, создавая местный перегрев изоляции, приводящий к сокращению срока ее службы на 20 % [3]

$$\Delta P_{кб} = Q_{ном} \operatorname{tg} \varepsilon_U, \quad (3.11)$$

где $Q_{ном}$ — номинальная мощность конденсаторной батареи (КБ); $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; ε_U — относительное значение коэффициента несимметрии.

Несимметрии напряжений и токов отрицательно влияет на работу рудно-термических печей, вызывая снижение их производительности, увеличение расхода электроэнергии и, тем самым, уменьшение КПД печи. Ухудшение основных показателей работы рудно-термических печей после некоторых граничных значений несимметрии, когда наблюдается резкое падение производительности и КПД печи при резком возрастании расхода электроэнергии. Последнее объясняется возникновением зон активного и пассивного хода реакции и, тем самым, неравномерностью распределения энергии по объему ванны печи. Увеличение напряжения обратной последовательности на 20 % приводит к снижению производительности рудно-термических печей на 30—40 % [3].

При появлении в 3-фазной сети 380 В напряжения нулевой последовательности ухудшаются режимы однофазных ЭП. Токи нулевой последовательности постоянно протекают через заземлители и значительно высушивают грунт, увеличивая сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимо для работы релейной защиты, из-за усиления воздействия токов нулевой последовательности на низкочастотные установки связи, устройства железнодорожных блокировок. При появлении токов обратной и нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах сети.

5.3. Расчет снижения срока службы электрооборудования при несинусоидальности и несимметрии напряжения

При работе электрооборудования в номинальном режиме дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения приводят к перегреву токоведущих частей выше допустимой температуры. К повышению температуры весьма чувствительна изоляция обмоток, срок службы которой снижается.

Согласно [4] прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{нс}}}{\Delta P_{\text{ном}}} \quad (3.12)$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура электрооборудования без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, °С, $\Delta P_{\text{н}}$ и $\Delta P_{\text{нс}}$ – дополнительные потери соответственно от токов высших гармоник и несимметрии напряжения.

Коэффициент снижения срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и несимметрии напряжения [4]

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} \quad (3.13)$$

Снижение срока службы электрооборудования под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности [4]

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} \quad (3.14)$$

где $t_{\text{норм}}$ – нормальный срок службы оборудования, лет.

Пример 5. Для схемы из примера 4 рассчитать дополнительные потери от токов высших гармоник и несимметрии напряжения в асинхронном двигателе и цеховом трансформаторе Т4, а также снижение срока службы из-за перегрева токами высших гармоник и токами обратной последовательности. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C.

Решение:

а) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для асинхронного двигателя.

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{м,ном}} = \frac{P_{\text{м}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi} = \frac{0,22}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,9} = 0,024 \text{ кА}$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_{\text{м}} = \frac{K_{\text{м}} U_{\text{ном}}^2}{K_{\text{I}}^2 S_{\text{ном}}} = \frac{1,2 \cdot 6^2 \cdot 0,9}{5,1^2 \cdot 0,22} = 6,8 \text{ Ом}$$

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{м,ном}} = 3 I_{\text{ном}}^2 R_{\text{м}} = 3 \cdot 24^2 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} = 11,74 \text{ кВт}$$

Дополнительные потери от токов высших гармоник считаем по формуле (3.1)

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2 \Delta P_{\text{м,ном}} K_{\text{I}}^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \frac{1}{n \sqrt{n}} \right),$$

где $k_{U(n)}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\Delta P_{\text{м,п}} = 2 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,37 \text{ кВт}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности при несимметрии напряжения считаем по (3.7)

$$\Delta P_{\text{м,нс}} = 2,41 \Delta P_{\text{м,ном}} K_{\text{I}}^2 \varepsilon_{\text{U}}^2 = 2,41 \cdot 11,74 \cdot 5,1^2 \cdot 0,03^2 = 0,66 \text{ кВт}$$

где ε_{U} – коэффициент несимметрии напряжения на шинах 6 кВ из примера 4, о.е.

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

$$\Delta\tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{\text{м,п}} + \Delta P_{\text{м,нс}}}{\Delta P_{\text{м,ном}}} = 75 \frac{0,37 + 0,66}{11,74} = 6,58^\circ\text{C}$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура двигателя без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент снижения срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 6,58 + \frac{(0,086 \cdot 6,58)^2}{2} = 0,73$$

Снижение срока службы двигателя под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,73 = 14,6 \text{ года}$$

б) Считаем дополнительные потери и снижение срока службы для цехового трансформатора Т4.

Номинальный ток трансформатора

$$I_{\text{Т4,ном}} = \frac{S_{\text{Т4}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot 6} = 0,096 \text{ кА}$$

Активное сопротивление трансформатора

$$R_{\text{Т4}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} = \frac{0,0105 \cdot 6^2}{1^2} = 0,378 \text{ Ом}$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери мощности короткого замыкания трансформатора, МВт.

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{Т4,ном}} = \Delta P_{\text{хх}} + 3I_{\text{Т4,ном}}^2 R_{\text{Т4}} = 1,9 + 3 \cdot 96^2 \cdot 0,378 \cdot 10^{-3} = 12,35 \text{ кВт}$$

где $\Delta P_{\text{хх}}$ – потери мощности холостого хода трансформатора, кВт.

Дополнительные потери от токов высших гармоник по (3.4)

$$\Delta P_{\text{Т4,п}} = \Delta P_{\text{хх}} \sum k_{\text{U(n)}}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_{\text{Т4,ном}}}{u_{\text{k,\%}}} \sum \left(k_{\text{U(n)}}^2 \frac{1}{n\sqrt{n}} \right),$$

где $k_{\text{U(n)}}$ – коэффициенты n-ной гармонической составляющей напряжения, взятые в относительных единицах. В данном случае значения выбираем из примера 1.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Т4,п}} &= 1,9 \cdot \sum (0,06^2 + 0,058^2 + 0,048^2 + 0,043^2) + \\ &+ 0,6 \cdot \frac{12,35}{0,055} \sum \left(0,06^2 \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,058^2 \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,048^2 \frac{1}{11\sqrt{11}} + 0,043^2 \frac{1}{13\sqrt{13}} \right) = 0,103 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Дополнительные потери от токов обратной последовательности по (3.9)

$$\Delta P_{T4,HC} = \left(\Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_{T4,НОМ}}{u_{k,\%}} \right) \varepsilon_U^2 = \left(1,9 + \frac{12,35}{0,055} \right) 0,03^2 = 0,2 \text{ кВт}$$

Прирост температуры от токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.12)

$$\Delta \tau = \tau_{\text{норм}} \frac{\Delta P_{T4,п} + \Delta P_{T4,HC}}{\Delta P_{T4,НОМ}} = 75 \frac{0,103 + 0,2}{12,35} = 1,86^\circ \text{C}$$

где $\tau_{\text{норм}}$ – рабочая температура трансформатора без воздействия токов высших гармоник и токов обратной последовательности, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент снижения срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.13)

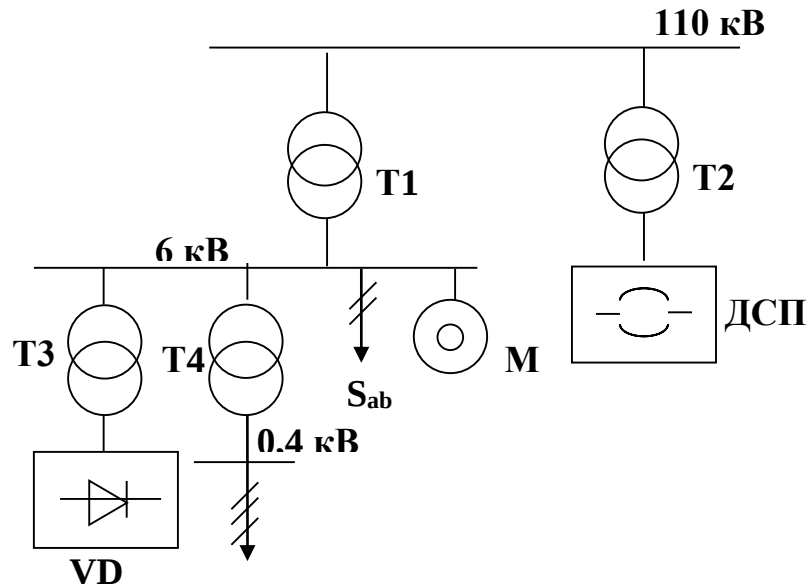
$$\frac{\Delta t}{t} = 0,086\Delta\tau + \frac{(0,086\Delta\tau)^2}{2} = 0,086 \cdot 1,86 + \frac{(0,086 \cdot 1,86)^2}{2} = 0,17$$

Снижение срока службы трансформатора под воздействием токов высших гармоник и токов обратной последовательности по (3.14)

$$\Delta t = t_{\text{норм}} \frac{\Delta t}{t} = 20 \cdot 0,17 = 3,45 \text{Года}$$

Задание на контрольную работу

Для заданной схемы рассчитать коэффициенты n -ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несинусоидальности на шинах 110 и 6 кВ, дополнительные потери мощности и снижение срока службы цехового трансформатора Т4 и асинхронного двигателя М из-за перегрева токами высших гармоник и несимметрии напряжения. Нормальный срок службы принять 20 лет. Рабочая температура 75°C.



Исходные данные:

С: $S_{кз,110}$ – по таблице; $S_{кз,6}=170$ МВА; $S_{кз,0,4}=3$ МВА

Т2: $S_{Т2}=50$ МВА; $U_{ном}=110$ кВ

Т3: $S_{Т3}=10$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=10,5\%$

Т4: $S_{Т4}=1$ МВА; $U_{ном}=6$ кВ; $u_{к,\%}=5,5\%$; $\Delta P_{кз}=10,5$ кВт; $\Delta P_{xx}=1,9$ кВт

М: P_M – по таблице; $\cos \varphi=0,9$; $K_M=1,2$; $K_I=5,1$

VD: $S_{пр}=8$ МВА; $\cos \varphi=0,8$; $m=6$

Н: $S_{нагр}=2$ МВА; $S_{ab}=4$ МВА

Данные по шифру зачетной книжки

Предпоследняя цифра	$S_{кз,110}$, МВА	Последняя цифра	P_M , кВт
0	1500	0	200
1	1600	1	210
2	1700	2	220
3	1800	3	230
4	1900	4	240
5	2000	5	250
6	2100	6	260
7	2200	7	270
8	2300	8	280
9	2400	9	290

Рекомендуемая литература

5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.: ил. – (Экономия топлива и электроэнергии).
7. Карташов И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / Под ред. М.А. Калугиной. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с., ил.
8. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977 г. 128 с.: ил.