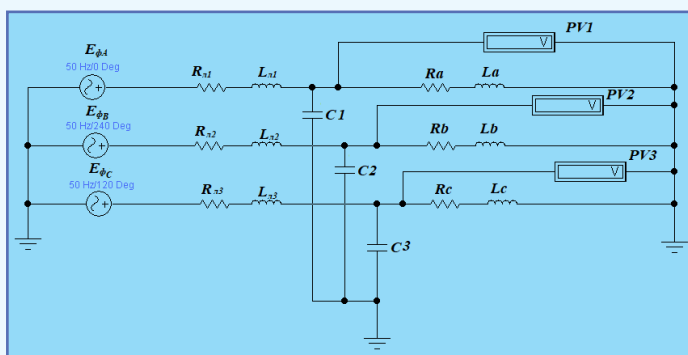


М.Н. Третьякова, С.В. Шлыков

## ПОКАЗАТЕЛИ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электронное учебно-методическое пособие



Источник  
питания 1

Линия передачи

Приемник 1

Приемник 1

УДК 621.3

ББК 31.22

Рецензенты:

д-р техн. наук, главный специалист дирекции  
по проектированию электрооборудования и систем автомобиля  
службы исполнительного вице-президента по инжинирингу

ПАО «АВТОВАЗ» *П.А. Николаев;*

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение  
и электротехника» Тольяттинского государственного университета

*В.Н. Кузнецов.*

Третьякова, М.Н. Показатели и контроль качества электрической энергии : электронное учебно-методическое пособие / М.Н. Третьякова, С.В. Шлыков. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2020. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1540-1.

Пособие направлено на формирование компетентности обучающихся по вопросам нормирования, анализа и обеспечения качества электрической энергии. Может быть использовано для проведения лабораторных и практических занятий по дисциплине «Показатели и контроль качества электрической энергии».

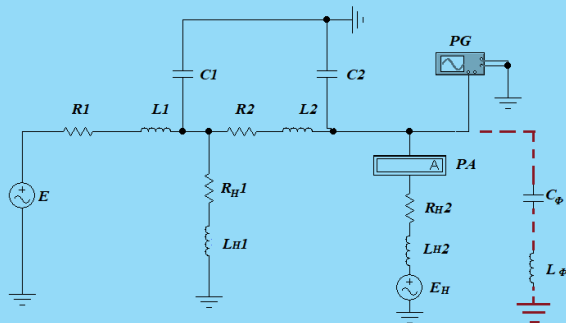
Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника», очной и заочной форм обучения.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2020



Редактор *О.И. Елисева*  
 Корректор *Ю.С. Елисева*  
 Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
 Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
 Художественное оформление,  
 компьютерное проектирование: *Г.В. Карасева*

Дата подписания к использованию 18.08.2020.

Объем издания 2 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-11-19.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

Список сокращений .....	6
Введение .....	7
Методические рекомендации по организации самостоятельной работы при выполнении лабораторных и практических работ .....	9
Лабораторная работа 1. Моделирование электроприемников и систем электропитания .....	10
Лабораторная работа 2. Исследование влияния отклонения частоты на работу электроприемников .....	18
Лабораторная работа 3. Исследование влияния режимов нагрузки на отклонение напряжения в электрической сети .....	25
Лабораторная работа 4. Исследование несинусоидальности напряжения в электрической сети .....	32
Лабораторная работа 5. Регулирование напряжения в сети путем поперечной компенсации реактивной мощности .....	43
Лабораторная работа 6. Регулирование напряжения путем продольной компенсации реактивной мощности .....	50
Лабораторная работа 7. Компенсация высших гармоник с помощью фильтрокомпенсирующего устройства .....	56
Практическая работа 1. Расчет отклонений напряжения в электросети .....	63
Практическая работа 2. Определение требуемых уровней напряжения в контрольных точках .....	69

Практическая работа 3. Оценка несинусоидальности сетевое напряжения .....	74
Практическая работа 4. Оценка несимметрии напряжения в трехфазной системе переменного тока .....	81
Практическая работа 5. Обработка результатов контроля качества электроэнергии .....	90
Практическая работа 6. Определение параметров технических средств по регулированию напряжения .....	95
Заключение .....	99
Библиографический список .....	100

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВЛ – воздушная линия

КЛ – кабельная линия

КЭ – качество электроэнергии

ПБВ – переключение без возбуждения

ПКЭ – показатель качества электроэнергии

РПН – регулирование под нагрузкой

ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство

ЦП – центр питания

ЭМП – электромагнитная помеха

ЭП – электроприемник

УПК – устройство продольной компенсации

ЭДС – электродвижущая сила

## ВВЕДЕНИЕ

Данное методическое пособие входит в состав учебно-методического комплекса дисциплины «Показатели и контроль качества электрической энергии». Курс относится к обязательным дисциплинам учебного плана подготовки бакалавров по направлениям 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

На освоение дисциплины отводится 144 часа, в том числе:

- лекции – 16 часов;
- лабораторные занятия – 18 часов;
- практические занятия – 18 часов;
- контроль (экзамен) – 36 часов.

Цель дисциплины – формирование готовности бакалавров к профессиональной деятельности в сфере энергетики, электротехники и электроники за счет знакомства с вопросами нормирования, анализа и обеспечения качества электрической энергии.

Для достижения поставленной цели в процессе освоения курса обучающиеся должны решить следующие задачи:

- получить представление о нормативно-правовой базе по качеству электроэнергии;
- ознакомиться с основными показателями и методами контроля качества электроэнергии;
- изучить методы анализа качества электроэнергии;
- сформировать представление об основных методах нормализации качества электроэнергии.

В результате освоения курса обучающиеся должны

✓ *знать:*

- основные нормативно-правовые документы в области качества электроэнергии;
- аппарат теоретического и экспериментального исследования в области качества электрической энергии;
- основные приемы моделирования простейших систем электропитания и электроприемников;
- о проблеме электромагнитной совместимости электроприемников и систем электропитания;

✓ *уметь*:

- пользоваться стандартами в области качества электроэнергии;
- использовать физико-математический аппарат при проведении исследований качества электроэнергии;
- составлять модели электрических схем с использованием современных программных средств;
- использовать средства современной измерительной и вычислительной техники, информационные технологии при определении и оценке показателей качества электроэнергии;

✓ *владеть навыками*:

- использования стандартов для оценки качества электроэнергии;
- анализа результатов исследований качества электрической энергии;
- моделирования простейших систем электроснабжения и электроприемников;
- использования средств измерительной и вычислительной техники и информационных технологий при определении и оценке показателей качества электроэнергии.

Учебно-методическое пособие включает методические рекомендации по выполнению 7 лабораторных и 6 практических работ.

Выполнение каждой работы рассчитано на два академических часа.

Для контроля усвоения учебного материала применяется накопительная балльно-рейтинговая система оценки успеваемости. Баллы, выставяемые за каждую из выполненных работ, прописываются в технологической карте дисциплины, актуализируемой перед началом учебного семестра.



## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

При выполнении каждой из работ рекомендуется придерживаться следующего порядка:

- 1) ознакомиться с краткими теоретическими сведениями по предмету выполняемой работы;
- 2) ознакомиться с программой работы;
- 3) ознакомиться с методическими указаниями по проведению экспериментальных исследований или расчетов;
- 4) выполнить работу в соответствии с заданным вариантом;
- 5) проанализировать результаты и сформулировать выводы;
- 6) оформить отчет о лабораторной или практической работе;
- 7) защитить отчет по лабораторной или практической работе.

Вариант лабораторной или практической работы задается по первой букве фамилии.

### *Выбор варианта*

Первая буква фамилии	А, Б	В, Г	Д–З	И, К	Л, М	Н, О	П, Р	С, Т	У–Х	Ц–Я
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Отчеты по работам выполняются на листах белой бумаги формата А4 в печатном или рукописном виде с учетом правил оформления текстовых документов по ГОСТ 7.32–2017 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

## Лабораторная работа 1

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Цель работы** – получить представление о приемах моделирования электроприемников и систем электроснабжения.

### **Задачи работы:**

- 1) ознакомиться с пакетом прикладных программ Electronics Workbench и компонентами библиотек Sources, Basic, Indicators и Instruments;
- 2) в соответствии с вариантом задания построить схему моделирования системы электроснабжения;
- 3) осуществить моделирование процессов передачи электроэнергии и работы электроприемников.

### **Краткие теоретические сведения**

Моделирование широко применяется при исследованиях отдельных элементов и систем электроснабжения в целом. При этом вместо реальных объектов исследуются заменяющие их электрические схемы.

Электрическая схема, составленная для расчета режима работы реальной электрической цепи, имеющая идентичное с ней математическое описание, называется схемой замещения. При использовании схем замещения исследование работы сложных систем значительно упрощается и сводится к анализу относительно простых электрических цепей.

Основу схем замещения составляют резистивный ( $r$ ), индуктивный ( $L$ ) и емкостной ( $C$ ) элементы. Активное сопротивление  $r$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$  являются пассивными схемными элементами. К активным схемным элементам относятся источники энергии различных типов.


Простейшим инструментом для проведения исследований на схемах замещения является пакет прикладных программ *Electronics Workbench*. Преимуществом этой программы является то, что она легко осваивается и достаточно проста в работе. Данная программа содержит необходимые блоки моделирования и комбинацию кон-


трольно-измерительных приборов, по внешнему виду и техническим характеристикам приближенных к их промышленным аналогам.


Для проведения виртуальных экспериментов по дисциплине «Показатели и контроль качества электрической энергии» необходимо ознакомиться с несколькими библиотеками и компонентами программы.

1. Библиотека  – *Basic* (базовые компоненты):


• (*Connector*) – соединяющий узел, предназначенный для создания контрольных точек и соединения нескольких проводников;


 (*Resistor*) – резистор  $r$ , активное сопротивление которого может быть задано в омах, килоомах и мегаомах;


 (*Inductor*) – катушка индуктивности  $L$ . Индуктивность может устанавливаться в генри, миллигенри и микрогенри;

 (*Capacitor*) – конденсатор  $C$ , единицы измерения его электрической ёмкости – фарада, милли-, микро-, нано- и пикофарада;


 (*Switch*) – управляемый клавишей ключ.

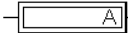
2. Библиотека  – *Sources* (источники):

 (*Ground*) – элемент «заземление»; обладает нулевым напряжением и используется как точка отсчета потенциалов;


 (*AC Voltage Source*) – источник переменного напряжения, задаваемого в вольтах, милли-, микро- и киловольтах с частотой в герцах, кило- и микрогерцах.


3. Библиотека  – *Indicators* (индикаторы или приборы):

 (*Voltmeter*) – вольтметр, который может применяться для измерения постоянного и переменного напряжения. При двойном щелчке по ярлычку прибора открывается диалоговое окно. Здесь задается величина внутреннего сопротивления вольтметра (по умолчанию 1 МОм) и вид измеряемого напряжения (*DC* – постоянное, *AC* – переменное). При измерении переменного синусоидального напряжения выбирается режим работы прибора *AC*. При этом вольтметр показывает действующее значение напряжения. Для измерения вольтметром постоянного напряжения устанавливается режим работы *DC*. При этом принимается во внимание, что отрицательная клемма соответствует выделенной жирной линией стороне прямоугольного изображения прибора;

 (*Ammeter*) – амперметр, который также применяется для измерения постоянного и переменного тока. Отмеченная толстой линией сторона изображения прибора – его отрицательная клемма. В диалоговом окне прибора задаются величина внутреннего сопротивления амперметра (по умолчанию 1 мОм) и вид измеряемого тока (*DC* – постоянный, *AC* – переменный). В цепи переменного напряжения амперметр показывает действующее значение тока.

4. Библиотека  – *Instruments* (инструменты):

 (*Function Generator*) – функциональный генератор. Представляет собой идеальный источник напряжения, предназначен для генерирования сигналов синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы. Средний вывод генератора заземляется. Крайние выводы предназначены для подачи напряжения на исследуемую схему с соответствующим знаком относительно нуля. Форму выходного сигнала можно варьировать путем задания требуемых характеристик в диалоговом окне генератора;

 (*Oscilloscope*) – осциллограф, имитируемый программой *Electronics Workbench*, который представляет собой аналог двухлучевого запоминающего осциллографа и имеет две модификации: простую и расширенную. Расширенная модификация по своим возможностям приближается к лучшим цифровым запоминающим осциллографам. Из-за того что расширенная модель занимает много места на рабочем поле, рекомендуется начинать исследования с простой модели, а для подробного исследования процессов использовать расширенную модель.

На изображении осциллографа имеется четыре входных зажима:

- правый верхний зажим – общий;
- правый нижний зажим – вход синхронизации;
- нижние левый и правый зажимы – это входы канала *A* и канала *B* соответственно.

Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению прибора открывается окно простой модели осциллографа с кнопками управления и экраном.

Клавиша *Expand* на панели простой модели открывает окно расширенного осциллографа. Панель расширенного осциллографа

располагается под экраном. Здесь имеются три информационных табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном находится кнопка прокрутки, позволяющая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы.

На экране осциллографа располагаются два курсора, обозначаемые цифрами 1 и 2. С их помощью можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого необходимо просто перетащить мышью курсоры за треугольники в их верхней части в требуемое положение. Координаты точек пересечения первого курсора с осциллограммами отображаются на левом табло, координаты второго курсора – на среднем табло. На правом табло отображаются значения разностей между соответствующими координатами курсоров.

### **Методические указания по выполнению работы**

#### **Описание схемы электрической сети**

Наиболее обобщенная электрическая сеть состоит из источника и приемника электрической энергии и связывающей их между собой линии передачи (рис. 1.1).

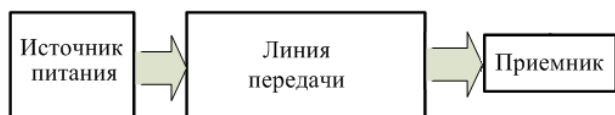


Рис. 1.1. Структурная схема обобщенной электрической сети

Схема замещения электрической сети кроме источника питания должна содержать элементы, адекватно характеризующие режимы работы приемника и линии передачи. Как известно, преобразование электрической энергии в тепловую характеризует резистор. Изменения энергии электрических и магнитных полей отражают емкость и индуктивность. Если отдельные процессы выражены слабо, то соответствующими элементами электрических схем можно пренебречь.

Большинство приемников электрической энергии представляют собой активно-индуктивную нагрузку, поэтому при моделировании

их обычно замещают активными сопротивлениями и индуктивностями (рис. 1.2, а).

Схемы замещения линий передач (рис. 1.2, б) могут содержать:

- продольные активные сопротивления  $r_{л}$ , характеризующие тепловые потери в проводах и кабелях (варианты 1, 2 и 3);
- продольные индуктивные сопротивления  $x_{л}$ , обусловленные магнитными полями вокруг проводников с током и эффектом возникновения ЭДС самоиндукции (варианты 1, 2 и 3);
- поперечные активные проводимости  $G_{л}$ , вызванные потерями от несовершенства изоляции, ионизации воздуха и коронирования проводов (вариант 3);
- поперечные емкостные проводимости  $B_{л}$ , отражающие наличие емкости между проводами (или оболочкой кабеля) и землей (варианты 2 и 3).

Обычно полагают, что параметры линии передачи ( $r_{л}$ ,  $x_{л}$ ,  $G_{л}$ ,  $B_{л}$ ) равномерно распределены по ее длине. На небольших участках линий распределенность параметров не учитывают и используют сосредоточенные активное и реактивное сопротивление линии, ее активную и емкостную проводимости.

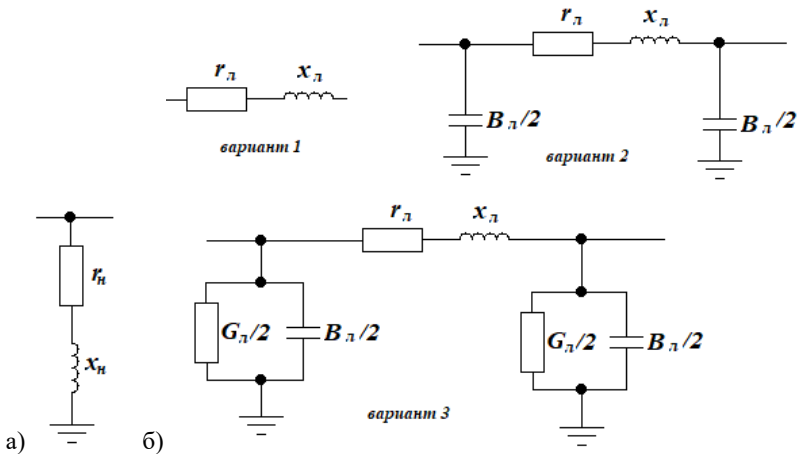


Рис. 1.2. Схемы замещения:

а – активно-индуктивной нагрузки; б – линии передачи

Активное и индуктивное сопротивления линии зависят от ее длины и величины удельных сопротивлений, Ом:

$$r_{л} = r_0 \cdot l; \quad (1.1)$$

$$x_{л} = x_0 \cdot l = \omega \cdot L, \quad (1.2)$$

где  $r_0$  и  $x_0$  – удельные активные и индуктивные сопротивления линии при температуре провода  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Ом/км;  $l$  – длина линии, км;  $\omega$  – угловая частота питающего напряжения, Гц,  $\omega = 2\pi \cdot f$ , промышленной частоте  $f = 50$  Гц соответствует угловая частота, равная 314 Гц ( $\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ );  $L$  – индуктивность линии, Гн.

Активная проводимость линии, См,

$$G_{л} = G_0 \cdot l, \quad (1.3)$$

где  $G_0 = \frac{1}{r_0}$  – удельная активная проводимость линии, См/км.

Емкостная проводимость линии, См,

$$B_{л} = B_0 \cdot l = 1/x_{л}, \quad (1.4)$$

где  $x_{л} = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$  – емкостное сопротивление линии, Ом;  $C$  – емкость линии, Ф.

### Выполнение компьютерного моделирования

1. Соберите компьютерную модель простейшей электрической сети (рис. 1.3), используя следующие виртуальные компоненты:

- источники питания синусоидального напряжения (библиотека *Sources – AC Voltage Source*);
- модели линии передач электрической энергии и электроприемников – резистор, индуктивности и емкость (библиотека *Basic – Resistor, Inductor, Capacitor*);
- виртуальные измерительные приборы (библиотека *Indicators – Ammeter, Voltmeter*).

2. Установите параметры элементов в соответствии с вариантом задания.

3. Проведите моделирование. Снимите показания приборов и занесите их в таблицу результатов.

4. Определите параметры нагрузки экспериментальным и расчетным путем. Проанализируйте результаты.

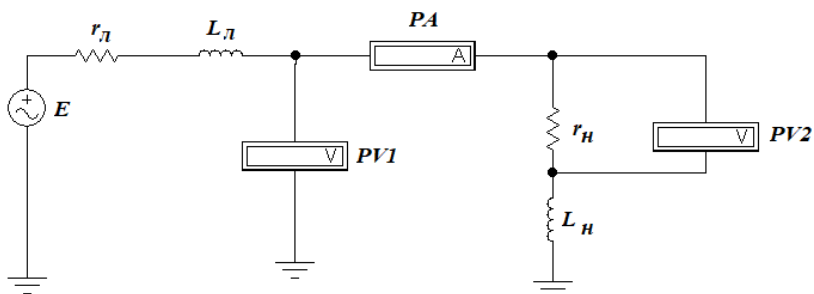


Рис. 1.3. Исследуемая электрическая цепь

### Варианты задания

Номер варианта	Параметры источника питания $E$ , кВ / $f$ , Гц	Параметры линии		Параметры приемника	
		$L$ , мГн	$r_L$ , Ом	$r_H$ , кОм	$L_H$ , мГн
1	6 / 50	65	250	0,8	190
2	35 / 50	130	500	1,4	450
3	110 / 50	150	560	2,2	630
4	220 / 50	190	500	3,4	670
5	330 / 50	380	300	4,5	700
6	500 / 50	450	100	5,2	940
7	110 / 50	120	85	5,5	1000
8	220 / 50	220	150	6,5	950
9	330 / 50	350	180	7,0	1200
10	500 / 50	400	130	8,5	1400

### Таблица результатов

Результаты расчета			Результаты эксперимента					
$x_H$ , кОм	$z_H$ , кОм	$\cos \varphi$	$I$ , А	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$S_H$ , кВА	$P_H$ , кВт	$\cos \varphi$

#### Примечания

- Соединение элементов схемы проводниками выполняется с помощью мыши. Указатель мыши подводится к выводу одного



соединяемого элемента. При нажатой левой кнопке мыши указатель подводится к выводу другого соединяемого элемента. При отпуске левой кнопки мыши элементы оказываются соединенными сплошной черной линией, имитирующей проводник.

- Удаление выделенного компонента осуществляется командой *Delete*.
- Необходимые параметры элементов задаются в диалоговом окне, которое открывается при выделении пиктограммы настраиваемого объекта и двойном щелчке по нему левой кнопкой мыши.
- Включение собранной схемы в работу осуществляется нажатием левой кнопки мыши при курсоре, наведенном на клавишу выключателя, изображенного в правом верхнем углу рабочего экрана программы.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Таблица расчетных и экспериментальных данных.
5. Выводы.
6. Источники информации.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой схема замещения электрической цепи?
2. Какие элементы электрических цепей обычно используются для схем замещения приемников электрической энергии? Почему?
3. Какие элементы электрических цепей обычно используются для схем замещения линий передач? Почему?
4. Какой элемент электрической цепи используется для характеристики тепловых потерь в проводниках?
5. Какой элемент электрической цепи используется для характеристики взаимодействия магнитного поля с проводником?

## **Лабораторная работа 2**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ЧАСТОТЫ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ**

**Цель работы** – сформировать представление о влиянии отклонений частоты на работу электроприемников.

#### **Задачи работы:**

- 1) ознакомиться с показателями и нормами качества электроэнергии, относящимися к частоте сетевого напряжения, установленными ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»;
- 2) провести исследование влияния отклонения частоты напряжения в сети на работу электроприемников.

#### **Краткие теоретические сведения**

Частота  $f$  является важнейшим параметром режима работы системы электроснабжения общего назначения, характеризующим соответствие между потреблением и производством электроэнергии. При равенстве вырабатываемой и потребляемой активной мощности частота в сети постоянна ( $f = \text{const}$ ). Появление дисбаланса между ними приводит к изменению частоты напряжения в электросети. Основными источниками возникновения колебаний частоты являются мощные приемники электроэнергии с быстроизменяющейся резкопеременной активной нагрузкой. Так, при работе прокатных станов их активная мощность изменяется от нуля до максимального значения за время менее 0,1 с. Это вызывает существенные колебания потребляемой активной мощности и приводит к отклонениям частоты сетевого напряжения, достигающим больших значений.

Изменение частоты даже в небольших пределах негативно влияет на работу электросетей и приемников электроэнергии. Например, понижение частоты приводит к увеличению потерь в элементах сетей и установках, к уменьшению скорости вращения асинхронных электроприводов и к снижению производительности производственных механизмов.

Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети  $f_{nom}$  составляет 50 Гц. Отклонение частоты от номинального значения нормируется.

Показателем качества электроэнергии, относящимся к частоте, является отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, обозначаемое  $\Delta f$  и измеряемое в герцах (Гц). Отклонение частоты определяется по формуле

$$\Delta f = f_m - f_{nom},$$

где  $f_m$  — значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, усредненное в интервале времени 10 с.

Для указанного показателя качества электроэнергии (ПКЭ) установлены нормально и предельно допустимые отклонения от номинального значения. В соответствии с ними отклонение частоты  $\Delta f$  в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать:

- $\pm 0,2$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю (нормально допустимое  $\Delta f$ );
- $\pm 0,4$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю (предельно допустимое  $\Delta f$ ).

Отклонение частоты  $\Delta f$  в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, т. е. не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать:

- $\pm 1$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю (нормально допустимое  $\Delta f$ );
- $\pm 5$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю (предельно допустимое  $\Delta f$ ).

Установленные стандартом (ГОСТ 32144–2013) нормы связаны с методами контроля и обработки результатов измерений качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. В большинстве случаев **контроль показателей качества (ПКЭ) проводится в течение 7 суток (168 часов = 1 неделя)**. Результаты измерений усредняются за период времени в 10 с. Полученный за неделю контроль массив данных обрабатывается с применением методов теории вероятности и математической статистики. Нормально допустимые отклонения ПКЭ не должны выходить за границы уста-

новленного стандартом диапазона с вероятностью в 95 %, а предельно допустимые отклонения ПКЭ должны находиться в заданном интервале значений с вероятностью, равной 100 %.

### Методические указания по выполнению работы

#### Описание схемы электрической сети

Исследуемая электрическая сеть представляет собой разомкнутую систему с односторонним питанием (рис. 2.1).

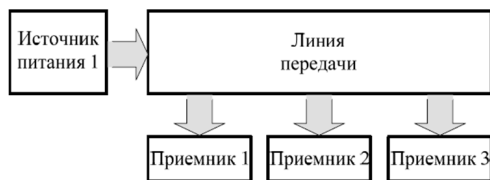


Рис. 2.1. Структурная схема исследуемой сети

Схема замещения отдельного участка линии передачи до узла подключения соответствующего электроприемника состоит из активного сопротивления ( $R1$ ,  $R2$  или  $R3$ ) и индуктивности ( $L1$ ,  $L2$  или  $L3$ ). Каждый из электроприемников, являющийся для сети активно-индуктивной нагрузкой, также заменяется активным сопротивлением ( $R4$ ,  $R5$  или  $R6$ ) и индуктивностью ( $L4$ ,  $L5$  или  $L6$ ) (рис. 2.2).

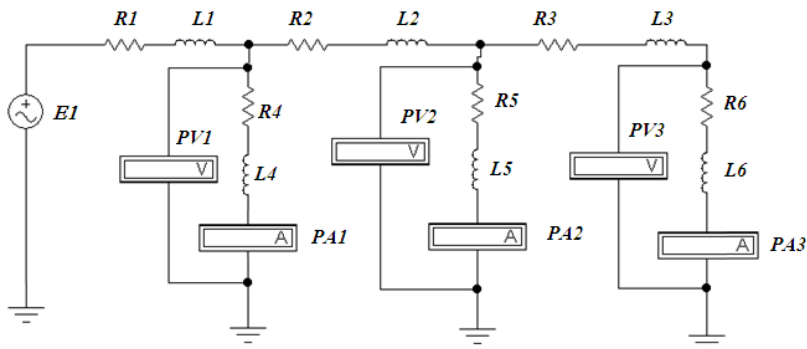


Рис. 2.2. Компьютерная модель исследуемой сети

Для контроля среднеквадратических значений напряжений и токов приемников используются вольтметры  $PV1$ ,  $PV2$ ,  $PV3$  и амперметры  $PA1$ ,  $PA2$ ,  $PA3$  соответственно.

### **Выполнение компьютерного моделирования**

1. Соберите компьютерную модель в рабочем окне программы *Electronics Workbench*, используя следующие виртуальные компоненты:

- источник синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – источник ЭДС частотой 50 Гц);
- модели линии передач электрической энергии и нагрузки – резистор и индуктивности (библиотека *Basic* – резистор, индуктивность);
- виртуальные измерительные приборы (библиотека *Indicators*) – вольтметры, амперметры. Режим работы измерительных приборов – *AC*.

2. Установите параметры элементов в соответствии с вариантом задания.

3. Проведите виртуальный эксперимент. Снимите показания приборов, изменяя частоту источника питания от 45 до 55 Гц с шагом в 1 Гц. Результаты эксперимента занесите в таблицу.

4. Определите отклонения частоты  $\Delta f$  и полную мощность электроприемников  $S$ .

5. Постройте зависимость  $S = f(\Delta f)$ .

6. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

### Варианты задания

Номер варианта	Параметры источника $\psi = 0^\circ$	Параметры линии передач			Параметры элементов приемников		
		$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$R3$ , Ом	$R4$ , Ом	$R5$ , Ом	$R6$ , Ом
	$E_1$ , В	$L1$ , мГн	$L2$ , мГн	$L3$ , мГн	$L4$ , мГн	$L5$ , мГн	$L6$ , мГн
1	220	0,4	0,4	0,4	360	360	360
		100	100	100	300	300	300
2	240	0,5	0,5	0,5	400	400	400
		80	80	80	200	150	150
3	230	0,8	0,8	0,8	350	400	400
		100	100	100	250	250	250
4	380	0,8	0,8	0,8	450	500	500
		150	150	100	250	200	250
5	110	0,2	0,2	0,2	200	250	250
		50	50	50	80	100	80
6	400	1	1	0,8	500	500	550
		200	180	150	200	150	200
7	127	0,3	0,3	0,2	300	380	400
		60	80	60	150	180	150
8	660	1,2	1,2	1	600	650	550
		150	100	80	200	250	300
9	690	1,0	0,8	0,8	450	500	500
		150	80	80	180	200	150
10	380	1	1	1	300	300	300
		100	100	100	450	450	450

### Результаты исследования

$f, \Gamma_{II}$	Приемник 1		Приемник 2		Приемник 3		$\Delta f, \Gamma_{II}$	$S_1, \text{BA}$	$S_2, \text{BA}$	$S_3, \text{BA}$
	$I_1, \text{A}$	$U_1, \text{B}$	$I_2, \text{A}$	$U_2, \text{B}$	$I_3, \text{A}$	$U_3, \text{B}$				
45										
46										
47										
48										
49										
50										
51										
52										
53										
54										
55										

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования (таблица и график).
5. Выводы.
6. Источники информации.

### Контрольные вопросы

1. Чему равна номинальная частота напряжения в электрической сети общего назначения?
2. Каковы причины, приводящие к отклонению частоты напряжения в сети общего назначения от номинального значения?
3. В каких пределах может изменяться частота напряжения в синхронизированных сетях электроснабжения общего назначения?
4. В каких пределах может изменяться частота напряжения в системах электроснабжения с автономными генераторами?
5. Укажите величину нормально допустимого отклонения частоты в единой энергосистеме.
6. Укажите величину предельно допустимого отклонения частоты в единой энергосистеме.
7. Укажите величину предельно допустимого отклонения частоты в автономной системе электроснабжения.
8. Укажите величину нормально допустимого отклонения частоты в автономной системе электроснабжения.
9. Как изменяется величина потерь электроэнергии в электроприемнике при снижении частоты сетевого напряжения?
10. С помощью каких технических средств поддерживают частоту сетевого напряжения в нормируемом диапазоне?



### Лабораторная работа 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ НАГРУЗКИ НА ОТКЛОНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Цель работы** — сформировать представление о влиянии режимов нагрузки на отклонение напряжения в сети электроснабжения.

#### **Задачи работы:**

- 1) ознакомиться с показателями и нормами качества электроэнергии, относящимися к напряжению, установленными ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»;
- 2) исследовать влияние режимов нагрузки на отклонение напряжения в электрической сети.

#### **Краткие теоретические сведения**

Отклонения напряжения от номинальных значений происходят из-за суточных, сезонных и технологических изменений электрической нагрузки потребителей, изменения мощности компенсирующих устройств, регулирования напряжения генераторами электростанций и трансформаторами на подстанциях энергосистем, изменения схемы и параметров электрических сетей. Уровень напряжения в сетях среднего и высокого напряжения определяется в основном балансом генерируемой и потребляемой реактивной мощности. Напряжение в узлах сети меняется в первую очередь под воздействием подключенных электроприемников. Отклонение напряжения от номинального значения отрицательно влияет на технико-экономические показатели электроприемников.

Медленные изменения напряжения (длительностью более одной минуты) нормируются. Показателями качества электроэнергии, характеризующими уровень напряжения в сети, являются отрицательное ( $\delta U_{(-)}$ ) и положительное ( $\delta U_{(+)}$ ) отклонения напряжения. Положительное и отрицательное отклонения напряжения выражаются в процентах и представляют относительную разность между фактическим и номинальным (или согласованным) напряжением:

$$\delta U_{(-)} = \left[ \frac{U_0 - U_{m(-)}}{U_0} \right] \cdot 100 \% ; \quad (3.1)$$

$$\delta U_{(+)} = \left[ \frac{U_{m(+)} - U_0}{U_0} \right] \cdot 100 \% , \quad (3.2)$$

где  $U_0$  – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению  $U_{nom}$  или согласованному напряжению  $U_c$  электропитания, В;  $U_{m(-)}$ ,  $U_{m(+)}$  – значения напряжения электропитания, В, меньше  $U_0$  и больше  $U_0$  соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин.

По действующему стандарту на рассматриваемые ПКЭ установлены только предельно допустимые нормативы: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

### Методические указания по выполнению работы

#### Описание схемы электрической сети

Исследуемая электрическая сеть представляет собой разомкнутую систему с односторонним питанием (рис. 3.1). Приемники присоединены к линии электропередачи.

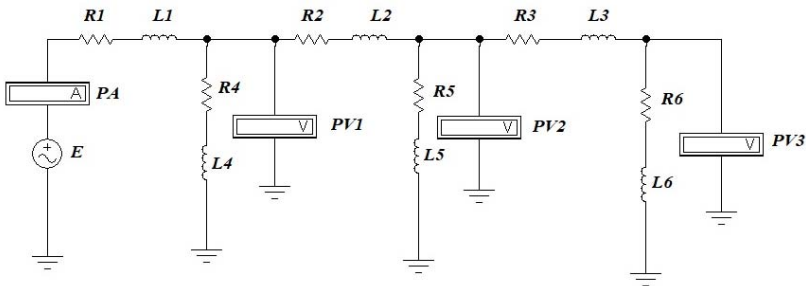


Рис. 3.1. Компьютерная модель исследуемой сети

Компьютерная модель исследуемой сети имеет вид, представленный на рис. 3.1. Схема замещения линии электропередачи состоит из трех участков, характеризующихся активными сопротивлениями

ями  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  и индуктивностями  $L1$ ,  $L2$  и  $L3$ . Электроприемники представляют собой активно-индуктивную нагрузку. Элементами схемы замещения каждого из трех нагрузочных устройств являются  $R4$ ,  $R5$ ,  $R6$  и  $L4$ ,  $L5$ ,  $L6$  соответственно. Контроль напряжения в точках присоединения нагрузки осуществляется вольтметрами  $PV1$ ,  $PV2$ ,  $PV3$ . Для питания схемы используется источник синусоидального напряжения  $E$ .

### **Выполнение компьютерного моделирования**

1. Соберите компьютерную модель в рабочем окне программы *Electronics Workbench*, используя следующие виртуальные компоненты:

- источник питания синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – источник ЭДС частотой 50 Гц);
- модели линии передач электрической энергии и электроприемников – резистор и индуктивности (библиотека *Basic* – резистор, индуктивность);
- виртуальные измерительные приборы (библиотека *Indicators* – амперметр и вольтметры).

2. Установите параметры элементов в соответствии с вариантом задания.

3. Задайте режим работы измерительных приборов *AC*.

4. Установите заданную комбинацию включенных и отключенных электроприемников (табл. 3.1, столбцы 2–4), моделирующих изменения режимов работы сети. Показания амперметра и вольтметров занесите в столбцы 5–8 табл. 3.1 соответственно.

5. Определите величину отрицательных отклонений напряжения. Результаты занесите в столбцы 9–11 табл. 3.1.

6. Подсоедините все электроприемники. Увеличьте напряжение на источнике питания до значения, при котором показания вольтметра  $PV1$  станут равными номинальному напряжению источника питания  $E$ .

7. Установите заданную комбинацию электроприемников (табл. 3.2, столбцы 2–4), подсоединив или отключив их соответственно, моделируя изменения нагрузки и режимов работы сети. Показания амперметра и вольтметров занесите в столбцы 5–8 табл. 3.2.

8. Определите величину положительных отклонений напряжения (столбцы 9–11 табл. 3.2).

9. Результаты экспериментов представьте в графической форме (рис. 3.2, *а* или *б*). По горизонтальной оси расположите электроприемники по мере их удаления от источника питания, предполагая, что участок линии передачи длиной 10 км имеет индуктивность, равную примерно 12,5 мГн. По оси ординат в точках подключения каждого из электроприемников отложите значения отрицательных или положительных отклонений напряжения соответственно. Соедините между собой точки диаграммы, соответствующие одинаковым значениям нагрузочного тока.

10. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

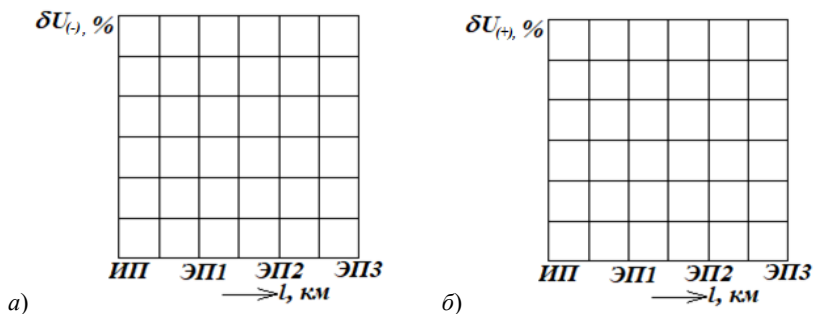


Рис. 3.2. Отклонения напряжения в исследуемой сети:  
*а* – отрицательные; *б* – положительные

### Варианты задания

Номер вар.	Параметры источника напряжения $E$	Параметры линии передачи			Параметры электроприемников		
		$R1, \text{ Ом} / L1, \text{ мГн}$	$R2, \text{ Ом} / L2, \text{ мГн}$	$R3, \text{ Ом} / L3, \text{ мГн}$	$R4, \text{ Ом} / L4, \text{ мГн}$	$R5, \text{ Ом} / L5, \text{ мГн}$	$R6, \text{ Ом} / L6, \text{ мГн}$
1	230 В, $f = 50 \text{ Гц}$	1 / 12,5	1 / 12,5	1 / 12,5	100 / 200	100 / 200	100 / 200
2	230 В, $f = 50 \text{ Гц}$	1 / 25	1 / 25	1 / 25	100 / 200	100 / 200	100 / 200
3	230 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,7 / 12,5	0,7 / 12,5	0,7 / 12,5	50 / 100	50 / 100	50 / 100
4	220 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,5 / 25	0,5 / 25	0,5 / 25	50 / 50	50 / 50	50 / 50
5	220 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,5 / 12,5	0,5 / 12,5	0,5 / 12,5	50 / 50	50 / 50	50 / 50
6	220 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,3 / 12,5	0,3 / 12,5	0,3 / 12,5	50 / 50	50 / 50	50 / 50
7	110 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,3 / 25	0,3 / 25	0,3 / 25	50 / 40	50 / 40	50 / 40
8	110 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,2 / 12,5	0,2 / 12,5	0,2 / 12,5	50 / 40	50 / 40	50 / 40
9	110 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,2 / 25	0,2 / 25	0,2 / 25	30 / 40	30 / 40	30 / 40
10	380 В, $f = 50 \text{ Гц}$	0,7 / 25	0,7 / 25	0,7 / 25	50 / 50	50 / 50	50 / 50

Таблица 3.1

Влияние режимов работы электроприемников  
на отрицательное отклонение напряжения

Но- мер п/п	Режимы электро- приемников			$I_H, A$	$U_1, B$	$U_2, B$	$U_3, B$	$\delta U_{1(-)},$ %	$\delta U_{2(-)},$ %	$\delta U_{3(-)},$ %
	ЭП-1	ЭП-2	ЭП-3							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	откл	откл	откл							
2	вкл	откл	откл							
3	вкл	вкл	откл							
4	вкл	вкл	вкл							
5	откл	вкл	вкл							
6	вкл	откл	вкл							

Таблица 3.2

Влияние режимов работы электроприемников  
на положительное отклонение напряжения

Но- мер п/п	Режимы электро- приемников			$I_H, A$	$U_1, B$	$U_2, B$	$U_3, B$	$\delta U_{1(+)},$ %	$\delta U_{2(+)},$ %	$\delta U_{3(+)},$ %
	ЭП-1	ЭП-2	ЭП-3							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	вкл	вкл	вкл							
2	вкл	вкл	откл							
3	вкл	откл	откл							
4	вкл	откл	вкл							
5	откл	вкл	вкл							
6	откл	откл	откл							

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования.
5. Выводы.
6. Источники информации.

## Контрольные вопросы

1. Какие изменения напряжения являются медленными?
2. Что понимается под точкой передачи электроэнергии?
3. Как определить положительное отклонение напряжения?
4. Как определить отрицательное отклонение напряжения?
5. Какие допускаются отклонения напряжения в сетях системы электроснабжения общего назначения?
6. Соответствуют ли полученные результаты установленным нормативам?
7. Как зависит работа электроприемников от величины напряжения в сети?
8. Какие узлы сети являются характерными?
9. Какие режимы работы сети являются характерными?
10. Какая существует связь между отклонениями напряжения в сети и характерными режимами нагрузки?
11. В каких узлах сети отклонения напряжения являются наибольшими? Почему?
12. Как меняются отрицательные отклонения напряжения в узлах сети в зависимости от расстояния до источника питания?
13. Как меняются положительные отклонения напряжения в узлах сети в зависимости от расстояния до источника питания?

## Лабораторная работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

**Цель работы** – сформировать представление о причинах и способах оценки несинусоидальных режимов в электрической сети.

#### **Задачи работы:**

- 1) ознакомиться с нормами и показателями качества электроэнергии, характеризующими гармонический состав сетевого напряжения, установленными ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»;
- 2) исследовать несинусоидальный режим работы электрической сети.

#### **Краткие теоретические сведения**

При подключении нелинейной нагрузки к сети искажается форма тока и напряжения.

Источниками гармонических помех, в первую очередь, являются электроприемники, обладающие нелинейными внешними характеристиками. К ним относятся статические преобразователи напряжения, такие как выпрямители или инверторы, а также некоторые виды электротехнологических установок, например дуговые сталеплавильные печи или сварочные агрегаты.

Любую периодическую функцию, в том числе и зависимость мгновенного значения напряжения в сети от времени  $u = f(t)$ , можно разложить на сумму синусоид, частота которых в  $n$  раз выше частоты основного сигнала. Такие синусоидальные составляющие называются **гармоническими составляющими**, или **гармониками**. Синусоидальная составляющая, период которой равен периоду несинусоидальной периодической величины, называется **первой гармоникой**. Поскольку амплитуда этой составляющей, как правило, является наибольшей, то первая гармоника обычно является основной гармонической составляющей несинусоидальной величины. Остальные составляющие синусоиды с частотами со второй по  $n$ -ю называют **высшими гармониками**.



Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется по выражению

$$K_U = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

где  $U_1$  – действующее значение фазного или линейного напряжения основной частоты;  $n$  – порядок гармонической составляющей напряжения;  $U_{(n)}$  – действующее значение  $n$ -й (2, 3, ..., 40-й) гармоники напряжения.

Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения равен

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100 \%. \quad (4.2)$$

Для вычисления обоих коэффициентов необходимо определить состав и величину высших гармоник, на которые может быть разложен несинусоидальный сигнал сетевого напряжения. При этом учитываются гармоники до 40-го порядка ( $1 < n \leq 40$ ).

Нормально допустимые и предельно допустимые значения суммарного коэффициента искажения кривой напряжения  $K_U$  в действующем стандарте заданы в виде соответствующих таблиц (табл. 4.1 и 4.2).

Таблица 4.1

Нормально допустимые значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6–25	35	110–220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 4.2

Предельно допустимые значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6–25	35	110–220
12,0	8,0	6,0	3,0

ГОСТ также в виде специальных таблиц устанавливает нормально допустимые значения коэффициентов высших гармонических составляющих напряжения  $n$ -го порядка (табл. 4.3–4.5).

Таблица 4.3

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трём,  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	1,5	1	1	0,4

Таблица 4.4

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трём,  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Предельно допустимые значения коэффициентов гармоник напряжения  $n$ -го порядка  $K_{U(n)}$  принимаются в 1,5 раза больше, чем их нормально допустимый уровень.

Таблица 4.5

Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	0,2

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения: в линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах и т. д.

В конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызывать значительные протекающие токи. На предприятиях с большим удельным весом нелинейных нагрузок батареи конденсаторов или отключаются защитой от перегрузки по току, или за короткий срок выходят из строя из-за вспучивания корпуса конденсатора.

Высшие гармоники вызывают:

- ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей;
- ухудшение коэффициента мощности электрических приемников;
- ухудшение или нарушение работы устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники;
- погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, которые приводят к неполному учету потребляемой электроэнергии;
- нарушение работы самих вентиляльных преобразователей при высоком уровне высших гармонических составляющих.

## **Методические указания по выполнению работы**

### **Описание схемы электрической сети**

Исследуемая электрическая сеть представляет собой разомкнутую систему с односторонним питанием (рис. 2.1). К линии передачи присоединяются три приемника электроэнергии.

Схема замещения линии электропередачи (рис. 4.1) состоит из трех участков, содержащих продольные ( $R1, R2, R3, L1, L2, L3$ ) и поперечные ( $C1, C2$  и  $C3$ ) элементы. Электроприемники представляют собой активно-индуктивную нагрузку, генерирующую в сеть высшие гармоники напряжения. Элементами схемы замещения каждого из трех нагрузочных устройств являются  $R4, R5, R6$  и  $L4, L5, L6$  соответственно. Нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) приемников моделируют генераторы синусоидальных напряжений  $E_{ЭП-1}$ ,  $E_{ЭП-2}$  и  $E_{ЭП-3}$  соответственно.

Для измерения напряжения в точке контроля качества электроэнергии используется вольтметр  $PV$ .

Питание моделируемой сети осуществляется от источника синусоидального напряжения  $E$ .

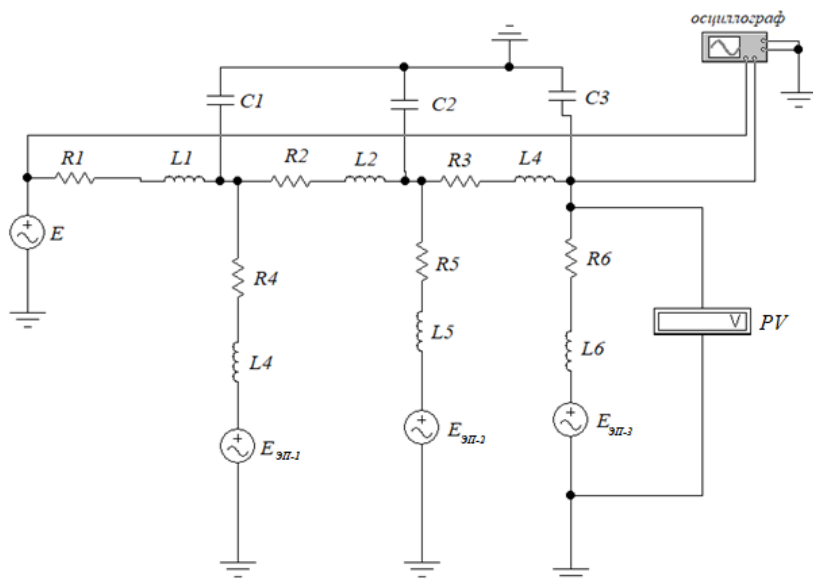


Рис. 4.1. Компьютерная модель исследуемой сети

### Выполнение компьютерного моделирования

1. Соберите компьютерную модель в рабочем окне программы *Electronics Workbench*, используя следующие виртуальные компоненты:

- источники синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – источник ЭДС частотой 50 Гц);
- участки линии передачи электрической энергии и нагрузки – резисторы, индуктивности, емкости (библиотека *Basic* – резистор, индуктивность, конденсатор);
- виртуальные измерительные приборы (библиотека *Indicators*) – вольтметр. Режим работы вольтметра – AC;
- осциллограф (библиотека *Instruments*).

2. Установите параметры элементов и источников синусоидального напряжения  $E$ ,  $E_{\text{эп.1}}$ ,  $E_{\text{эп.2}}$  и  $E_{\text{эп.3}}$  в соответствии с вариантом задания.

3. Проведите моделирование несинусоидального режима электрической сети при работе электроприемников с нелинейными ВАХ.

4. Снимите осциллограммы напряжения источника питания  $U_1$  и напряжения в узле подключения третьего электроприемника  $U_{ЭП-3}$ . На рис. 4.2 приведен пример изображения экрана осциллографа, а на рис. 4.3 – примерный вид осциллограммы напряжения с указанием масштабов по осям координат.

5. Снимите показания вольтметра для случаев, когда величина синусоидального напряжения одного источника соответствует заданному таблице вариантов значению, а другие ЭДС равны нулю.

6. Используя формулы (4.1) и (4.2), рассчитайте коэффициенты гармонических составляющих  $K_{U(n)}$  и суммарные коэффициенты несинусоидальности напряжения  $K_U$  в точке контроля качества электроэнергии (в узле подключения приемника 3).

7. Оцените соответствие значений полученных коэффициентов требованиям ГОСТ 32144–2013.

8. Сделайте выводы.

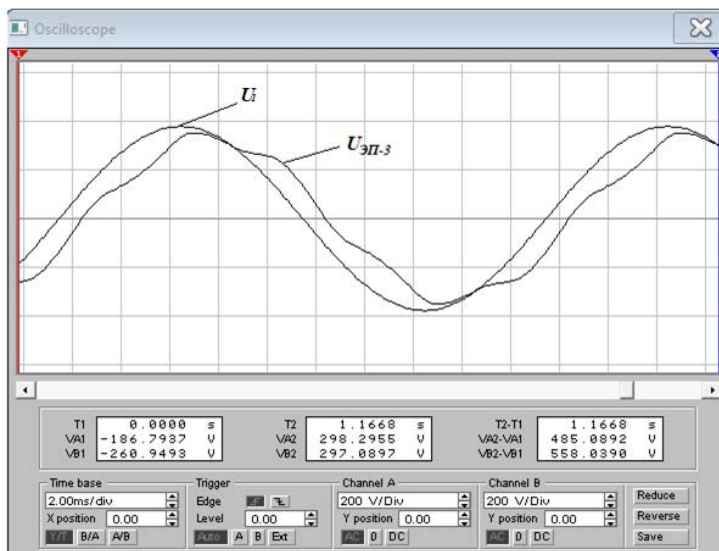


Рис. 4.2. Примерный вид экрана осциллографа

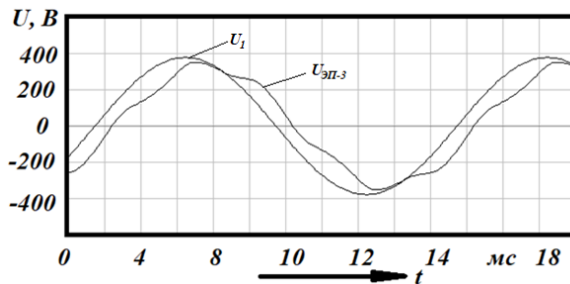


Рис. 4.3. Примерный вид осциллограмм напряжения источника питания и осциллограммы напряжения в точке подключения приемника ЭП-3

### Варианты задания

Номер варианта	Параметры источника питания $E$ , В, при $f = 50$ Гц	Параметры ЛЭП			Параметры электроприемников					
		$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$R3$ , Ом	$R4$ , Ом	$R5$ , Ом	$R6$ , Ом	$E_{ЭП-1}$ , В	$E_{ЭП-2}$ , В	$E_{ЭП-3}$ , В
		$L1$ , мГн	$L2$ , мГн	$L3$ , мГн	$L4$ , мГн	$L5$ , мГн	$L6$ , мГн	$f_{ЭП-1}$ , Гц	$f_{ЭП-2}$ , Гц	$f_{ЭП-3}$ , Гц
1	240	1	1	1	350	350	350	20	50	10
		80	80	80						
		1	1	1	300	300	300	150	350	550
2	230	0,8	0,8	0,8	350	350	350	20	30	30
		100	100	100						
		2	2	2	250	250	250	150	350	550
3	220	1,2	1,2	1,2	100	100	100	10	10	10
		100	100	100						
		1	1	1	250	250	250	250	350	450
4	660	1,5	1,5	1,5	500	500	500	20	50	20
		200	200	200						
		3	3	3	200	200	400	150	250	300

Номер варианта	Параметры источника питания $E, В,$ при $f = 50 Гц$	Параметры ЛЭП			Параметры электроприемников					
		$R1,$ Ом	$R2,$ Ом	$R3,$ Ом	$R4,$ Ом	$R5,$ Ом	$R6,$ Ом	$E_{ЭП-1},$ В	$E_{ЭП-2},$ В	$E_{ЭП-3},$ В
		$L1,$ мГн	$L2,$ мГн	$L3,$ мГн	$L4,$ мГн	$L5,$ мГн	$L6,$ мГн	$f_{ЭП-1},$ Гц	$f_{ЭП-2},$ Гц	$f_{ЭП-3},$ Гц
		$C1,$ мкФ	$C2,$ мкФ	$C3,$ мкФ						
5	380	1,5	1,5	1,5	400	400	400	20	30	20
		200	200	200						
		3	3	3	200	200	200	150	250	400
6	127	0,8	0,8	0,8	180	180	180	10	10	10
		100	100	100						
		1	1	1	200	200	200	150	250	350
7	110	0,6	0,6	0,6	120	120	120	5	5	3
		100	100	100						
		1	1	1	200	200	200	150	250	350
8	220	1,6	1,6	1,6	220	220	220	5	10	5
		100	100	100						
		1	1	1	200	200	200	150	250	350
9	380	1,6	1,6	1,6	220	220	220	5	5	10
		100	100	100						
		1	1	1	200	200	200	150	250	350
10	660	0,6	0,6	0,6	200	200	200	5	5	40
		100	100	100						
		1	1	1	200	200	200	150	250	350



## Результаты исследования несинусоидального режима

Первая гармоника $f = 50$ Гц, $n = 1$ $E = E_{зад}$ $E_{ЭП-1} = E_{ЭП-2} = E_{ЭП-3} = 0$	Высшие гармоники					
	$n_{ЭП-1} = f_{ЭП-1} / 50$ $E_{ЭП-1} = E_{ЭП-1зад}$ $E = E_{ЭП-2} = E_{ЭП-3} = 0$	$n_{ЭП-2} = f_{ЭП-2} / 50$ $E_{ЭП-2} = E_{ЭП-2зад}$ $E = E_{ЭП-1} = E_{ЭП-3} = 0$	$n_{ЭП-3} = f_{ЭП-3} / 50$ $E_{ЭП-3} = E_{ЭП-3зад}$ $E = E_{ЭП-1} = E_{ЭП-2} = 0$	$n_{ЭП-1}$	$U_{ЭП-1}, В$	$K_{U(n_{ЭП-1})}, \%$
$U_1, В$						

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования (осциллограмма напряжения в узле подключения приемника  $Z$ , таблица результатов, расчеты коэффициентов).
5. Выводы.
6. Источники информации.

## Контрольные вопросы

1. Каковы причины искажения синусоидальной формы напряжения в сетях электроснабжения?
2. Каким образом оценивается содержание высших гармоник в составе кривой напряжения или тока?
3. Каким образом можно оценить влияние отдельной гармонической составляющей на искажение формы сетевого напряжения?
4. Как нормируются нормально и предельно допустимые значения отдельных высших гармоник, присутствующих в составе сетевого напряжения?

## Лабораторная работа 5

### РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ ПУТЕМ ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**Цель работы** – получить представление о возможности регулирования напряжения в сети путем поперечной компенсации реактивной мощности.

#### **Задачи работы:**

- 1) изучить способ регулирования напряжения путем поперечной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей;
- 2) проверить принцип регулирования напряжения в сети путем поперечной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей на компьютерной модели электрической сети.

#### **Краткие теоретические сведения**

Регулировать напряжение в сети можно путем влияния на величину потерь напряжения  $\Delta U$  на отдельных участках линий передачи. Один из наиболее эффективных способов – воздействовать на реактивную мощность, передаваемую на данном участке сети.

Сущность способа регулирования напряжения путем компенсации потребляемой реактивной мощности становится понятной из следующих выражений. Напряжение в конце линии

$$U^K = U^H - \Delta U = U^H - \frac{P^H \cdot r_{\text{л}} + Q^H \cdot x_{\text{л}}}{U^H}, \quad (5.1)$$

где  $U^H$  – напряжение в начале линии;  $\Delta U$  – продольная составляющая падения напряжения в сети;  $P^H$  – поток активной мощности нагрузки в начале передачи;  $Q^H$  – поток реактивной мощности нагрузки в начале передачи;  $r_{\text{л}}$  и  $x_{\text{л}}$  – активное и реактивное сопротивление участка линии.

При поперечном подключении батареи статических конденсаторов напряжение в конце линии будет описываться уравнением

$$U^K = U^H - \Delta U = U^H - \frac{P^H \cdot r_{\text{л}} + (Q^H - Q_{\text{БСК}}) \cdot x_{\text{л}}}{U^H}, \quad (5.2)$$

где  $Q_{\text{БСК}}$  – реактивная мощность, генерируемая батареей статических конденсаторов.

Очевидно, что за счет реактивной мощности, генерируемой конденсаторами, включенными в начале линии, можно изменять падение напряжения в сети и регулировать напряжение в широком диапазоне у потребителя в конце линии.

Батареи статических конденсаторов подключаются к шинам понижающих подстанций параллельно нагрузке.

Минимальная реактивная мощность конденсаторов, обеспечивающая минимальное допустимое напряжение в узле сети  $U_{\text{доп}}^{\text{К}}$ , рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{БСК}}^{\text{min}} = \frac{U_{\text{доп}}^{\text{К}} - U^{\text{К}}}{x_{\text{л}}} \cdot U_{\text{доп}}^{\text{К}} \quad (5.3)$$

Минимальная мощность батареи, определенная расчетным путем, приводится к номинальному напряжению по формуле приведения. По ней выбирается ближайшая большая стандартная мощность комплектной батареи статических конденсаторов.

Реактивная мощность батареи конденсаторов, включенных по схеме «звезда», прямо пропорциональна линейному напряжению в квадрате и обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению конденсаторов батареи:

$$Q_{\text{БСК}}^{\text{Y}} = 3U_{\Phi}^2 \cdot B = U^2 \cdot B, \quad (5.4)$$

где  $B = 1/x_{\text{БСК}}$  — емкостная проводимость, измеряемая в сименсах (См).

При соединении батареи конденсаторов в треугольник генерируемая реактивная мощность увеличивается в три раза:

$$Q_{\text{БСК}}^{\Delta} = 3U^2 \cdot B, \quad (5.5)$$

$$Q_{\text{БСК}}^{\Delta} = 3 \cdot Q_{\text{БСК}}^{\text{Y}} \quad (5.6)$$

При напряжениях до  $U_{\text{БСК}} \leq 1$  кВ конденсаторы обычно включаются по схеме «треугольник», при напряжении  $U_{\text{БСК}} \geq 6$  кВ и выше — по схеме «звезда».

Для усвоения принципов поперечной компенсации реактивной мощности посредством батареи статических конденсаторов проведем виртуальный эксперимент.

## Методические указания по выполнению работы

### Описание схемы электрической сети

Исследуемая электрическая сеть будет представлять собой трехфазную электрическую цепь при соединении источников и приемников в схему «звезда» (рис. 5).

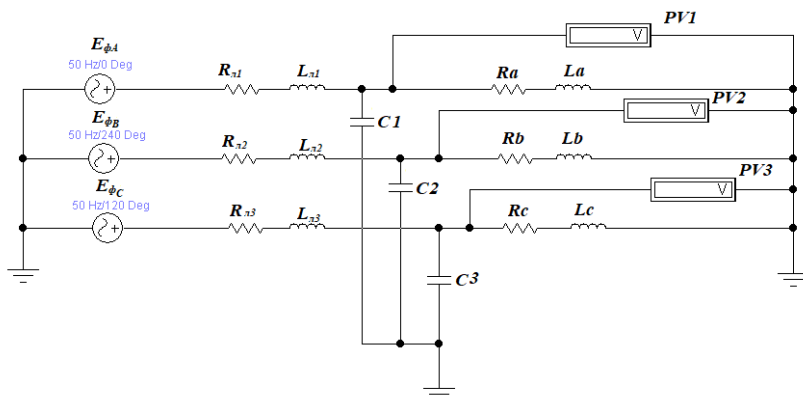


Рис. 5. Компьютерная модель исследуемой электрической сети

Схема замещения трехфазной линии электропередачи составляется из элементов  $R_{л1}$ ,  $R_{л2}$ ,  $R_{л3}$ ,  $L_{л1}$ ,  $L_{л2}$ ,  $L_{л3}$ . Схема замещения фаз приемников электрической энергии реализуется на элементах  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  и  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ . Параллельно каждой фазе нагрузки включаются емкости, моделирующие конденсаторные батареи.

Среднеквадратичные значения фазных напряжений приемников контролируются вольтметрами  $PV1$ ,  $PV2$ ,  $PV3$ .

### Варианты задания

Номер варианта	Параметры источника при $f = 50$ Гц	Параметры линии передач			Параметры элементов фазных приемников		
		$R_{Л1}$ , Ом	$R_{Л2}$ , Ом	$R_{Л3}$ , Ом	$R_a$ , Ом	$R_b$ , Ом	$R_c$ , Ом
		$L_{Л1}$ , мГн	$L_{Л2}$ , мГн	$L_{Л3}$ , мГн	$L_a$ , мГн	$L_b$ , мГн	$L_c$ , мГн
1	220	3	3	3	150	200	120
		180	180	180	200	250	150
2	230	3,5	3,5	3,5	200	120	150
		200	200	200	220	160	200
3	240	3,2	3,2	3,2	100	150	200
		150	150	150	120	200	250
4	110	1,3	1,3	1,3	100	140	180
		120	120	120	140	180	200
5	127	1,2	1,2	1,2	180	100	150
		100	100	100	220	120	160
6	400	4,0	4,0	4,0	300	210	180
		280	280	280	280	200	160
7	380	3,8	3,8	3,8	180	120	250
		220	220	220	200	100	200
8	100	1,0	1,0	1,0	160	200	100
		110	110	110	160	180	120
9	200	2,8	2,8	2,8	210	90	140
		160	160	160	250	160	180
10	660	5,2	5,2	5,2	200	200	250
		250	250	250	200	120	150

## Выполнение компьютерного моделирования

1. Соберите компьютерную модель исследуемой электрической сети (рис. 5.1), используя следующие виртуальные компоненты:

- источник синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – AC Voltage Source);
- модели линии передач электрической энергии и нагрузки – резисторы, индуктивности и конденсатор (библиотека *Basic* – Resistor, Inductor, Capacitor);
- виртуальные измерительные приборы – вольтметры *PV1*, *PV2* и *PV3* (библиотека *Indicators* – измерительные приборы – Voltmeter).  
Режим работы измерительных приборов – AC.

2. Задайте значения фазных ЭДС и параметров элементов электрической цепи согласно варианту.

Фазные ЭДС источника:

$$\begin{cases} e_A = E_\Phi \sin(\omega \cdot t + 0^\circ) \\ e_B = E_\Phi \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ e_C = E_\Phi \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_\Phi \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{cases}$$

3. Изменяя величину конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ , осуществите поперечную компенсацию реактивной мощности фазных потребителей. Контролируемые фазные напряжения занесите в таблицу экспериментальных и расчетных данных.

4. Найдите расчетным путем отклонение напряжения каждого фазного приемника и занесите в таблицу экспериментальных и расчетных данных.

5. Постройте зависимости отклонения напряжения от величины емкости конденсаторных батарей.

6. Отметьте зону допустимых и предельных отклонений напряжения.

7. Сделайте выводы.

### Экспериментальные и расчетные данные

№	C, мкФ	Фазные напряжения			Отклонение напряжения					
		$U_a, \text{В}$	$U_b, \text{В}$	$U_c, \text{В}$	$\delta U_a, \text{В}$	$\delta U_b, \text{В}$	$\delta U_c, \text{В}$	$\delta U_a, \%$	$\delta U_b, \%$	$\delta U_c, \%$
1	0									
2	2									
3	4									
4	6									
5	8									
6	10									
7	12									
8	14									
9	16									
10	18									
11	20									
12	22									
13	24									
14	26									
15	28									
16	30									



## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования: таблица экспериментальных и расчетных данных, зависимость отклонения напряжения в сети от емкости батареи конденсаторов  $\delta U = f(C)$  с указанием зоны допустимых отклонений напряжения.
5. Выводы.
6. Источники информации.

## Контрольные вопросы

1. Какую функцию выполняют компенсирующие устройства в сетях электроснабжения?
2. Каков принцип регулирования напряжения с помощью компенсации реактивной мощности?
3. Каким образом включаются конденсаторы при поперечной компенсации реактивной мощности в сети?
4. Как меняется величина генерируемой реактивной мощности при соединении конденсаторов батареи по схеме «треугольник»?
5. В каких пределах находится зона допустимых отклонений напряжения?
6. В каких пределах для вашего варианта сети следует регулировать емкость конденсаторов для обеспечения допустимых отклонений напряжения?

## Лабораторная работа 6

### РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПУТЕМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**Цель работы** — получить представление о возможности регулирования напряжения в сети путем продольной компенсации реактивной мощности.

#### **Задачи работы:**

- 1) изучить способ регулирования напряжения путем продольной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей;
- 2) проверить принцип регулирования напряжения в сети путем продольной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей на компьютерной модели электрической сети.

#### **Краткие теоретические сведения**

Как известно, напряжение у потребителя, т. е. в конце линии передачи,  $U^K$  зависит от напряжения в центре питания, т. е. от напряжения в начале линии  $U^H$ , и от продольного падения напряжения на соответствующем участке сети  $\Delta U$ .

В высоковольтных электрических сетях реактивные сопротивления  $x_{\text{л}}$  линий значительно превышают активные  $r_{\text{л}}$ . Поэтому, воздействуя на реактивное сопротивление линии  $x_{\text{л}}$ , обеспечивают эффективное регулирование напряжения в сети:

$$U^K = U^H - \Delta U = U^H - \frac{P^H \cdot r_{\text{л}} + Q^H \cdot (x_{\text{л}} - x_{\text{к}})}{U^H}, \quad (6.1)$$

где  $U^H$  — напряжение в начале линии;  $\Delta U$  — продольная составляющая падения напряжения в сети;  $P^H$  — поток активной мощности нагрузки в начале передачи;  $Q^H$  — поток реактивной мощности нагрузки в начале передачи;  $r_{\text{л}}$  и  $x_{\text{л}}$  — активное и реактивное сопротивление участка линии,  $x_{\text{л}} = 2\pi f \cdot L_{\text{л}}$ ;  $x_{\text{к}} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_{\text{к}}}$  — емкостное сопротивление конденсатора.

Последовательное включение в линию конденсаторов называют продольной компенсацией. При включении в рассечку линии кон-

денсаторов устройства продольной компенсации (УПК) достигается уменьшение индуктивного сопротивления электропередачи.

Отношение емкостного сопротивления конденсаторов  $x_K$  к реактивному сопротивлению линии  $x_L$ , выраженное в процентах, в устройствах продольной компенсации называется *процентом компенсации*:

$$K = \frac{x_K}{x_L} \cdot 100 \% . \quad (6.2)$$

Обычно применяют лишь частичную компенсацию реактивного сопротивления линии ( $K < 100 \%$ ), поскольку полная или избыточная компенсация может привести к перенапряжению в сети.

### Методические указания по выполнению работы

#### Описание схемы электрической сети

Исследуемая электрическая сеть представляет собой трехфазную электрическую цепь при соединении источников и приемников по схеме «звезда» (рис. 6).

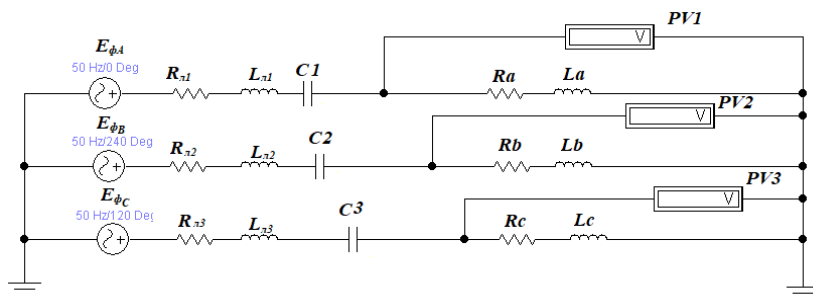


Рис. 6. Компьютерная модель исследуемой электрической сети

Схема замещения трехфазной линии передач состоит из элементов  $R_{Л1}$ ,  $R_{Л2}$ ,  $R_{Л3}$ ,  $L_{Л1}$ ,  $L_{Л2}$ ,  $L_{Л3}$ . Схема замещения фаз приемников электрической энергии реализуется на элементах  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  и  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$ . В каждой фазе нагрузки последовательно включены емкости, моделирующие конденсаторные батареи. Среднеквадратичные значения фазных напряжений приемников контролируются вольтметрами  $PV1$ ,  $PV2$ ,  $PV3$ .

## Выполнение компьютерного моделирования

1. Соберите компьютерную модель исследуемой электрической сети (рис. 6.1), используя следующие виртуальные компоненты:

- источник синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – AC Voltage Source);
- модели линии передач электрической энергии и нагрузки – резисторы, индуктивности и конденсатор (библиотека *Basic* – Resistor, Inductor, Capacitor);
- виртуальные измерительные приборы *PV1*, *PV2* и *PV3* (библиотека *Indicators* – измерительные приборы – Voltmeter).

Режим работы измерительных приборов – AC.

2. Задайте значения фазных ЭДС и параметров элементов электрической цепи согласно варианту в таблице исходных данных.

Фазные ЭДС источника:

$$\begin{cases} e_A = E_\Phi \sin(\omega \cdot t + 0^\circ) \\ e_B = E_\Phi \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ e_C = E_\Phi \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_\Phi \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{cases}$$

3. Изменяя величину конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ , осуществите продольную компенсацию реактивной мощности фазных потребителей. Контролируемые фазные напряжения занесите в таблицу экспериментальных и расчетных данных.

4. Найдите расчетным путем отклонение напряжения каждого фазного приемника. Результаты занесите в таблицу экспериментальных и расчетных данных.

5. Рассчитайте процент компенсации линии. Результаты также занесите в таблицу экспериментальных и расчетных данных.

6. Постройте зависимости отклонения напряжения от степени компенсации индуктивного сопротивления линии  $\delta U = f(K)$ . Отметьте зону допустимых и предельных отклонений напряжения.

7. Проанализируйте результаты и сделайте выводы по работе.

### Варианты заданий

Номер варианта	Параметры источника при $f = 50$ Гц	Параметры линии передач			Параметры элементов фазных приемников		
		$R_{Л1}$ , Ом	$R_{Л2}$ , Ом	$R_{Л3}$ , Ом	$Ra$ , Ом	$Rb$ , Ом	$Rc$ , Ом
		$L_{Л1}$ , мГн	$L_{Л2}$ , мГн	$L_{Л3}$ , мГн	$La$ , мГн	$Lb$ , мГн	$Lc$ , мГн
1	110	1,3	1,3	1,3	100	140	180
		120	120	120	140	180	200
2	200	2,8	2,8	2,8	90	210	140
		160	160	160	160	250	180
3	400	4,0	4,0	4,0	300	210	180
		280	280	280	280	200	160
4	220	3	3	3	150	200	120
		180	180	180	200	250	150
5	100	1,0	1,0	1,0	100	200	160
		110	110	110	120	180	160
6	380	3,8	3,8	3,8	180	120	250
		220	220	220	200	100	200
7	127	1,2	1,2	1,2	180	150	100
		100	100	100	220	160	120
8	230	3,5	3,5	3,5	200	120	150
		200	200	200	220	160	200
9	660	4,5	4,5	4,5	200	320	400
		250	250	250	180	200	250
10	380	2,5	2,5	2,5	160	120	250
		250	250	250	220	100	200

### Экспериментальные и расчетные данные

Номер	$C_K$ , мкФ	Фазные напряжения			Отклонение напряжения			Компенсация сопротивления		
		$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$\delta U_a$ , %	$\delta U_b$ , %	$\delta U_c$ , %	$x_n$ , Ом	$x_K$ , Ом	$K$ , %
1	10									
2	11									
3	12									
4	13									
5	14									
6	15									
7	16									
8	17									
9	18									
10	19									
11	20									
12	21									
13	22									
14	23									
15	24									
16	25									
17	26									
18	27									
19	28									
20	29									
21	30									
22	31									

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования (таблица расчетных и экспериментальных данных, расчеты и графики).
5. Выводы.
6. Источники информации.

## **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается способ регулирования напряжения путем продольной компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей?
2. Как включаются конденсаторные батареи при регулировании напряжения путем продольной компенсации реактивной мощности?
3. Перечислите устройства, которые применяются в электрических сетях для регулирования напряжения. Каковы достоинства и недостатки применяемых устройств?

## **Лабораторная работа 7**

### **КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

**Цель работы** — получить представление о методах снижения несинусоидальности сетевого напряжения на примере компенсации высших гармоник тока с помощью фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

#### **Задачи работы:**

- 1) изучить способ компенсации высших гармоник тока с помощью фильтрокомпенсирующих устройств;
- 2) проверить принцип работы фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) на компьютерной модели электрической сети.

#### **Краткие теоретические сведения**

Работа электроприемников с нелинейными характеристиками сопровождается генерированием высших гармонических составляющих тока. При этом искажается форма питающего напряжения и ухудшается качество электроэнергии в сети. Нейтрализовать действие гармоник тока  $n$ -го порядка и тем самым снизить несинусоидальность сетевого напряжения позволяют фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

В состав ФКУ входят реактор и батарея конденсаторов, включаемые последовательно и обладающие соответственно индуктивным и емкостным сопротивлениями. Параметры индуктивности и емкости подбираются путем настройки в резонанс на частоте компенсируемой гармоники тока  $f_{(n)} = 50 \cdot n$ . На этой частоте сопротивление ФКУ становится практически равным нулю. При подключении параллельно нелинейной нагрузке фильтр шунтирует ток компенсируемой гармоники тока.

На шинах искажающих потребителей в большинстве случаев устанавливаются несколько фильтров. Каждый из них предназначен для компенсации высших гармоник тока определенного порядка. Параметры отдельных фильтров настраиваются на определенную резонансную частоту.



На частоте компенсируемой гармоники тока сопротивления реактивных элементов ФКУ должны быть равными:  $x_{L(n)} = x_{C(n)}$ . Следовательно, будет иметь место равенство

$$n\omega L = \frac{1}{n\omega C}. \quad (7.1)$$

Отсюда следует выражение для определения индуктивности реактора:

$$L = \frac{1}{n^2\omega^2 C}. \quad (7.2)$$

Суммарное сопротивление фильтра на основной частоте с учетом формулы (7.2) будет определяться выражением

$$x_C - x_L = \frac{n^2 - 1}{n^2\omega C}. \quad (7.3)$$

Ток гармоники тока на основной частоте является равным значению

$$I_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{x_C - x_L} = U_{(1)}\omega C \frac{n^2}{n^2 - 1}, \quad (7.4)$$

где  $U_{(1)} \approx U_{nom}$  — напряжение основной частоты.

Из последнего равенства следует выражение для определения емкости конденсаторной батареи фильтра:

$$C = \frac{n^2 - 1}{n^2\omega} \cdot \frac{I_{(1)}}{U_{(1)}}. \quad (7.5)$$

Выражение (7.5) позволяет выбирать параметры фильтрокомпенсирующего устройства исходя из гармонических составляющих тока  $I_{(1)}$  и напряжения основной частоты  $U_{(1)} \approx U_{nom}$ . Такой подход дает возможность познакомиться с работой фильтрокомпенсирующих устройств на основе экспериментальных данных.

## Методические указания по выполнению работы

### Описание схемы электрической сети

В данной работе предлагается исследовать электрическую сеть, представляющую собой разомкнутую систему с односторонним питанием (рис. 7.1). К линии передачи присоединяются два электроприемника, один из которых (приемник 2) генерирует в сеть высшие гармоники.



Рис. 7.1. Структурная схема исследуемой сети

На рис. 7.2 изображена компьютерная модель исследуемой сети. Узлы подключения электроприемников делят линию электропередачи на два участка. Каждый из них замещается активным сопротивлением  $R1$  или  $R2$ , индуктивностью  $L1$  или  $L2$  и емкостью  $C1$  или  $C2$  соответственно. Нагрузочные устройства имитируют активные сопротивления ( $R_{Н1}$ ,  $R_{Н2}$ ) и индуктивности ( $L_{Н1}$ ,  $L_{Н2}$ ). Питание схемы осуществляется от источника синусоидального напряжения  $E$  с частотой  $f = 50$  Гц. В цепь искажающего электроприемника (приемник 2) устанавливается источник высших гармоник  $E_H$ , частота которых  $f_H$  в ходе эксперимента меняется от 150 Гц до 550 Гц, что соответствует действию высших гармоник тока и напряжения с  $n = 3$  по  $n = 11$ . Контроль тока в цепи исследуемого электроприемника ведется амперметром  $PA$ . Для наблюдения за формой напряжения в сети используется осциллограф  $PG$ .

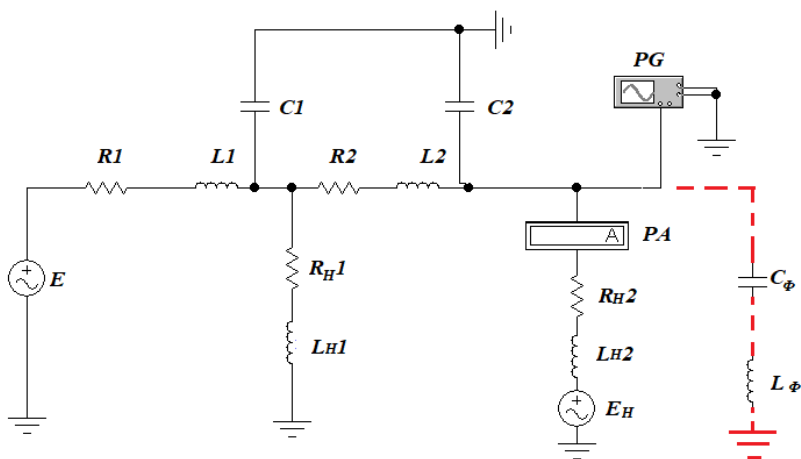


Рис. 7.2. Компьютерная модель исследуемой сети

## Выполнение компьютерного моделирования

1. Соберите компьютерную модель исследуемой электрической сети (рис. 7.2), используя следующие виртуальные компоненты:

- источники питания синусоидального напряжения (библиотека *Sources* – AC Voltage Source);
- модели линии передач электрической энергии и электроприемников – резистор, индуктивности и емкость (библиотека *Basic* – Resistor, Inductor, Capacitor);
- виртуальные измерительные приборы (библиотека *Indicators* – Ammeter, библиотека *Instruments* – Oscilloscope).

2. Установите параметры элементов в соответствии с вариантом задания.

3. Установите частоту ЭДС, генерируемую искажающим источником  $E_H$ , равную  $f_H = 150$  Гц ( $n = 3$ ).

4. Снимите осциллограмму напряжения в узле подключения искажающего электроприемника.

5. Измерьте величину тока в цепи электроприемника ЭП-2. Результаты занесите в таблицу экспериментальных данных.

6. По формулам (7.5) и (7.2) определите параметры фильтрокомпенсирующего устройства  $C_\Phi$  и  $L_\Phi$ , полагая, что  $U_{(1)} \approx E$ , а  $I_{(1)}$  соответствует измеренному значению тока в цепи электроприемника ЭП-2. Результаты занесите в таблицу экспериментальных данных.

7. Установите параметры емкости и индуктивности фильтрокомпенсирующего устройства в соответствии с расчетом.

8. Подключите фильтр высших гармоник параллельно искажающему электроприемнику, как показано на рис. 7.2 пунктирными линиями.

9. Снимите осциллограмму напряжения в узле подключения приемника 2.

10. Результаты занесите в таблицу экспериментальных данных.

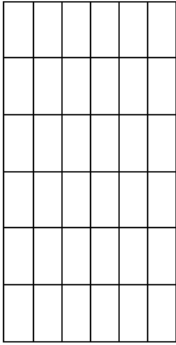
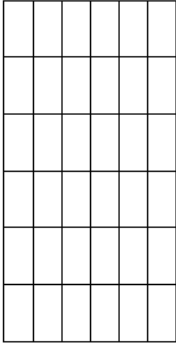
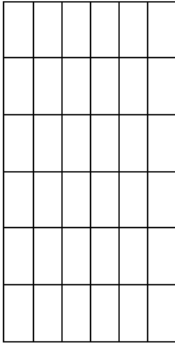
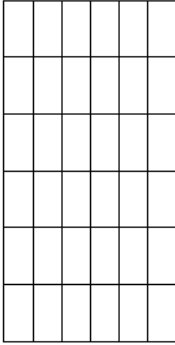
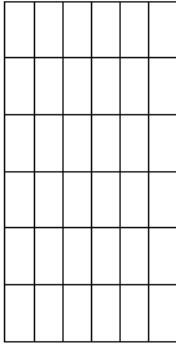
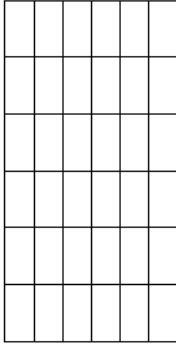
11. Повторите исследования (пп. 3–9) для  $n = 4, 5, 6, \dots, 11$ .

12. Проанализируйте результаты и сделайте выводы по работе.

### Исходные данные

Номер вари- анта	Параметры сети			Параметры нагрузки		
	$E$ , В	$R1$ , Ом	$R2$ , Ом	$E_H$ , В	$R_{H1}$ , Ом	$R_{H2}$ , Ом
	$f$ , Гц	$L1$ , мГн	$L2$ , мГн		$L_{H1}$ , мГн	$L_{H2}$ , мГн
		$C1$ , мкФ	$C2$ , мкФ			
1	220	1	1	70	350	350
	50	80	80		300	300
		1	1			
2	127	1	1	20	150	150
	50	100	100		300	300
		1	1			
3	660	1	1	70	150	150
	50	100	100		300	300
		1,2	1,2			
4	380	1,2	1,2	50	150	150
	50	100	100		250	250
		0,8	0,8			
5	127	1	1	30	350	350
	50	80	80		300	300
		1	1			
6	220	1	1	40	150	150
	50	100	100		300	300
		1	1			
7	380	1	1	70	350	350
	50	80	80		300	300
		1	1			
8	220	1,2	1,2	50	150	150
	50	100	100		250	250
		0,8	0,8			
9	380	1	1	40	150	150
	50	100	100		300	300
		1	1			
10	660	1	1	85	350	350
	50	80	80		300	300
		1	1			

### Экспериментальные данные

Порядок гармоника	Ток в цепи искажающего электроприемника, А	Параметры фильтра		Осциллограммы напряжения в точке контроля напряжения	
		$C_{\Phi}$ , мкФ	$L_{\Phi}$ , мГн	При отсутствии фильтра	При наличии фильтра
$n =$					
$n =$					
$n =$					

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Схема модели.
4. Результаты исследования (таблица экспериментальных данных с осциллограммами напряжения в точке контроля качества электрической энергии).
5. Выводы.
6. Источники информации.

## Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ)?
2. Какие элементы входят в состав ФКУ?
3. Чему равно сопротивление ФКУ на частоте компенсируемой гармоники тока?
4. В какое место сети подключаются ФКУ?
5. Для компенсации какой гармоники тока используется ФКУ, резонансная частота которого близка к 350 Гц?
6. Поясните принцип работы ФКУ.
7. Каким образом определяются параметры элементов ФКУ?

## Практическая работа 1

### РАСЧЕТ ОТКЛОНЕНИЙ НАПЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСЕТИ

**Цель работы** – получить навык и умение расчета установившегося отклонения напряжения.

#### Задачи работы:

- 1) изучить показатели и нормы качества электроэнергии, характеризующие уровень напряжения в сети, установленные ГОСТ 32144–2013;
- 2) проанализировать пример расчета отклонения напряжения;
- 3) рассчитать отклонение напряжения в сети, пользуясь исходными данными, представленными в вариантах заданий;
- 4) построить график изменения отклонения напряжения в сети.

#### Краткие теоретические сведения

В процессе передачи электроэнергии возникают потери напряжения в отдельных элементах электрической сети, приводящие к отклонению напряжения  $\delta U$  (%) от номинального (в сетях низкого напряжения) или согласованного значения (в сетях среднего и высокого напряжения).

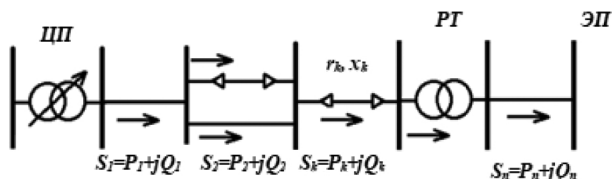


Рис. П1.1. Схема электрической сети: ЦП – центр питания; РТ – распределительный трансформатор; ЭП – электроприемник

В общем случае потери напряжения в процентах от номинального значения  $U_{nom}$  в произвольном  $k$ -м элементе распределительной сети (рис. П1.1) с достаточной степенью точности выражаются уравнением

$$\Delta U_k = \frac{P_k \cdot r_k + Q_k \cdot x_k}{U_{nom}} \cdot \frac{100}{U_{nom}}, \% \quad (\text{П1.1})$$

где  $r_k$  – активное сопротивление  $k$ -го элемента распределительной сети, Ом;  $x_k$  – реактивное (индуктивное) сопротивление  $k$ -го элемента распределительной сети, Ом,  $x_k = L_k \cdot \omega$ ;  $P_k$  – активная мощность,

передаваемая через  $k$ -й элемент распределительной сети, Вт;  $Q_k$  – реактивная мощность, передаваемая через  $k$ -й элемент распределительной сети, вар;  $L_k$  – индуктивность  $k$ -го элемента распределительной сети, Гн;  $\omega$  – угловая частота питающего напряжения, Гц,  $\omega = 2\pi \cdot f$ ;  $f$  – частота питающего напряжения, Гц.

Потери напряжения зависят от режима работы сети. В режиме наибольшей нагрузки через соответствующий элемент сети передаются максимальные активная ( $P_k^I$ ) и реактивная ( $Q_k^I$ ) мощности, а в режиме наименьшей нагрузки – минимальные  $P_k^{II}$  и  $Q_k^{II}$ . Соответственно, падение напряжения в режиме наибольшей нагрузки максимальное ( $\Delta U_k^I$ ), в режиме наименьшей нагрузки – минимальное ( $\Delta U_k^{II}$ ).

Поскольку отклонение напряжения негативно влияет на работу электроприемников, то его ограничивают. Максимально допустимое отклонение напряжения по ГОСТ 32144–2013 не должно превышать 10 %. Это достигается за счет регулирования напряжения в центре питания (ЦП) и выбора корректных отпаек распределительных трансформаторов без устройств регулирования напряжения под нагрузкой. Основанием для выбора закона регулирования в центре питания и выбора рациональных отпаек трансформаторов является расчет отклонений напряжения.

Отклонение напряжения можно определить в любой точке линии. По ГОСТ 32144–2013 нормируются отклонения напряжения в точках передачи, т. е. в узлах сети, где изменяется собственник. Например, на шинах электропотребителя (рис. П1.1) отклонение напряжения, %,

$$\delta U_{Эп} = \delta U_{Цп} - \Delta U_{k1}^{I(II)} - \Delta U_{k2}^{I(II)} - \dots - \Delta U_T^{I(II)} + E_T - \Delta U_n^{I(II)}, \quad (\text{П1.2})$$

где  $\delta U_{Цп}$  – отклонение напряжения в центре питания относительно номинального ( $U_0 = U_{ном}$ ) или согласованного ( $U_0 = U_c$ ) напряжения,  $\delta U_{Цп} = \frac{U_{Цп} - U_0}{U_0} \cdot 100 \%$ ;  $\Delta U_{k1}^{I(II)}$ ,  $\Delta U_{k2}^{I(II)}$ , ...,  $\Delta U_n^{I(II)}$  – падения напряжения на соответствующих элементах линии в режиме наибольшей (I) или наименьшей (II) нагрузки соответственно, %;  $\Delta U_T^{I(II)}$  – падение напряжения на трансформаторе, находящемся на участке линии от центра питания до анализируемой точки сети, в данном случае до электроприемника, %;  $E_T$  – трансформаторная добавка ЭДС, величина которой зависит от выбора регулировочного ответ-



вления распределительного трансформатора на участке линии от центра питания до рассматриваемой точки сети, %.

### Расчетное задание

Рассчитайте отклонение напряжения на шинах распределительного трансформатора в режиме наибольшей нагрузки.

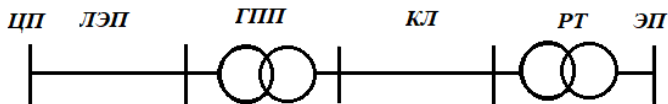


Рис. П1.2. Электрическая схема распределительной сети

### Пример

#### Исходные данные

Напряжение в начале линии:  $U_{\text{ЦП}} = U_{\text{ЦПном}} = 110$  кВ.

Параметры линии электропередачи:  $r_{\text{ЛЭП}} = 40$  Ом;  $x_{\text{ЛЭП}} = 25$  Ом.

Трансформатор главной понижающей подстанции (ГПП) напряжением 110/10 кВ:  $r_{\text{ГПП}} = 8$  Ом;  $x_{\text{ГПП}} = 140$  Ом. Через ГПП в режиме максимальной нагрузки передается мощность, равная  $P_{\text{ГПП}}^I = 7000$  кВт и  $Q_{\text{ГПП}}^I = 2500$  квар. Трансформаторная добавка ЭДС:  $E_{\text{ГПП}} = 0$  %. Номинальное напряжение на шинах ГПП:  $U_{\text{ГППном}} = 10$  кВ.

Параметры кабельной линии (КЛ):  $r_{\text{КЛ}} = 1,5$  Ом;  $x_{\text{КЛ}} = 5,5$  Ом.

Параметры распределительного трансформатора (РТ) напряжением 10/0,4 кВ:  $r_{\text{РТ}} = 1,2$  Ом;  $r_{\text{РТ}} = 5,5$  Ом. Трансформаторная добавка ЭДС:  $E_{\text{РТ}} = 2,5$  %. Через РТ и КЛ в режиме максимальной нагрузки передается мощность  $P_{\text{РТ}}^I$ , равная 800 кВт, и  $Q_{\text{РТ}}^I = 250$  квар.

#### Расчет:

1) потери напряжения на ЛЭП в режиме наибольшей нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ЛЭП}}^I &= \frac{P_{\text{ЛЭП}}^I \cdot r_{\text{ЛЭП}} + Q_{\text{ЛЭП}}^I \cdot x_{\text{ЛЭП}}}{U_{\text{ном}}} \cdot \frac{100}{U_{\text{ном}}} = \\ &= \frac{7000000 \cdot 40 + 2500000 \cdot 25}{110000} \cdot \frac{100}{110000} = 2,83 \%; \end{aligned}$$

2) потери напряжения на ГПП в режиме наибольшей нагрузки

$$\Delta U_{\text{ГПП}}^I = \frac{P_{\text{ГПП}}^I \cdot r_{\text{ГПП}} + Q_{\text{ГПП}}^I \cdot x_{\text{ГПП}}}{U_{\text{ЦПном}}} \cdot \frac{100}{U_{\text{ЦПном}}} =$$

$$= \frac{7000000 \cdot 8 + 2500000 \cdot 140}{110000} \cdot \frac{100}{110000} = 3,36 \%;$$

3) потери на КЛ в режиме наибольшей нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{КЛ}}^I &= \frac{P_{\text{РТ}}^I \cdot r_{\text{КЛ}} + Q_{\text{РТ}}^I \cdot x_{\text{КЛ}}}{U_{\text{ГППном}}} \cdot \frac{100}{U_{\text{ГППном}}} = \\ &= \frac{800000 \cdot 1,5 + 250000 \cdot 5,5}{10000} \cdot \frac{100}{10000} = 2,58 \% ; \end{aligned}$$

4) потери напряжения на РТ в режиме наибольшей нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{РТ}}^I &= \frac{P_{\text{РТ}}^I \cdot r_{\text{РТ}} + Q_{\text{РТ}}^I \cdot x_{\text{РТ}}}{U_{\text{ГППном}}} \cdot \frac{100}{U_{\text{ГППном}}} = \\ &= \frac{800000 \cdot 1,2 + 250000 \cdot 5,5}{10000} \cdot \frac{100}{10000} = 2,34 \% ; \end{aligned}$$

5) отклонение напряжения в начале ЛЭП (в ЦП)

$$\delta U_{\text{ЦП}} = \frac{U_{\text{ЦП}} - U_{\text{ЦПном}}}{U_{\text{ЦПном}}} \cdot 100 \% = \frac{110 - 110}{110} \cdot 100 \% = 0 \% ;$$

6) отклонение напряжения на шинах РТ

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{РТ}}^I &= \delta U_{\text{ЦП}} - \Delta U_{\text{ЛЭП}}^I - \Delta U_{\text{ГПП}}^I + E_{\text{ГПП}} - \Delta U_{\text{КЛ}}^I - \Delta U_{\text{РТ}}^I + E_{\text{РТ}} = \\ &= 0 - 2,83 - 3,36 + 0 - 2,58 - 2,34 + 2,5 = 8,61 \% . \end{aligned}$$

На основе результатов расчета построим график изменения отклонения напряжения на отдельных участках сети (рис. П1.3). Отклонение напряжения на шинах распределительного трансформатора составляет 8,61 %, что соответствует нормам. Значит, регулировочные отпайки трансформаторов и трансформаторные добавки ЭДС выбраны корректно.

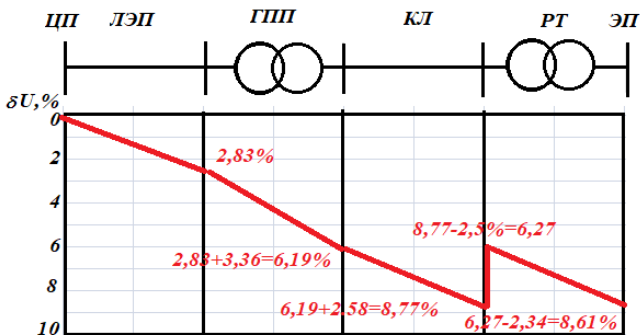


Рис. П1.3. График изменения отклонения напряжения в распределительной сети

## Варианты заданий

Номер варианта	Напряжение в ЦП		Параметры ЛЭП		Главная понизительная подстанция						Параметры КЛ		Распределительный пункт				
	$U_{ЦПвост}$ кВ	$U_{ЦП}$ кВ	$r_{ЛЭП}$ Ом	$x_{ЛЭП}$ Ом	Передаваемая мощность			Параметры трансформатора			$U_{ППВост}$ кВ	$r_{КЛ}$ Ом	$x_{КЛ}$ Ом	Передаваемая мощность		Параметры трансформатора	
					$P_{ГПП}^I$ кВт	$Q_{ГПП}^I$ квар	$E_{ГПП}$ %	$r_{ГПП}$ Ом	$x_{ГПП}$ Ом	$E_{ГПП}$ %				$P_{ГР}^I$ кВт	$Q_{ГР}^I$ квар	$r_{ГР}$ Ом	$x_{ГР}$ Ом
1	35	35	25	15	2500	1000	6	100	5	6	1	1,5	200	100	1	1,5	5
2	110	115	32	20	5500	3500	10	120	0	10	1,2	5,8	900	300	1,2	5,8	0
3	220	220	45	30	9000	7000	15	140	0	35	2	26,4	1200	450	2	26,4	0
4	35	37	15	10	1500	500	5	90	0	10	0,9	1,7	150	70	0,9	1,7	0
5	110	110	25	20	6500	1900	35	130	2,5	10	1	6	800	300	1	6	0
6	220	230	65	40	8500	6000	45	200	0	35	1,5	5,4	900	450	1,5	5,4	0
7	35	38,5	15	8	1800	900	5	90	0	6	0,8	3	200	90	0,8	3	0
8	110	120	35	25	10000	5500	7	107	0	10	1,4	5	750	300	1,4	5	0
9	220	230	47	34	10000	5500	10	150	0	10	1,5	7,5	650	200	1,5	7,5	0
10	35	38	18	10	2500	1000	8	115	0	10	0,8	1,7	120	90	0,8	1,7	0

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияет на отклонение напряжения в сети величина передаваемой мощности?
2. Как влияют на отклонение напряжения в сети активные и реактивные сопротивления проводов и кабелей?
3. Как рассчитать падение напряжения на отдельном элементе сети?
4. От каких параметров трансформаторов зависит величина отклонения напряжения в сети?
5. Чему равно допустимое отклонение напряжения в точке передачи электрической сети?

## Практическая работа 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ УРОВНЕЙ НАПЯЖЕНИЯ В КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧКАХ

**Цель работы** – закрепить навык расчета отклонения напряжения электропитания.

### Задачи работы:

- 1) ознакомиться с материалом ГОСТ 32144–2013, касающимся отклонений напряжения;
- 2) проанализировать пример расчета отклонения напряжения;
- 3) определить отклонение напряжения в заданной точке передачи электрической энергии электрической сети.

### Расчетное задание

Определите границы диапазона отклонений напряжения в точке передачи электроэнергии ТПЭ-2, при которых обеспечиваются в режиме наибольшей (НБ) и наименьшей (НМ) нагрузки стандартные отклонения напряжения  $\delta U_{(+)} = 10\%$  и  $\delta U_{(-)} = 10\%$  в точке передач электроэнергии ТПЭ-1 (рис. П2).

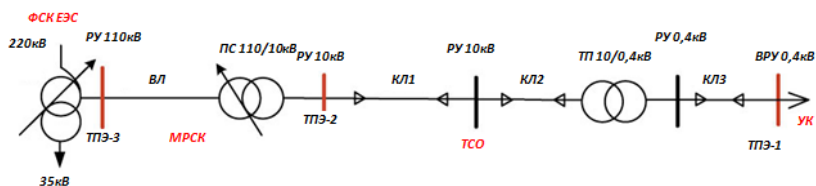


Рис. П2. Точки передачи электрической энергии в региональной электрической сети: ПС – подстанция; РУ – распределительное устройство; ВЛ – воздушная линия; КЛ – кабельная линия; ВРУ – вводно-распределительное устройство

На рис. П2 представлена принципиальная схема региональной системы электроснабжения. Управляющая компания (УК) является собственником сети низкого напряжения (НН) с классом напряжения  $U_{ном} = 0,4$  кВ. Территориальная сетевая организация (ТСО) владеет сетью среднего напряжения (СН) с  $U_{ном} = 10$  кВ. В ведении межрегиональной распределительной сетевой компании (МРСК) находится сеть высокого напряжения (ВН) с  $U_{ном} = 110$  кВ. Феде-

ральной сетевой компании единой энергетической системы (ФСК ЕЭС) принадлежит магистральная сеть с классом напряжения  $U_{ном} = 220$  кВ. Места балансового разграничения электрооборудования представляют собой точки передачи электрической энергии, обозначенные на схеме как ТПЭ-1, ТПЭ-2 и ТПЭ-3.

### Исходные данные

Номер варианта	Потери напряжения на участках сети в режиме наибольшей нагрузки			Добавочная ЭДС трансформатора $E_T$ , %	Коэффициент нагрузки сети $\beta$	Диапазон регулирования напряжения на ПС 110/10, кВ
	$\Delta U'_{инн}$ , %	$\Delta U'_{тр}$ , %	$\Delta U'_{сн}$ , %			
1	4	1	4	2,5	0,8	10,5–11
2	2	4	6	2,5	0,75	10–11
3	6	4	6	5	0,75	10–11
4	6	2	6	5	0,8	10,5–11
5	4	4	8	5	0,75	10–11
6	2	2	6	2,5	0,7	10–10,5
7	2	1	8	5	0,75	10–11
8	6	2	8	5	0,7	10–10,5
9	6	3	8	5	0,75	10–11
10	4	2	8	5	0,8	10,5–11

### Методические указания по выполнению работы

1. Рассчитайте верхнюю и нижнюю границы диапазона отклонений напряжения в точке передачи электроэнергии ТПЭ-2 в режимах наибольшей (НБ) и наименьшей (НМ) нагрузок.

2. Определите границы изменения напряжения на подстанции ПС 110/10 кВ (в точке ТПЭ-2), позволяющие выполнить требования ГОСТ 32144–2013 в точке передачи ТПЭ-1.

3. Проверьте, входит ли фактически поддерживаемый режим напряжения на подстанции ПС 110/10 кВ (в ТПЭ-2) в требуемый диапазон регулирования напряжения.

4. Сделайте вывод о необходимости коррекции регулировочных ответвлений сетевого трансформатора на ТП 10/0,4 кВ или закона регулирования напряжения на ПС 110/10 кВ (в ТПЭ-2) для обеспечения выполнения требований ГОСТ 32144–2013 в точке передачи электроэнергии ТПЭ-1.

Для расчета верхней границы диапазона отклонений напряжения в точке передачи электроэнергии ТПЭ-2 в режиме наибольшей нагрузки используйте следующее выражение:

$$\delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^I = \delta U_{(+)}^I + \Delta U_{\text{НН}}^I + \Delta U_{\text{ТР}}^I + \Delta U_{\text{СН}}^I - E_{\text{T}}, \quad (\text{П2.1})$$

где  $E_{\text{T}}$  – добавка напряжения на трансформаторе 10/0,4 кВ, зависящая от выбора регулировочного ответвления;  $\delta U_{(+)}$  – допустимое положительное отклонение напряжения в точке передачи ТПЭ-1,  $\delta U_{(+)} = 10 \%$ .

Потери напряжения на отдельных участках сети в режиме наименьшей нагрузки  $\Delta U^{\text{II}}$  уменьшаются по сравнению с режимом наибольшей нагрузки  $\Delta U^{\text{I}}$  в  $\beta$  раз и могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta U^{\text{II}} = \beta \cdot \Delta U^{\text{I}}, \quad (\text{П2.2})$$

где  $\beta$  – коэффициент нагрузки сети.

При определении верхних границ отклонений напряжения в ТПЭ-2 в режиме наименьшей нагрузки используйте следующее выражение:

$$\delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{II}} = \delta U_{(+)}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{НН}}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{ТР}}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{СН}}^{\text{II}} - E_{\text{T}}. \quad (\text{П2.3})$$

Аналогично рассчитайте нижние границы диапазона отклонений напряжений по формулам (П2.4) и (П2.5) соответственно:

$$\delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{I}} = -\delta U_{(-)}^{\text{I}} + \Delta U_{\text{НН}}^{\text{I}} + \Delta U_{\text{ТР}}^{\text{I}} + \Delta U_{\text{СН}}^{\text{I}} - E_{\text{T}}; \quad (\text{П2.4})$$

$$\delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{II}} = -\delta U_{(-)}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{НН}}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{ТР}}^{\text{II}} + \Delta U_{\text{СН}}^{\text{II}} - E_{\text{T}}, \quad (\text{П2.5})$$

где  $\delta U_{(-)}$  – допустимое отрицательное отклонение напряжения в точке передачи ТПЭ-1,  $\delta U_{(-)} = 10 \%$ .

По формулам (П2.6)–(П2.9) определите границы изменений напряжения в точке ТПЭ-2 для режимов наибольшей и наименьшей нагрузок:

$$U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{I}} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{I}} + U_{\text{ном}}; \quad (\text{П2.6})$$

$$U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{II}} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{II}} + U_{\text{ном}}; \quad (\text{П2.7})$$

$$U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^I = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^I + U_{\text{ном}}; \quad (\text{П2.8})$$

$$U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{II} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{II} + U_{\text{ном}}. \quad (\text{П2.9})$$

### Пример

Требуется определить границы диапазона отклонений напряжения в точке передачи электроэнергии ТПЭ-2 для сети (рис. П2) со следующими параметрами:  $\Delta U_{\text{НН}}^I = 4\%$ ,  $\Delta U_{\text{ТР}}^I = 2\%$ ,  $\Delta U_{\text{СН}}^I = 6\%$ ,  $E_{\text{T}} = 5\%$ ,  $\beta = 0,75$ . Диапазон регулирования напряжения на ПС 110/10 кВ: от 10 до 10,5 кВ.

#### Решение

Определим верхнюю границу отклонения напряжения в точке ТПЭ-2 в режиме наибольшей нагрузки в соответствии с выражением (П2.1):

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^I &= \delta U_{(+)}^I + \Delta U_{\text{НН}}^I + \Delta U_{\text{ТР}}^I + \Delta U_{\text{СН}}^I - E_{\text{T}}^I = \\ &= 10 + 4 + 2 + 6 - 5 = 17\%. \end{aligned}$$

Верхнюю границу отклонения напряжения в точке ТПЭ-2 в режиме наименьшей нагрузки найдем по формуле (П2.3):

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{II} &= \delta U_{(+)}^{II} + \Delta U_{\text{НН}}^{II} + \Delta U_{\text{ТР}}^{II} + \Delta U_{\text{СН}}^{II} - E_{\text{T}}^{II} = \\ &= 10 + 4 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,75 + 6 \cdot 0,75 - 5 = 14\%. \end{aligned}$$

Нижняя граница отклонения напряжения в точке ТПЭ-2 в режиме наибольшей нагрузки определяется по формуле (П2.4):

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^I &= -\delta U_{(-)}^I + \Delta U_{\text{НН}}^I + \Delta U_{\text{ТР}}^I + \Delta U_{\text{СН}}^I - E_{\text{T}}^I = \\ &= -10 + 4 + 2 + 6 - 5 = -3\%. \end{aligned}$$

Нижняя граница отклонения напряжения в точке ТПЭ-2 в режиме наименьшей нагрузки устанавливается по формуле (П2.5):

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{II} &= -\delta U_{(-)}^{II} + \Delta U_{\text{НН}}^{II} + \Delta U_{\text{ТР}}^{II} + \Delta U_{\text{СН}}^{II} - E_{\text{T}}^{II} = \\ &= -10 + 4 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,75 + 6 \cdot 0,75 - 5 = -6\%. \end{aligned}$$

Определим диапазон изменения напряжения в ТПЭ-2, при котором положительное ( $\delta U_{(+)}$ ) и отрицательное ( $\delta U_{(-)}$ ) отклонения напряжения в ТПЭ-1 будут соответствовать предельно допустимым значениям.

При наибольшей нагрузке максимально допустимое напряжение в ТПЭ-2 составляет

$$U_{\text{В.ТПЭ-2}}^I = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^I + U_{\text{ном}} = 10 \cdot 0,17 + 10 = 11,7 \text{ кВ.}$$



В режиме наименьшей нагрузки напряжение в ТПЭ-2 должно быть не выше

$$U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{II}} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{В.ТПЭ-2}}^{\text{II}} + U_{\text{ном}} = 10 \cdot 0,14 + 10 = 11,4 \text{ кВ.}$$

Нижняя граница напряжения в ТПЭ-2, допустимая для режима наибольшей нагрузки,

$$U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{I}} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{I}} + U_{\text{ном}} = 10 \cdot (-0,03) + 10 = 9,7 \text{ кВ.}$$

При наименьшей нагрузке напряжение в ТПЭ-2 должно быть не ниже следующего значения:

$$U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{II}} = U_{\text{ном}} \cdot \delta U_{\text{Н.ТПЭ-2}}^{\text{II}} + U_{\text{ном}} = 10 \cdot (-0,06) + 10 = 9,4 \text{ кВ.}$$

### *Выводы*

В сети с рассматриваемыми параметрами для обеспечения регламентированных отклонений напряжения в 10 % в точке передачи электроэнергии ТПЭ-1 допускается поддержание напряжения в ТПЭ-2 в пределах от 9,4 до 11,7 кВ. Фактический поддерживаемый диапазон напряжений от 10 до 10,5 кВ входит в заданный интервал. Это гарантирует выполнение требований ГОСТ 32144–2013 в точке передачи электроэнергии ТПЭ-1. Следовательно, коррекция регулировочных ответвлений сетевого трансформатора (изменение  $E_{\text{T}}$ ) или закона регулирования напряжения на ПС 110/10 кВ не требуется.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Задачи работы.
3. Краткие сведения из ГОСТ 32144–2013 по отклонению напряжения.
4. Расчет отклонения напряжения.
5. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Какова цель расчета отклонений напряжения?
2. Что понимается под точкой передачи электроэнергии?
3. Какие допускаются отклонения в сетях системы электроснабжения общего назначения?
4. Как работа электроприемников зависит от величины напряжения в сети?

### Практическая работа 3

## ОЦЕНКА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Цель работы** — освоить методику расчета показателей качества электроэнергии, относящихся к несинусоидальности сетевого напряжения.

#### Задачи работы:

- 1) получить навык расчета коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  и  $K_U$  по результатам контроля качества электроэнергии;
- 2) получить навык оценки несинусоидальных режимов в системе электроснабжения.

#### Расчетное задание

Оцените несинусоидальность напряжения в сети с номинальным напряжением  $U_{nom}$ , в составе которого выделяются гармонические составляющие (табл. 24), полученные в ходе проверки качества электроэнергии при  $N = 9$  измерениях.

#### Исходные данные

Но- мер вари- анта	$U_{nom}$ , В или кВ	Гармонический состав и действующие значения напряжения гармонических составляющих
1	6 кВ	$U_1 = 6,1; 6,05; 5,96; 6,0; 6,08; 6,11; 5,9; 6,0; 6,1$ кВ $U_5 = 90; 392; 380; 385; 387; 400; 390; 390; 384$ В $U_7 = 290; 295; 297; 300; 305; 302; 300; 307; 302$ В $U_9 = 20; 25; 18; 30; 27; 28; 27; 20; 25$ В
2	380 В	$U_1 = 375; 388; 390; 395; 400; 397; 370; 365; 368$ В $U_5 = 20; 22; 18; 16; 21; 20; 10; 20; 10$ В $U_7 = 20; 22; 18; 16; 21; 20; 10; 20; 10$ В $U_9 = 5; 3; 2; 1; 1; 2; 3; 3; 4$ В
3	20 кВ	$U_1 = 20,15; 20,05; 19,9; 19,8; 19,75; 19,7; 19,6; 19,7; 19,84$ кВ $U_5 = 850; 820; 880; 900; 900; 840; 850; 900; 800$ В $U_7 = 400; 410; 350; 300; 330; 360; 430; 450; 400$ В $U_9 = 100; 120; 125; 110; 130; 170; 120; 90; 100$ В

Но- мер вари- анта	$U_{ном}$ , В или кВ	Гармонический состав и действующие значения напряжения гармонических составляющих
4	10 кВ	$U_1 = 9,8; 9,85; 10,0; 10,2; 10,2; 10,1; 9,8; 9,7; 9,6$ кВ $U_5 = 400; 410; 350; 300; 330; 360; 430; 450; 400$ В $U_7 = 290; 295; 297; 300; 305; 302; 300; 307; 302$ В $U_9 = 100; 120; 125; 110; 130; 170; 120; 90; 100$ В
5	35 кВ	$U_1 = 34,92; 34,8; 34,8; 34,7; 34,9; 34,8; 35,3; 35,1; 35,1$ кВ $U_5 = 850; 820; 880; 900; 900; 840; 850; 900; 800$ В $U_7 = 840; 810; 820; 850; 800; 870; 810; 830; 870$ В $U_9 = 290; 295; 297; 300; 305; 302; 300; 307; 302$ В
6	110 кВ	$U_1 = 105; 107; 106; 107; 109; 105; 109; 110; 111$ кВ $U_5 = 1,6; 1,5; 1,2; 1,65; 1,55; 1,4; 1,3; 1,1; 1,0$ кВ $U_7 = 0,6; 0,5; 0,65; 0,2; 0,55; 0,62; 0,7; 0,8; 0,77$ кВ $U_{11} = 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 0,7; 0,6; 0,75; 0,9; 0,6$ кВ
7	130 кВ	$U_1 = 132; 130; 133; 129; 128; 127; 128; 129; 126$ кВ $U_5 = 5; 3; 2; 1; 2; 3; 3; 4$ кВ $U_7 = 0,6; 0,5; 0,65; 0,2; 0,55; 0,62; 0,7; 0,8; 0,77$ кВ $U_{11} = 1,6; 1,5; 1,2; 1,65; 1,55; 1,4; 1,3; 1,1; 1,0$ кВ
8	150 кВ	$U_1 = 153; 152; 153; 150; 150; 149; 148; 147; 147$ кВ $U_5 = 2,3; 2,5; 2,4; 2,45; 2,0; 1,9; 2,7; 2,5; 2,2$ кВ $U_7 = 1,6; 1,5; 1,2; 1,65; 1,55; 1,4; 1,3; 1,1; 1,0$ кВ $U_{11} = 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 0,7; 0,6; 0,75; 0,9; 0,6$ кВ
9	220 кВ	$U_1 = 217; 218; 217; 216; 220; 222; 220; 221; 221$ кВ $U_5 = 1,6; 1,5; 1,2; 1,65; 1,55; 1,4; 1,3; 1,1; 1,0$ кВ $U_7 = 2,3; 2,5; 2,4; 2,45; 2,0; 1,9; 2,7; 2,5; 2,2$ кВ $U_{11} = 2,0; 2,1; 2,1; 2,5; 2,0; 1,9; 2,2; 1,8; 2,2$ кВ
10	6 кВ	$U_1 = 6,05; 6,3; 6,1; 6,0; 6,0; 5,8; 5,7; 5,9; 5,9$ кВ $U_5 = 200; 210; 205; 215; 240; 225; 190; 220; 230$ В $U_7 = 100; 110; 170; 115; 160; 170; 150; 120; 130$ В $U_{11} = 20; 22; 18; 16; 21; 20; 10; 20; 10$ В

### Методические указания по выполнению работы

1. Рассчитайте коэффициенты высших гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  и  $K_U$ .

2. Сравните полученные результаты с нормированными значениями  $K_{U(n)}$  и  $K_U$ , приведенными в ГОСТ 32144–2013 (см. табл. 4.1–4.5, лабораторная работа 4).

3. Сделайте вывод о соответствии качества электроэнергии на шинах подстанции требованиям ГОСТ 32144–2013.

Коэффициенты высших гармонических составляющих напряжения рассчитываются в следующей последовательности.

1. Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей при  $i$ -м измерении, %,

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1i}} \cdot 100, \quad (\text{П3.1})$$

где  $U_{1i}$  и  $U_{(n)i}$  – действующие значения соответственно первой и  $n$ -й гармонических составляющих напряжения в  $i$ -м наблюдении.

2. Усредненное значение  $n$ -й гармоники напряжения за  $N$  наблюдений, %,

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U(n)i}^2}{N}}. \quad (\text{П3.2})$$

3. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в отдельном измерении, %,

$$K_{Ui} = \frac{1}{U_{1i}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2} \cdot 100. \quad (\text{П3.3})$$

4. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %,

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}. \quad (\text{П3.4})$$

### Пример

Требуется оценить несинусоидальность напряжения на шинах подстанции с номинальным напряжением  $U_{ном} = 380$  В. При контроле качества выделены следующие гармонические составляющие напряжения:

$U_{1i}$ , В: 375; 359; 380; 362; 376; 362; 375; 363; 390;

$U_{3i}$ , В: 2; 1; 3; 2; 3; 2; 3; 1; 1;

$U_{5i}$ , В: 3,5; 6; 4,2; 3,7; 2,1; 5; 3,6; 1,7; 5,1;

$U_{7i}$ , В: 4; 4,1; 1,6; 2,3; 3,4; 5,1; 2,7; 4,3; 2,2;

$U_{13i}$ , В: 6; 5,5; 4,2; 2,8; 4,4; 3,8; 5,2; 6,1; 6,7.

### Расчет

Результаты замеров гармонических составляющих напряжения занесем в столбцы 2–6 табл. ПЗ.2.

По формуле (ПЗ.1) рассчитаем коэффициенты 3-й гармонической составляющей напряжения для каждого  $i$ -го измерения. Для первого замера коэффициент

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{31}}{U_{11}} \cdot 100\% = \frac{2}{375} \cdot 100\% = 0,53\%.$$

Аналогично выполним расчеты для всех других измерений и составляющих напряжения. Результаты занесем в столбцы 7–10 табл. ПЗ.1.

Усредним полученные результаты, выполняя вычисления по формуле (ПЗ.2). Учитывая, что используются данные девяти замеров, коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения

$$K_{U3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{U3i}^2}{9}} = \sqrt{\frac{0,53^2 + 0,28^2 + 0,79^2 + 0,55^2 + 0,8^2 + 0,55^2 + 0,8^2 + 0,28^2 + 0,26^2}{9}} = 0,58.$$

Аналогично рассчитаем коэффициенты для остальных составляющих напряжения. Результаты расчетов занесем в табл. ПЗ.1.

По формуле (3.3) найдем результирующий коэффициент гармонических составляющих для каждого  $i$ -го измерения. Для первого замера результирующий коэффициент

$$K_{Ui} = \frac{1}{U_{1i}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2} \cdot 100\% = \frac{1}{375} \cdot \sqrt{2^2 + 3,5^2 + 4^2 + 6^2} \cdot 100\% = 2,2\%.$$

Аналогично выполним расчеты для всех других измерений. Результаты занесем в табл. ПЗ.2.

Усредним данные результатов девяти замеров, используя выражение (ПЗ.4):

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{Ui}^2}{9}} = \sqrt{\frac{2,2^2 + 2,55^2 + 1,8^2 + 1,53^2 + 1,77^2 + 2,3^2 + 2^2 + 2,13^2 + 2,25^2}{9}} = 2,08\%.$$

Таблица ПЗ.1

Расчет коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{u(n)}$

Но- мер изме- ме- рения	Результаты измерений												Результаты вычислений							
	Действующие значения гармонических составляющих напряжения $U_{(n)}$ , В												$K_{U3}$ , %	$K_{U5}$ , %	$K_{U7}$ , %	$K_{U13}$ , %	$(K_{U3})^2$ , %	$(K_{U5})^2$ , %	$(K_{U7})^2$ , %	$(K_{U13})^2$ , %
	$U_{1b}$	$U_{3b}$	$U_{5b}$	$U_{7b}$	$U_{13b}$	В	В	В	В	В	В	В								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14							
1	375	2	3,5	4	6	0,53	0,93	1,07	1,6	0,28	0,87	1,14	2,56							
2	359	1	6	4,1	5,5	0,28	1,67	1,14	1,53	0,079	2,79	1,30	2,35							
3	380	3	4,2	1,6	4,2	0,79	1,12	0,42	1,10	0,62	1,22	0,18	1,22							
4	362	2	3,7	2,3	2,8	0,55	1,02	0,64	0,77	0,31	1,04	0,40	0,6							
5	376	3	2,1	3,4	4,4	0,80	0,56	0,90	1,17	0,64	0,31	0,82	1,37							
6	362	2	5	5,1	3,8	0,55	1,38	1,41	1,05	0,31	1,91	1,98	1,10							
7	375	3	3,6	2,7	5,2	0,8	0,96	0,72	1,39	0,64	0,92	0,52	1,92							
8	363	1	1,7	4,3	6,1	0,28	0,47	1,18	1,68	0,08	0,22	1,40	2,82							
9	390	1	5,1	2,2	6,7	0,26	1,31	0,56	1,72	0,07	1,71	0,32	2,95							
Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения												$K_{U3} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{U3i}^2}{9}} = 0,58$	$K_{U5} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{U5i}^2}{9}} = 1,11$	$K_{U7} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{U7i}^2}{9}} = 0,95$	$K_{U13} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{U13i}^2}{9}} = 1,37$					

Таблица ПЗ.2

Расчет результирующего коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_u$ 

Номер измерения	Результаты измерений							Результаты вычислений			
	Действующие значения гармонических составляющих напряжения $U_{(n)}$ , В							$(U_{5i})^2, \%$	$(U_{3i})^2, \%$	$(U_{7i})^2, \%$	$K_{Ui}, \%$
	$U_{1i}, \text{В}$	$U_{3i}, \text{В}$	$U_{5i}, \text{В}$	$U_{7i}, \text{В}$	$U_{13i}, \text{В}$	напряжения $U_{(n)}$ , В					
1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	
1	375	2	3,5	4	6	6	4	12,25	16	2,2	
2	359	1	6	4,1	5,5	5,5	1	36	16,81	2,55	
3	380	3	4,2	1,6	4,2	4,2	9	17,64	2,56	1,8	
4	362	2	3,7	2,3	2,8	2,8	4	13,69	5,29	1,53	
5	376	3	2,1	3,4	4,4	4,4	9	4,41	11,56	1,77	
6	362	2	5	5,1	3,8	3,8	4	25	26,01	2,30	
7	375	3	3,6	2,7	5,2	5,2	9	12,96	7,29	2,00	
8	363	1	1,7	4,3	6,1	6,1	1	2,89	18,49	2,13	
9	390	1	5,1	2,2	6,7	6,7	1	26,01	4,84	2,25	
Результирующий коэффициент гармонических составляющих напряжения							$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{Ui}^2}{9}} = 2,08$				

Сравним полученные результаты с коэффициентами, регламентированными стандартом (см. табл. 1–5 ГОСТ 32144–2013 или табл. 4.1–4.5 лабораторной работы 4).

Коэффициент третьей гармоники напряжения  $K_{U3}$  равен 0,58 %. Нормально допустимое значение данного показателя для номинального напряжения  $U_{ном} = 380$  В (табл. 4.2) не должно превышать значения 5 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю. Так как  $K_{U3} = 0,58$  %, а  $0,58 < 5$ , то по этому показателю требования стандарта выполняются. Аналогично выполним проверку других коэффициентов:

$$K_{U5} = 1,11 \%, 1,11 < 6;$$

$$K_{U6} = 0,95 \%, 0,95 < 5;$$

$$K_{U13} = 1,37 \%, 1,37 < 3;$$

$$K_U = 2,08 \%, 2,08 < 12,0.$$

#### *Вывод*

Значения всех коэффициентов находятся в нормально допустимых пределах. Следовательно, качество электроэнергии по несинусоидальности напряжения соответствует требованиям ГОСТ 32144–2013.

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияет несинусоидальность сетевого напряжения на характеристики электроприемников и электрооборудование сети?
2. Каков порядок высших гармонических напряжений, учитываемых при расчете коэффициентов несинусоидальности сетевого напряжения?
3. О каких помехах в сети можно судить по коэффициенту  $K_U$ ?
4. О каких помехах в сети можно судить по коэффициенту  $K_{U(n)}$ ?
5. Как определить предельно допустимое значение коэффициента  $K_{U(n)}$ , если известна его нормально допустимая величина?



## Практическая работа 4

### ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы** — получить навык расчета и оценки показателей качества электроэнергии, относящихся к несимметрии напряжений.

#### Задачи работы:

- 1) познакомиться с нормами и показателями качества электроэнергии, характеризующими несимметрию напряжений в трехфазных системах, установленными ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»;
- 2) определить значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$  и по нулевой последовательности  $K_{0U}$  в пункте контроля качества электроэнергии.

#### Расчетное задание

Оцените несимметрию напряжения в трехфазной сети.

#### Исходные данные

Номер варианта	Результаты измерения линейных и фазных напряжений при контроле качества электроэнергии					
	$U_{AB}$ , кВ	$U_{BC}$ , кВ	$U_{AC}$ , кВ	$U_{A\phi}$ , кВ	$U_{B\phi}$ , кВ	$U_{C\phi}$ , кВ
1	5,9	6,39	6,3	3,41	3,65	3,64
	5,86	6,31	6,25	3,38	3,65	3,61
	5,99	6,3	6,39	3,41	3,6	3,61
	5,9	6,25	6,14	3,42	3,61	3,55
	6	6,51	6,4	3,46	3,76	3,7
	5,99	6,43	6,32	3,52	3,72	3,64
	5,9	6,38	6,27	3,37	3,61	3,62
	6,01	6,48	6,41	3,59	3,71	3,65
	5,85	6,31	6,2	3,55	3,71	3,58

Номер вари- анта	Результаты измерения линейных и фазных напряжений при контроле качества электроэнергии					
	$U_{AB}$ , кВ	$U_{BC}$ , кВ	$U_{AC}$ , кВ	$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ
2	6,2	6,3	6,28	3,49	3,55	3,64
	6,21	6,29	6,25	3,48	3,64	3,65
	6,1	6,32	6,27	3,63	3,65	3,66
	6,15	6,25	6,21	3,6	3,61	3,63
	6,08	6,17	6,15	3,5	3,57	3,58
	5,58	6,05	6	3,45	3,50	3,51
	6,01	6,29	6,15	3,51	3,64	3,67
	5,95	6,1	6,05	3,47	3,53	3,55
	6,27	6,32	6,29	3,61	3,65	3,7
3	10,45	10,5	10,3	5,99	6,08	6,04
	10,18	10,3	10,0	5,65	5,78	5,75
	9,98	10,0	9,85	5,6	5,69	5,67
	9,76	9,89	9,72	5,58	5,62	5,6
	10,13	10,15	10,0	5,74	5,78	5,77
	10,35	10,42	10,21	5,83	5,90	5,89
	10,07	10,18	9,97	5,68	5,76	5,71
	9,91	9,95	9,89	5,68	5,72	5,7
	9,88	9,98	9,75	5,6	5,64	5,61
4	22,42	22	21	12,12	12,7	12,94
	22	21,51	20,85	12,05	12,5	12,69
	22,13	21,57	20,83	12,04	12,56	12,7
	22,05	21,18	20,57	11,89	12,38	12,55
	21,9	21,14	20,57	11,89	12,74	12,81
	22,01	21,79	20,59	11,90	12	12,53
	22,07	21,1	20,64	11,93	12	12,18
	22,05	21	21,06	12,17	12,25	12,73
	21,83	21,03	20,53	11,87	11,98	12,09
5	37,0	38,86	38,5	22,3	22,44	21,36
	36,5	38,5	37,5	22,05	22,25	21,09
	36,77	38,42	37,82	22,1	22,21	21,29
	36,4	38,0	37,01	20,99	21,97	20,87
	36,12	38,44	37,21	21,011	22,22	21,07
	36,05	38,1	37,55	21,94	22,02	21,05
	36,53	38,48	37,97	21,32	22,24	21,19
	36,55	38,56	38,02	21,59	22,29	21,14
	36,48	38,29	37,99	21,77	22,13	21,0

Номер вари- анта	Результаты измерения линейных и фазных напряжений при контроле качества электроэнергии					
	$U_{AB}$ , кВ	$U_{BC}$ , кВ	$U_{AC}$ , кВ	$U_A$ , кВ	$U_B$ , кВ	$U_C$ , кВ
6	121	120	124,88	69,9	68,28	71,1
	120,51	117,01	122	69,66	67,15	69,93
	120,03	116,13	121,1	69,38	66,98	69,87
	118,67	115,97	121	68,60	66,99	69,52
	120,03	117,97	121,89	69,38	67,05	69,88
	117,57	114,91	120,01	67,96	67	69,18
	119	117,32	120,37	68,79	67,01	69,81
	119,63	116,03	120,73	69,15	66,25	68,35
	118,26	115,93	120,05	68,36	64,38	67,02
7	242,0	243,85	238	141,94	138,56	139,70
	242,0	242,3	237,7	140,1	138,72	139,88
	241,03	241,89	237,05	140,04	138,35	139,32
	238,04	241,08	236,01	139,98	138,07	137,60
	239,46	240,89	235,77	140,06	138,69	138,42
	236,18	241,55	235,76	138,21	136,48	136,52
	238,13	240,69	235,44	138,3	137,01	137,65
	239	241,99	236,31	138,95	137,42	138,15
	240,01	241,0	235,18	139,01	136,93	138,73
8	11,52	10,9	11	6,29	6,4	6,65
	11,07	10,46	10,89	6,01	6,05	6,35
	11,0	10,37	10,68	5,91	5,99	6,24
	10,98	10,35	10,91	5,95	5,98	6,31
	10,95	10,35	10,75	5,88	5,98	6,22
	11,01	10,39	11,0	5,73	6,01	6,05
	11,0	10,4	10,67	5,7	6,01	6,08
	10,95	10,4	10,83	5,69	6,01	6,03
	10,96	10,42	10,78	5,78	6,02	6,1
9	6,6	6,63	6,45	3,74	3,83	3,8
	6,55	6,61	6,45	3,73	3,81	3,79
	6,5	6,59	6,41	3,71	3,79	3,75
	6,53	6,6	6,45	3,73	3,8	3,79
	6,48	6,54	6,39	3,69	3,77	3,73
	6,34	6,48	6,31	3,65	3,75	3,71
	6,4	6,42	6,26	3,62	3,71	3,68
	6,39	6,37	6,24	3,61	3,71	3,65
	6,48	6,54	6,37	3,68	3,8	3,7

Номер вари- анта	Результаты измерения линейных и фазных напряжений при контроле качества электроэнергии					
	$U_{ABi}$ , кВ	$U_{BCi}$ , кВ	$U_{ACi}$ , кВ	$U_{Ai}$ , кВ	$U_{Bi}$ , кВ	$U_{Ci}$ , кВ
10	117,19	115,0	112,0	67,66	66,4	65,66
	115,3	114,0	111,2	66,65	66,0	65,08
	115,0	113,0	110,99	66,47	65,0	64,08
	114,8	111,0	110,51	66,36	65,0	64,79
	114,7	112,0	110,51	66,30	65,0	63,8
	114,95	113,0	110,63	66,45	64,8	63,85
	113,99	112,0	110,28	65,89	65,0	64,01
	114,25	113,0	110,34	66,04	65,0	64,62
	114,67	112,0	110,53	66,28	65,5	64,91

### Методические указания по выполнению работы

1. Определите коэффициенты несимметрии напряжений по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям.

2. Сравните полученные результаты с нормированными значениями  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ .

3. Сделайте вывод о соответствии качества электроэнергии в точке контроля требованиям ГОСТ 32144–2013.

Показателями качества электроэнергии, характеризующими несимметрию напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$ .

В отдельном  $i$ -м измерении коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %, рассчитывается по формуле

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2i}}{U_{1i}} \cdot 100, \quad (\text{П4.1})$$

где  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$  – действующие значения междуфазных напряжений прямой и обратной последовательностей в  $i$ -м измерении, В (или кВ).  $U_{1i}$  представляет собой среднее арифметическое значение от измеренных междуфазных напряжений, т. е. от  $U_{ABi}$ ,  $U_{ACi}$ ,  $U_{BCi}$ . Значение  $U_{2i}$  находится на основе измерения междуфазных напряжений:

$$U_{2i} = 0,62 \cdot (U_{\text{НБ}i} - U_{\text{НМ}i}), \quad (\text{П4.2})$$

где  $U_{\text{НБ}i}$ ,  $U_{\text{НМ}i}$  – наибольшее и наименьшее из трех действующих значений междупазных напряжений основной частоты в  $i$ -м измерении, В (или кВ).

Результирующий коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности представляет собой среднеквадратическое значение от коэффициентов  $K_{2Ui}$ , полученных на основе  $N$  наблюдений ( $N \geq 9$ ) в интервале времени, равном 3 с:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}}. \quad (\text{П4.3})$$

В отдельном  $i$ -м наблюдении коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, %,

$$K_{0Ui} = \frac{U_{0i}}{U_{1\phi i}} \cdot 100, \quad (\text{П4.4})$$

где  $U_{\phi i}$  и  $U_{0i}$  – действующие значения фазных напряжений прямой и нулевой последовательностей в  $i$ -м измерении, В (или кВ).

Величина  $U_{0i}$  рассчитывается на основе измерения фазных напряжений основной частоты по формуле

$$U_{0i} = 0,62(U_{\text{НБ.}\phi.i} - U_{\text{НМ.}\phi.i}), \quad (\text{П4.5})$$

где  $U_{\text{НБ.}\phi.i}$ ,  $U_{\text{НМ.}\phi.i}$  – наибольшее и наименьшее из трех действующих значений фазных напряжений в  $i$ -м наблюдении, В (или кВ).

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности усредняется по данным  $N$  наблюдений ( $N \geq 9$ ) в интервале времени в 3 с:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}}, \%. \quad (\text{П4.6})$$

Стандартом установлены нормально допустимые и предельно допустимые нормы коэффициентов  $K_{2U}$  и  $K_{0U}$ , значения которых соответственно не должны превышать:

- 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;
- 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

## Пример

Требуется оценить несимметрию напряжения в трехфазной сети по данным следующих замеров действующих напряжений:

$U_{ABi}$ , В: 378; 362; 358; 363; 384; 364; 362; 376; 365;

$U_{BCi}$ , В: 376; 360; 356; 358; 380; 361; 358; 375; 365;

$U_{ACi}$ , В: 376; 361; 357; 360; 382; 360; 357; 374; 365;

$U_{Ai}$ , В: 217; 208; 206; 207; 220; 209; 207; 217; 211;

$U_{Bi}$ , В: 217; 209; 206; 208; 221; 208; 206; 216; 211;

$U_{Ci}$ , В: 218; 209; 207; 210; 222; 210; 209; 217; 211.

### Расчет

Занесем данные измерений в столбцы 2–4 табл. П4.1. Для расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности предварительно в каждом  $i$ -м измерении определим величину наибольшего  $U_{НБi}$  и наименьшего  $U_{НМi}$  действующего значения междуфазного (линейного) напряжения. Результаты занесем в столбцы 5 и 6 расчетной таблицы.

Рассчитаем действующее значение напряжения прямой последовательности как среднее арифметическое от напряжений трех фаз. Для первого измерения напряжение прямой последовательности, В,

$$U_{11} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB1} + U_{BC1} + U_{AC1}) = \frac{1}{3} \cdot (378 + 376 + 376) = 376,77.$$

Аналогично выполним вычисления для других измерений. Результаты поместим в столбец 7 табл. П4.1.

Определим действующее напряжение обратной последовательности по формуле (4.2). В первом опыте величина этого напряжения, В,

$$U_{21} = 0,62 \cdot (U_{НБ1} - U_{НМ1}) = 0,62 \cdot (378 - 376) = 1,24.$$

Выполним такие же расчеты для остальных замеров. Результаты поместим в столбец 8 табл. П4.1.

По формуле (4.1) рассчитаем коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности. Для первого испытания

$$K_{2U1} = \frac{U_{21}}{U_{11}} \cdot 100\% = \frac{1,24}{376,67} \cdot 100\% = 0,33\%.$$

Аналогично выполним расчеты для других измерений. Результаты внесем в столбец 9 табл. П4.1.

Таблица П4.1

Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$

Номер измерения	Результаты измерений					Результаты вычислений		
	Действующие значения междуфазного (линейного) напряжения, В или кВ					$U_{1i}$ , В	$U_{2i}$ , В	$K_{2Ui}$ , %
	$U_{ABi}$ , В	$U_{BCi}$ , В	$U_{ACi}$ , В	$U_{НБi}$ , В	$U_{НМi}$ , В			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	378	376	376	378	376	376,67	1,24	0,33
2	362	360	361	362	360	361	1,24	0,34
3	358	356	357	358	356	357	1,24	0,35
4	363	358	360	363	358	360	3,1	0,86
5	384	380	382	384	380	360,33	2,48	0,65
6	364	361	360	364	360	382	2,48	0,69
7	362	358	357	362	357	361,67	3,1	0,86
8	376	375	374	376	374	375	1,24	0,33
9	365	365	365	365	365	365	0	0
Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности								$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{2Ui}^2}{9}} = 0,56 \%$

В соответствии с выражением (П4.3) найдем среднее значение от полученных результатов девяти измерений:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{2Ui}^2}{9}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,33^2 + 0,34^2 + 0,35^2 + 0,86^2 + 0,65^2 + 0,69^2 + 0,86^2 + 0,33^2 + 0^2}{9}} = 0,56.$$

Аналогичные расчеты выполним для проверки на соответствие нормативным требованиям коэффициента несимметрии напряжений нулевой последовательности  $K_{0U}$ . Результаты занесем в табл. П4.2.

Сравним полученные результаты с нормами, установленными на данные коэффициенты.

### Выводы

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U} = 0,56 \%$  не превышает нормально допустимого значения в  $2 \%$ . Следовательно, междуфазная несимметрия напряжений является незначительной.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  составляет  $0,54 \%$ , что также находится в нормально допустимых пределах. Несимметрия фазных напряжений является незначительной.

Таблица П4.2

Расчет коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$

Номер измерения	Результаты измерений					Результаты вычислений		
	Действующие значения междуфазного (линейного) напряжения, В или кВ					$U_{1\phi I}, \text{ В}$	$U_{0I}, \text{ В}$	$K_{0U}, \%$
	$U_{A1}, \text{ В}$	$U_{B1}, \text{ В}$	$U_{C1}, \text{ В}$	$U_{\text{НБ.ф.1}}, \text{ В}$	$U_{\text{НМ.ф.1}}, \text{ В}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	217	217	218	218	217	217,33	0,62	0,29
2	208	209	209	209	208	208,67	0,62	0,30
3	206	206	207	207	206	206,33	0,62	0,30
4	207	208	210	210	207	208,33	1,86	0,89
5	220	221	222	222	220	221	1,24	0,56
6	209	208	210	210	208	209	1,24	0,59
7	207	206	209	209	206	207,33	1,86	0,90
8	217	216	217	217	216	216,67	0,62	0,29
9	211	211	211	211	211	211	0	0
Значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности							$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 K_{0Ui}^2}{9}} = 0,54 \%$	



### Контрольные вопросы

1. Каковы основные причины несимметрии трехфазной системы напряжения?
2. Какую несимметрию сетевого напряжения характеризует коэффициент  $K_{2U}$ ?
3. Какую несимметрию сетевого напряжения характеризует коэффициент  $K_{0U}$ ?
4. Как влияет несимметрия сетевого напряжения на характеристики электроприемников и электрооборудование системы электроснабжения?
5. В каких пределах должны находиться коэффициенты несимметрии напряжения, чтобы несимметрия напряжения в сети соответствовала установленным стандартам нормативам?

## Практическая работа 5 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Цель работы** — получить представление о сущности статистической обработки данных экспериментального контроля качества электроэнергии.

### **Задачи работы:**

- 1) рассчитать вероятность попадания заданного показателя качества электроэнергии (ПКЭ) в допустимый интервал значений;
- 2) оценить соответствие ПКЭ требованиям ГОСТ 32144–2013.

### **Расчетное задание**

По данным статистической обработки результатов контроля качества электрической энергии оцените соответствие показателя качества электроэнергии (ПКЭ) требованиям ГОСТ 32144–2013.

### **Исходные данные**

Номер варианта	Исходные данные		
	ПКЭ	Математическое ожидание ПКЭ $M(X)$	Среднеквадратическое отклонение ПКЭ $\sigma(X)$
1	$\Delta f, \text{Гц}$	0,1	0,03
2	$\Delta f, \text{Гц}$	0,1	0,01
3	$K_{2U}, \%$	1	1
4	$K_{2U}, \%$	1	0,2
5	$K_{0U}, \%$	1,5	0,2
6	$K_{0U}, \%$	1,5	0,5
7	$\Delta f, \text{Гц}$	0,15	0,005
8	$K_{2U}, \%$	1,2	0,8
9	$K_{0U}, \%$	0,8	1,2
10	$K_{0U}, \%$	0,5	1,5

## Методические указания по выполнению задания

1. Рассчитайте вероятность попадания заданного ПКЭ в нормально и предельно допустимый интервалы значений.

2. Оцените соответствие ПКЭ требованиям ГОСТ 32144–2013 с учетом того, что при статистической обработке данных эксплуатационного контроля определены:

- закон распределения вероятности показателя качества электроэнергии – нормальный;
- математическое ожидание ПКЭ –  $M(X)$ ;
- среднее квадратическое отклонение ПКЭ –  $\sigma$ .

ГОСТ 32144–2013 устанавливает нормально и предельно допустимые значения для таких показателей качества электроэнергии, как отклонение частоты  $\Delta f$ , коэффициенты гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  и  $K_U$ , коэффициенты несимметрии напряжений по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям. Для положительного ( $\delta U_{(+)}$ ) и отрицательного ( $\delta U_{(-)}$ ) отклонений напряжения, а также для кратковременной ( $P_{st}$ ) и длительной ( $P_{lt}$ ) доз фликера регламентирован только предельно допустимый диапазон значений.

При нормальном законе распределения вероятность попадания ПКЭ, рассматриваемого в качестве случайной величины, в заданный интервал значений рассчитывается по известной статистической формуле

$$p(x_1 \leq X \leq x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - M(X)}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - M(X)}{\sigma}\right), \quad (\text{П5})$$

где  $\Phi(t)$  – табличная функция Лапласа (рис. П5);  $x_1$  и  $x_2$  – границы интервала, в который должна попасть случайная величина  $X$ , характеризующаяся математическим ожиданием  $M(X)$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ .

### Пример

После статистической обработки результатов эксплуатационного контроля качества электричества в точке передачи электроэнергии сети электроснабжения общего назначения с  $U_{ном} = 380$  В выявлено, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  имеет вероятность распределения, подчиняющуюся нормальному закону, математическое ожидание  $M(X) = \bar{K}_U = 5\%$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma(X) = \sigma_{K_U} = 2\%$ . Необходимо оценить соответствие данного показателя установленным требованиям.

#### Решение

По стандарту нормально допустимое значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  не должно превышать 8 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю. Другими словами,  $K_U$  должен находиться в нормально допустимом диапазоне значений  $0\% \leq K_U \leq 8\%$  с вероятностью  $p = 0,95$ .

Определим вероятность нахождения рассматриваемого показателя в интервале  $0\% \leq K_U \leq 8\%$ , используя формулу (П5) и функцию Лапласа (рис. П5):

$$\begin{aligned} p(x_1 \leq X \leq x_2) &= \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - M(X)}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - M(X)}{\sigma}\right) = \\ &= p(0\% \leq K_U \leq 8\%) = \Phi\left(\frac{8 - 5}{2}\right) - \Phi\left(\frac{0 - 5}{2}\right) = \\ &= \Phi(1,5) - \Phi(-2,5) = 0,4332 + 0,4938 = 0,927. \end{aligned}$$

Проведем проверку относительно предельно допустимого значения этого показателя:

$$\begin{aligned} p(x_1 \leq X \leq x_2) &= \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - M(X)}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - M(X)}{\sigma}\right) = \\ &= p(0\% \leq K_U \leq 12\%) = \Phi\left(\frac{12 - 5}{2}\right) - \Phi\left(\frac{0 - 5}{2}\right) = \\ &= \Phi(3,5) - \Phi(-2,5) = 0,4332 + 0,4998 = 0,933. \end{aligned}$$

Сравним полученные результаты с требованиями ГОСТ 32144–2013.

$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$
0	0	0,51	0,195	1,02	0,3461	1,53	0,437	2,04	0,4793	2,55	0,4946	3,06	0,4989	3,57	0,4998
0,01	0,004	0,52	0,1985	1,03	0,3485	1,54	0,4382	2,05	0,4798	2,56	0,4948	3,07	0,4989	3,6	0,4998
0,02	0,008	0,53	0,2019	1,04	0,3508	1,55	0,4394	2,06	0,4803	2,57	0,4949	3,08	0,499	3,63	0,4999
0,03	0,012	0,54	0,2054	1,05	0,3531	1,56	0,4406	2,07	0,4808	2,58	0,4951	3,09	0,499	3,66	0,4999
0,04	0,016	0,55	0,2088	1,06	0,3554	1,57	0,4418	2,08	0,4812	2,59	0,4952	3,1	0,499	3,69	0,4999
0,05	0,0199	0,56	0,2123	1,07	0,3577	1,58	0,4429	2,09	0,4817	2,6	0,4953	3,11	0,4991	3,72	0,4999
0,06	0,0239	0,57	0,2157	1,08	0,3599	1,59	0,4441	2,1	0,4821	2,61	0,4955	3,12	0,4991	3,75	0,4999
0,07	0,0279	0,58	0,219	1,09	0,3621	1,6	0,4452	2,11	0,4826	2,62	0,4956	3,13	0,4991	3,78	0,4999
0,08	0,0319	0,59	0,2224	1,1	0,3643	1,61	0,4463	2,12	0,483	2,63	0,4957	3,14	0,4992	3,81	0,4999
0,09	0,0359	0,6	0,2257	1,11	0,3665	1,62	0,4474	2,13	0,4834	2,64	0,4959	3,15	0,4992	3,84	0,4999
0,1	0,0398	0,61	0,2291	1,12	0,3686	1,63	0,4484	2,14	0,4838	2,65	0,496	3,16	0,4992	3,87	0,4999
0,11	0,0438	0,62	0,2324	1,13	0,3708	1,64	0,4495	2,15	0,4842	2,66	0,4961	3,17	0,4992	3,9	0,5
0,12	0,0478	0,63	0,2357	1,14	0,3729	1,65	0,4505	2,16	0,4846	2,67	0,4962	3,18	0,4993	3,93	0,5
0,13	0,0517	0,64	0,2389	1,15	0,3749	1,66	0,4515	2,17	0,485	2,68	0,4963	3,19	0,4993	3,96	0,5
0,14	0,0557	0,65	0,2422	1,16	0,377	1,67	0,4525	2,18	0,4854	2,69	0,4964	3,2	0,4993	3,99	0,5
0,15	0,0596	0,66	0,2454	1,17	0,379	1,68	0,4535	2,19	0,4857	2,7	0,4965	3,21	0,4993	4,02	0,5
0,16	0,0636	0,67	0,2486	1,18	0,381	1,69	0,4545	2,2	0,4861	2,71	0,4966	3,22	0,4994	4,05	0,5
0,17	0,0675	0,68	0,2517	1,19	0,383	1,7	0,4554	2,21	0,4864	2,72	0,4967	3,23	0,4994	4,08	0,5
0,18	0,0714	0,69	0,2549	1,2	0,3849	1,71	0,4564	2,22	0,4868	2,73	0,4968	3,24	0,4994	4,11	0,5
0,19	0,0753	0,7	0,258	1,21	0,3869	1,72	0,4573	2,23	0,4871	2,74	0,4969	3,25	0,4994	4,14	0,5
0,2	0,0793	0,71	0,2611	1,22	0,3888	1,73	0,4582	2,24	0,4875	2,75	0,497	3,26	0,4994	4,17	0,5
0,21	0,0832	0,72	0,2642	1,23	0,3907	1,74	0,4591	2,25	0,4878	2,76	0,4971	3,27	0,4995	4,2	0,5
0,22	0,0871	0,73	0,2673	1,24	0,3925	1,75	0,4599	2,26	0,4881	2,77	0,4972	3,28	0,4995	4,23	0,5
0,23	0,091	0,74	0,2704	1,25	0,3944	1,76	0,4608	2,27	0,4884	2,78	0,4973	3,29	0,4995	4,26	0,5
0,24	0,0948	0,75	0,2734	1,26	0,3962	1,77	0,4616	2,28	0,4887	2,79	0,4974	3,3	0,4995	4,29	0,5
0,25	0,0987	0,76	0,2764	1,27	0,398	1,78	0,4625	2,29	0,489	2,8	0,4974	3,31	0,4995	4,32	0,5
0,26	0,1026	0,77	0,2794	1,28	0,3997	1,79	0,4633	2,3	0,4893	2,81	0,4975	3,32	0,4995	4,35	0,5
0,27	0,1064	0,78	0,2823	1,29	0,4015	1,8	0,4641	2,31	0,4896	2,82	0,4976	3,33	0,4996	4,38	0,5
0,28	0,1103	0,79	0,2852	1,3	0,4032	1,81	0,4649	2,32	0,4898	2,83	0,4977	3,34	0,4996	4,41	0,5
0,29	0,1141	0,8	0,2881	1,31	0,4049	1,82	0,4656	2,33	0,4901	2,84	0,4977	3,35	0,4996	4,44	0,5
0,3	0,1179	0,81	0,291	1,32	0,4066	1,83	0,4664	2,34	0,4904	2,85	0,4978	3,36	0,4996	4,47	0,5
0,31	0,1217	0,82	0,2939	1,33	0,4082	1,84	0,4671	2,35	0,4906	2,86	0,4979	3,37	0,4996	4,5	0,5
0,32	0,1255	0,83	0,2967	1,34	0,4099	1,85	0,4678	2,36	0,4909	2,87	0,4979	3,38	0,4996	4,53	0,5
0,33	0,1293	0,84	0,2995	1,35	0,4115	1,86	0,4686	2,37	0,4911	2,88	0,498	3,39	0,4997	4,56	0,5
0,34	0,1331	0,85	0,3023	1,36	0,4131	1,87	0,4693	2,38	0,4913	2,89	0,4981	3,4	0,4997	4,59	0,5
0,35	0,1368	0,86	0,3051	1,37	0,4147	1,88	0,4699	2,39	0,4916	2,9	0,4981	3,41	0,4997	4,62	0,5
0,36	0,1406	0,87	0,3078	1,38	0,4162	1,89	0,4706	2,4	0,4918	2,91	0,4982	3,42	0,4997	4,65	0,5
0,37	0,1443	0,88	0,3106	1,39	0,4177	1,9	0,4713	2,41	0,492	2,92	0,4982	3,43	0,4997	4,68	0,5
0,38	0,148	0,89	0,3133	1,4	0,4192	1,91	0,4719	2,42	0,4922	2,93	0,4983	3,44	0,4997	4,71	0,5
0,39	0,1517	0,9	0,3159	1,41	0,4207	1,92	0,4726	2,43	0,4925	2,94	0,4984	3,45	0,4997	4,74	0,5
0,4	0,1554	0,91	0,3186	1,42	0,4222	1,93	0,4732	2,44	0,4927	2,95	0,4984	3,46	0,4997	4,77	0,5
0,41	0,1591	0,92	0,3212	1,43	0,4236	1,94	0,4738	2,45	0,4929	2,96	0,4985	3,47	0,4997	4,8	0,5
0,42	0,1628	0,93	0,3238	1,44	0,4251	1,95	0,4744	2,46	0,4931	2,97	0,4985	3,48	0,4997	4,83	0,5
0,43	0,1664	0,94	0,3264	1,45	0,4265	1,96	0,475	2,47	0,4932	2,98	0,4986	3,49	0,4998	4,86	0,5
0,44	0,17	0,95	0,3289	1,46	0,4279	1,97	0,4756	2,48	0,4934	2,99	0,4986	3,5	0,4998	4,89	0,5
0,45	0,1736	0,96	0,3315	1,47	0,4292	1,98	0,4761	2,49	0,4936	3	0,4987	3,51	0,4998	4,92	0,5
0,46	0,1772	0,97	0,334	1,48	0,4306	1,99	0,4767	2,5	0,4938	3,01	0,4987	3,52	0,4998	4,95	0,5
0,47	0,1808	0,98	0,3365	1,49	0,4319	2	0,4772	2,51	0,494	3,02	0,4987	3,53	0,4998	4,98	0,5
0,48	0,1844	0,99	0,3389	1,5	0,4332	2,01	0,4778	2,52	0,4941	3,03	0,4988	3,54	0,4998	5,0	0,5
0,49	0,1879	1	0,3413	1,51	0,4345	2,02	0,4783	2,53	0,4943	3,04	0,4988	3,55	0,4998		
0,5	0,1915	1,01	0,3438	1,52	0,4357	2,03	0,4788	2,54	0,4945	3,05	0,4989	3,56	0,4998		

Рис. П5. Центрированная функция Лапласа  $\Phi(x)$

### *Выводы*

1. Вероятность попадания коэффициента  $K_U$  в нормально допустимый диапазон значений равна 92,7 %, что меньше 95 %:

$$p(0 \% \leq K_U \leq 8 \%) = 0,927 < 0,95 .$$

Следовательно, требования стандарта по нормально допустимому значению не выполняются.

2. Вероятность попадания коэффициента  $K_U$  в предельно допустимый диапазон значений составляет всего 93,33 %, что меньше 100 %.

$$p(0 \% \leq K_U \leq 12 \%) = 0,9333 .$$

Значит, требования стандарта по предельно допустимому значению также не выполняются.

3. Требуется принятие специальных мер по снижению несинусоидальности напряжения в сети.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой должна быть вероятность попадания ПКЭ в интервал предельно допустимых значений?
2. Какой должна быть вероятность попадания ПКЭ в интервал нормально допустимых значений?
3. Что можно сказать о качестве электроэнергии в точке контроля, если по данным статистической обработки результатов измерений отрицательное отклонение напряжения не превышает 10 % с вероятностью 0,95?
4. Что можно сказать о качестве электроэнергии в точке контроля, если по данным статистической обработки результатов измерений отклонение частоты напряжения не превышает 0,2 Гц с вероятностью 0,95?
5. Что можно сказать о качестве электроэнергии в точке контроля, если по данным статистической обработки результатов измерений отклонение частоты напряжения не превышает 0,4 Гц с вероятностью 0,95?

## Практическая работа 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ

**Цель работы** – получить навык и умение расчета емкости конденсаторов при регулировании напряжения в сети с помощью устройства продольной компенсации (УПК) реактивной мощности.

#### Задачи работы:

- 1) изучить способ регулирования напряжения в сети путем продольной компенсации реактивной мощности;
- 2) проанализировать пример расчета;
- 3) определить емкость батареи конденсаторов устройства продольной компенсации;
- 4) выполнить проверку по обеспечению нормируемого отклонения напряжения в сети при заданном проценте компенсации УПК.

#### Краткие теоретические сведения

Уровень напряжения на отдельном участке линии (рис. П6) при передаче электроэнергии снижается в основном из-за продольной составляющей падения напряжения  $\Delta U_{12}$ . В конце линии напряжение  $U_2$  по модулю приблизительно равно

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{12}, \quad (\text{П6.1})$$

где  $U_1$  – напряжение в начале линии.

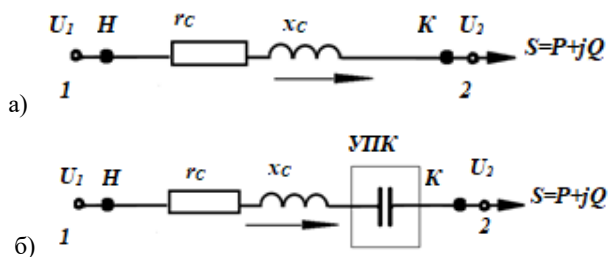


Рис. П6. Схема замещения сети (а) и схема включения УПК реактивной мощности (б)

Продольная составляющая падения напряжения зависит от активного и реактивного сопротивления данного участка сети, а также от потоков мощности в начале передачи:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}^H r_C + Q_{12}^H x_C}{U_1}, \quad (\text{П6.2})$$

где  $P_{12}^H, Q_{12}^H$  — потоки мощности в начале передачи;  $r_C, x_C$  — активное и реактивное сопротивление сети.

Снизить падение напряжения в сети и обеспечить отклонение напряжения в соответствии с установленными нормами можно за счет продольного включения в линию передачи батареи конденсаторов. При этом напряжение в конце линии повысится:

$$U_{2\text{доп}} = U_1 - \Delta U_{12\text{доп}} = U_1 - \frac{P_{12}^H r_C + Q_{12}^H (x_C - x_K)}{U_1}, \quad (\text{П6.3})$$

где  $x_K$  — емкостное сопротивление батареи конденсаторов.

Батарея конденсаторов, включаемая в рассечку линии последовательно (продольно), называется устройством продольной компенсации (УПК) реактивной мощности.

Устройство продольной компенсации характеризуется процентом компенсации ( $K$ ). Это отношение емкостного сопротивления батареи конденсаторов  $x_K$  к реактивному сопротивлению сети  $x_C$ , выраженное в процентах:

$$K = \frac{x_K}{x_C} \cdot 100 \%. \quad (\text{П6.4})$$

Так как полная компенсация может создать перенапряжение в сети, то обычно применяется частичная компенсация реактивной мощности ( $K < 100 \%$ ).

### Расчетное задание

Для заданного варианта определите емкость конденсаторов УПК, необходимую для обеспечения нормируемого уровня отклонения напряжения  $\delta U$  на линии при заданной неполной компенсации реактивной мощности (рис. Пб).



## Варианты заданий

Номер варианта	Напряжение в начале линии $U_1$ , кВ	Процент компенсации $K$	Передаваемая мощность в начале линии		Параметры линии	
			$P_{12}^H$ , кВт	$Q_{12}^H$ , квар	$x_{12}$ , Ом	$r_{12}$ , Ом
1	220	0,9	800	550	34	1,5
2	35	0,95	80	50	15	0,5
3	110	0,95	650	500	20	1
4	220	0,94	1000	480	40	2
5	35	0,9	50	25	8	0,8
6	110	0,96	700	450	25	1
7	220	0,98	900	600	34	4,5
8	35	0,98	200	70	15	0,5
9	110	0,98	650	480	20	1
10	10	0,95	15	10	4	0,5

### Пример

#### *Исходные данные*

Напряжение в начале линии:  $U_1 = 35$  кВ. Параметры участка  $l-2$  линии электропередачи:  $r_{12} = 0,5$  Ом;  $x_{12} = 8$  Ом. Передаваемая мощность в начале линии:  $P_{12}^H = 50$  кВт и  $Q_{12}^H = 30$  квар. Допустимый процент компенсации УПК:  $K = 95$  %.

#### *Расчет*

Емкостное сопротивление батареи конденсаторов при заданном проценте компенсации

$$x_K = x_{12} \cdot K = 8 \cdot 0,95 = 7,6 \text{ Ом.}$$

Емкость батареи конденсаторов

$$C_K = \frac{1}{\omega \cdot x_K} = \frac{1}{2\pi f \cdot x_K} = \frac{1}{314 \cdot 7,6} = 419 \text{ мкФ.}$$

Проверим, чему равно отклонение напряжения при расчетной емкости батареи конденсаторов:

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12}^H \cdot r_{12} + (x_{12} - x_K) \cdot Q_{12}^H}{U_1} = \frac{50 \cdot 0,5 + (8 - 7,6) \cdot 30}{35} = 1,06 \text{ кВ.}$$

Отклонение напряжения:

$$\delta U = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \cdot 100 = \frac{U_{12}}{U_1} \cdot 100 = \frac{1,06}{35} \cdot 100 = 3 \%$$

*Вывод*

При емкости конденсаторной батареи  $C_K$ , равной 419 мкФ, и проценте компенсации УПК, равном 95 %, отклонение напряжения в сети не превышает нормируемого значения в 10 %.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой УПК?
2. Для каких целей применяются УПК?
3. По какому принципу выбирается емкость конденсаторов в УПК?
4. Как оценить процент компенсации реактивной мощности, обеспечиваемый УПК?
5. Какой процент компенсации реактивной мощности обычно обеспечивают УПК? Почему?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные и практические занятия по дисциплине «Показатели и контроль качества электрической энергии», проводимые на втором курсе электротехнических направлений подготовки бакалавров, ориентированы на формирование у обучающихся ряда важных компетенций.

Во-первых, формируется навык работы с нормативно-правовыми документами, регламентирующими сферу будущей профессиональной деятельности.

Во-вторых, имеется возможность освоить базовые методы моделирования электрических цепей, электротехнических объектов и схем.

В-третьих, на простых примерах можно понять и увидеть взаимосвязи между функционированием систем электроснабжения и различных электроприемников.

В-четвертых, в контексте данных занятий демонстрируется важность фундаментальной подготовки, поскольку при исследовании процессов на промышленных объектах и системах знания по теоретическим основам электротехники и другим естественно-научным дисциплинам приобретают прикладное значение.

Наконец, при выполнении лабораторных и практических работ в соответствии с требованиями данного пособия имеется возможность сформировать навык системного подхода к собственной деятельности. Все расчеты и эксперименты предлагается выполнять, начиная с постановки цели и задач каждого исследования и заканчивая анализом, обобщением результатов и написанием выводов по работе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : дата введения 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях : учеб. пособие / И.В. Жежеленко, М.А. Короткевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 197 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/20304.html> (дата обращения: 15.01.2020).
3. Климова, Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение : учеб. пособие для приклад. бакалавриата / Г.Н. Климова. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2015. – 179 с.
4. Овсянников, А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. – Новосибирск : НГТУ, 2013. – 194 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html> (дата обращения: 15.01.2020).
5. Управление качеством электроэнергии : учеб. пособие для вузов / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонова [и др.] ; под ред. Ю.В. Шарова. – Москва : МЭИ, 2006. – 319 с.
6. Черненко, А.Н. Регулирование напряжения в сетях среднего и низкого напряжений : практикум / А.Н. Черненко. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 20 с.
7. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учеб. пособие / А.Ф. Шаталов, И.Н. Воротников, М.А. Мастепаненко [и др.]. – Ставрополь : АГРУС, 2014. – 64 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html> (дата обращения: 15.01.2020).