The image features a light gray background with a faint grid pattern. In the upper right quadrant, there is a solid black rectangle with a smaller black rectangle nested inside its top-right corner. Below this, a larger red rectangle is positioned, partially overlapping the black one. The authors' names are printed in black text above the title.

Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, А.И. Муравлев

**КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, А.И. Муравлев**

## **КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия*

*Редакционно-издательским советом*

*Томского политехнического университета*

Издательство

Томского политехнического университета

2014

УДК 621.311.019(076.5)

ББК 31.29я73

Л84

**Лукутин Б.В.**

Л84 Качество электроснабжения промышленных потребителей: учебное пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, А.И. Муравлев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 89 с.

Качество электроснабжения представляется интегральной характеристикой включающей в себя показатели надежности электроснабжения, качества электрической энергии и энергоэффективности.

Представленный комплекс лабораторных работ позволяет освоить современные средства измерения электрических параметров сети, инженерные методики расчета показателей качества электроснабжения, методы анализа и принятия технических решений по количественным значениям показателей.

Учебное пособие также содержит примеры решения индивидуальных заданий для студентов изучающих дисциплину «Качество электроснабжения», что в сочетании с обширной практической частью, позволяет обучающемуся эффективно организовывать самостоятельную работу.

УДК 621.311.019(076.5)

ББК 31.29я73

### *Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретических основ электротехники» ТУСУР

*В.М. Дмитриев*

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общей электротехники и автоматики» ТГАСУ

*В.М. Педиков*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014

© Лукутин Б.В., 2014

© Обложка. Издательство Томского политехнического университета, 2014

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Требования к качеству электроснабжения</b> .....	<b>5</b>
1.1 Требования к надежности электроснабжения.....	6
1.2 Требования к качеству электрической энергии .....	7
<b>2 Лабораторное исследование качества электроснабжения промышленных предприятий</b> .....	<b>12</b>
2.1 Техника безопасности при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Качество электроснабжения» .....	12
2.2 Описание лабораторного оборудования .....	14
2.3 Мониторинг электрических сетей .....	18
2.4 Оценка погрешности измерительных приборов в сетях несинусоидального напряжения .....	24
2.5 Интегральная вероятность отклонения показателей качества электрической энергии .....	28
2.6 Управление качеством электроснабжения промышленного предприятия .....	35
2.7 Потери электрической энергии в сетях с несинусоидальным напряжением ...	40
2.8 Потери электрической энергии в сетях с несимметричным напряжением .....	45
2.9 Измерение фликеров в цехах промышленных предприятий .....	50
2.10 Качество электрической энергии в сетях с многочисленными абонентами ...	54
2.11 Применение осциллографа для исследования промышленных электрических сетей .....	58
<b>3 Инженерное исследование качества электроснабжения промышленных предприятий</b> .....	<b>62</b>
3.1 Основные принципы расчета надежности систем электроснабжения .....	62
3.2 Оценка качества электрической энергии по осциллограмме напряжения .....	69
3.3 Индивидуальное домашнее задание .....	77
3.4 Оформление расчетно-графических работ .....	83
<b>Заключение</b> .....	<b>87</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>88</b>

## **Введение**

Начиная с анализа первых результатов электрификации России в 1935 году и по настоящее время, электроэнергетическая отрасль считается основополагающей для развития промышленности страны и коммунально-бытового сектора. Качество работы электрогенерирующих мощностей, магистральных и распределительных сетей имеет прямое влияние на технологические возможности российского потребителя, в связи с чем, основную задачу электроснабжения можно сформулировать как: обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителя электрической энергией в заданном объеме и заданного качества.

Само понятие «качества электроснабжения» появилось сравнительно недавно и подразумевает интегральную характеристику, включающую в себя, показатели надежности электроснабжения, качества электрической энергии и энергоэффективности.

В настоящее время методики анализа качества электроснабжения не разработаны, потребитель самостоятельно выбирает контролируемые параметры и соответственно уровень качества электроснабжения, который не должен противоречить требованиям существующих нормативно-технических документов.

Основными задачами учебного пособия является: установление структурно-логических связей между группами показателей качества электроснабжения, объяснения принципов их взаимного влияния и принятия технических решений на основе количественных значений показателей. Представленный комплекс лабораторных работ позволяет освоить современные средства измерения параметров электросети, познакомиться с инженерными методиками расчета показателей качества электроснабжения и способами его повышения.

## 1 Требования к качеству электроснабжения

Определение качества товаров и услуг осуществляется по совокупности формальных признаков установленных нормативными документами и субъективным восприятием потребителя, созданного на основе собственных представлений о степени удовлетворения потребностей. В рамках развивающийся концепции построения российского электроэнергетического рынка, товаром является электрическая энергия, а сам процесс электроснабжения – услугой.

Потребитель электрической энергии вправе требовать возмещения ущерба вызванных низким качеством товара или услуги в порядке предусмотренного статьей № 547 Гражданского кодекса РФ.

Рассмотрим причины ущерба наносимого потребителю. Во первых, ущербы связанные с перерывом электроснабжения, при этом предприятие не может нормально функционировать, а значит не дополучает прибыль. Ущерб значительно увеличивается в случае порчи дорогостоящего сырья или поломке технологического оборудования. В данном случае, возможности предотвращения ущерба напрямую связаны с надежностью электроснабжения.

Во вторых, ущерб потребителя может быть вызван появлением бракованной продукции, в результате низкого качества производимых технологических операций, объясняемого отклонением показателей качества электрической энергии. Также, длительная работа электроприемников от сети с низким качеством электроэнергии приводит к ускоренному износу оборудования, что в конечном итоге представляется ущербом. Кроме того, совокупность показателей качества электрической энергии, обеспечивает уровень электромагнитной совместимости для большинства видов электроприемников работающих от одной сети, что наиболее важно при эксплуатации высокотехнологичного оборудования на основе электронных систем управления.

В третьих, процесс производства, передачи и распределения электрической энергии не возможен без сопутствующих потерь, которые приходится оплачивать. Мощность потерь во многом зависит от режима работы электрической сети, эффективность управления которой характеризуют показателями энергоэффективности.

Заключение о качестве электроснабжения можно сделать путем комплексного анализа текущих показателей характеризующих электроснабжение на соответствие требованиям ПУЭ, стандарта по качеству электрической энергии и внутренних актов предприятия, регламентирующих режим энергопотребления.

## 1.1 Требования к надежности электроснабжения

Как правило, требования по надежности электроснабжения должны быть обеспечены при проектировании объекта, изменение надежности в процессе эксплуатации не контролируется, но обеспечивается путем проведения плановых, ремонтно-профилактических работ с установленной периодичностью. По надежности электроснабжения, ПУЭ выделяет потребителей первой, второй и третьей категории для которых определено допустимое время перерыва электроснабжения и конструктивные особенности питающей сети: число независимых источников энергии и питающих линий. Следует отметить, что данный подход справедлив т.к. надежность электрооборудования в значительной степени зависит от количества используемых резервирующих устройств, но в то же время ограничивает возможности анализа надежности системы электроснабжения с учетом наработки используемых элементов.

В мировой практике, надежность объектов энергетики и в частности, конкретного узла нагрузки, характеризуется с помощью коэффициента оперативной готовности, т.е. вероятности того, что в течение определенного временного промежутка, например года, электроснабжение будет осуществляться в полном объеме и временем простоя - представляющего собой число часов, в течение того же года, когда электроснабжение не осуществлялось по причине проведения ремонтных работ [1]. Количественные показатели надежности электроснабжения, используемые западными инженерами, могут быть адаптированы к тексту ПУЭ следующим образом:

- потребитель третьей категории, электроснабжение которого осуществляется по одноцепной линии электропередач от одного источника питания, без дополнительных резервирующих элементов, должен характеризоваться коэффициентом оперативной готовности не ниже 99,671 %, ожидаемое время нахождения в неисправном состоянии не должно превышать 28,8 ч. в год;
- потребитель второй категории, электроснабжение которого осуществляется по нескольким линиям электропередач от двух и более независимых источников питания, допускающий проведение ремонтно-профилактических работ без прекращения электроснабжения, должен характеризоваться коэффициентом оперативной готовности не ниже 99,982 %, время нахождения в неисправном состоянии не должно превышать 1,58 ч. в год;
- потребитель первой категории, электроснабжения которого осуществляется по нескольким линиям электропередач от двух и более независимых источников питания, допускающий проведение ре-

монтажно-профилактических работ без прекращения электроснабжения и имеющего дополнительные резервирующие элементы должен характеризоваться коэффициентом оперативной готовности не ниже 99,995 %, время нахождения в неисправном состоянии не должно превышать 0,44 ч. в год;

- для электроприемников особой группы должен быть обеспечен самый высокий коэффициент оперативной готовности 99,999 %, время нахождения в неисправном состоянии не должно превышать 5,26 мин. в год.

Приведенные количественные показатели позволяют сделать заключение о надежности электроснабжения объекта находящегося в эксплуатации после проведения расчетов надежности, учитывающих износ основного оборудования и разработать программу мероприятий достижения заданного уровня надежности электроснабжения, что крайне затруднительно опираясь только на конструктивные особенности системы электроснабжения.

## **1.2 Требования к качеству электрической энергии**

В 2008 году, в электроэнергетической отрасли России произошло важное событие. Были подведены итоги выполнения первой энергетической стратегии России сроком действия до 2010 года. В рамках выполнения которой завершила свою работу организация РАО ЕЭС России, являющейся на тот момент государственной монополией в сфере электроэнергетики России. С этого момента, структура электроэнергетической отрасли страны была представлена в виде набора независимых коммерческих организаций предоставляющих свои услуги в сферах генерации, передачи и распределения электрической энергии. Официально, под государственным контролем, остались только стратегически важные объекты, среди которых все объекты атомной энергетики и магистральные электрические сети. Логическим завершением реформы стало объявление о создании функционирующего, свободного, конкурентного рынка. Соответственно, электрическая энергия стала товаром, требования к качеству которого изложены в ГОСТ 13109-97 [2].

Следует отметить высокие требования к качеству электрической энергии в России, которые не уступают аналогичные европейским, изложенным в стандартах IEEE Standard 519, IEEE Standard 1159, и американским - ANSI C84-1. Из недостатков ГОСТ 13109-97 можно отметить только его моральный возраст. Развитие и внедрение в промышленность полупроводниковых преобразователей (в частности преобра-



зователей частоты) стремительно произошедшее за последние 10 лет привело к появлению режимов работы электрических сетей, которых не могло существовать в период написания стандарта.

Начиная с января 2013 года в правовую силу вступил ГОСТ Р 54149-2010 [3], появления которого не привело к изменениям в стандартизации качества электрической энергии. В настоящее время, в России, действуют два ГОСТа по качеству электрической энергии.

Рассмотрим существующие требования к качеству электрической энергии в России по ГОСТ 13109-97.

Контроль качества электрической энергии осуществляется по 11 показателям. Показатели качества электрической энергии (ПКЭ), отклонения которых могут быть объяснены на основе существующих технологических процессов, называются нормируемыми. Отклонения нормируемых показателей ПКЭ, не должны превышать допустимые значения в течение 95 % времени работы сети. В случае эксплуатации сети в послеаварийном режиме, отклонения ПКЭ не должны превышать предельно-допустимых значений, существование которых не может превышать 5 % рабочего времени. Работа электрической сети с отклонениями ПКЭ превышающими предельно-допустимые значения запрещается.

Наряду с нормируемыми ПКЭ существуют ненормируемые - возникающие в результате случайных процессов, аварийных ситуаций, атмосферных явлений. Последствия их возникновения достаточно разрушительны, поэтому ведется учет возникновения подобных ситуаций и осуществляются попытки минимизации сопутствующих ущербов с помощью дополнительного пассивного оборудования.

Задача контроля качества электрической энергии достаточно трудоемка, с точек зрения накопления эмпирических данных и последующей их обработки. Полноценный мониторинг качества электрической энергии стал доступен сравнительно недавно, с появлением прибора, называемого «анализатором качества электрической энергии». До этого, большинство потребителей контролировало только значения установившихся отклонений напряжения и отклонения частоты.

Система электроснабжения страны состоит из многочисленных синхронных генераторов, расположенных в разных регионах и связанных единой электрической сетью. Важным условием для параллельной работы генераторов является равенство частот их вращения и соответственно генерируемого тока. Пренебрежение этим правилом приводит к аварии регионального масштаба, поэтому требования к поддержанию частоты тока сети наиболее жесткие. Отклонением частоты называют разницу между фактической частотой тока в сети и промышленной (в

России 50 Гц). Допустимыми считаются отклонение частоты  $\pm 0,2$  Гц, предельно-допустимыми  $\pm 0,4$  Гц.

Установившимися отклонениями напряжения называют разность между действующим значением фактического напряжения сети и его номинальным значением, сохраняющуюся более 30 секунд. Величина установившихся отклонений напряжения выражается в вольтах или % от номинального напряжения. Для электрических сетей общепромышленного назначения, установлены допустимые отклонения напряжения в пределах  $\pm 5$  %, максимальные  $\pm 10$  %. В нормативном документе учитывается, что одно и то же отклонение напряжения по разному влияет на изменение характеристик электроприемников разных типов. Допустимые отклонения в осветительных сетях не должны превышать пределы  $-2,5 \dots +5$  %, в сетях с основной нагрузкой в виде асинхронных двигателей -  $5 \dots +10$  %.

Колебания напряжений нормируются с помощью двух показателей: размаха изменений напряжения, представляющего собой разность между амплитудами напряжения предыдущего и текущего периода и дозы фликера, являющейся мерой вредного воздействия на органы зрения человека, рассчитываемой на основе величины размаха, частоты повторений размаха и формы колебаний напряжений (произвольная, меандр). В процессе медицинских исследований было установлено, что постоянное изменение светового потока негативно сказывается на здоровье и утомляемость органов зрения, при этом человек не замечает вредного воздействия на сознательном уровне. Периодичность размахов с частотой от 8 до 10 Гц признаны наиболее вредными, при этом увеличение амплитуды усугубляет воздействие. Допустимый уровень размаха определяется по кривым опубликованным в ГОСТ 13109-97 и зависит от периодичности. В свою очередь допустимая доза фликера нормируется в зависимости от категории зрительного напряжения и времени воздействия. Кратковременная доза фликера измеряется за 10 минут, длительная – за 2 часа. Для работы с повышенным зрительным напряжением кратковременная доза фликера не должна превышать 1, длительная – 0,74. Для остальных видов работ 1,38 и 1, соответственно.

С каждым годом к общественным электрическим сетям подключают все больше электроприемников потребляющих не синусоидальный ток, прежде всего это полупроводниковые и электромагнитные преобразователи энергии, что отражается на форме кривой напряжения, которая становится отличной от синусоидальной. Для учета этого явления используют коэффициент несинусоидальности. В основе расчета этого показателя лежат представления французского математика Фурье, что, функции любой формы можно представить в виде ряда гармониче-

ских функций, называемого сегодня рядом Фурье. Каждое слагаемое ряда Фурье отличается от другого - фазой, амплитудой и частотой, которая кратна частоте первой составляющей ряда. Таким образом гармоническую составляющую промышленной частоты (50 Гц) называют – основной гармоникой, все остальные гармонические составляющие напряжения сети –высшими гармониками.

Коэффициент несинусоидальности находится как отношение квадратного корня из суммы квадратов действующих значений высших гармоник к действующему значению первой гармоники. Так же вычисляют отношение действующего значения каждой, отдельно взятой гармоники (от второй до сороковой) к напряжению основной. Ввиду внушительного объема нормируемых данных, конкретных значений допустимых коэффициентов искажения синусоидальности здесь не приводится. При их определении по ГОСТ 13109-97 следует обратить внимание на уровень напряжения исследуемой сети и воспользоваться соответствующими таблицами.

Во всем мире распространены трехфазные электрические сети. Трехфазная система токов создает круговое вращающееся поле, свойства которого лежат в основе эффективной генерации электрической энергии и ее потребления двигателями. Наряду с трехфазной нагрузкой, от промышленных сетей так же питают однофазную, разной мощности, не говоря о возможных однофазных коротких замыканиях. В результате, фазы электрической сети эксплуатируются не в одинаковых условиях и создаваемое вращающееся поле становится по форме отличным от кругового. Такой режим работы электрической сети называется не симметричным. Уровень несимметрии в электрической сети, оценивают коэффициентом несимметрии, в основе расчета которого лежит метод симметричных составляющих. По методу симметричных составляющих любую трехфазную систему токов или напряжений можно представить с помощью векторов прямой, обратной и нулевой последовательности. В абсолютно симметричной системе значение величин обратной и нулевой последовательности будут равны нулю. При появлении несимметрии ее значение контролируется отношением действующего напряжения обратной последовательности к действующему напряжению прямой последовательности, что называют коэффициентом несимметрии по обратной последовательности. Соответственно, коэффициент несимметрии по нулевой последовательности является отношением действующего напряжения нулевой последовательности, умноженному на корень из трех к напряжению прямой последовательности. Для коэффициентов несимметрии допустимым уровнем считается 2%, предельно-допустимым 4%.

В завершении параграфа кратко опишем приведенные в ГОСТ 13109-97 не нормируемые ПКЭ.

Провал напряжения – внезапное понижение напряжения в точке электрической сети, ниже -10 % от номинального, за которым следует восстановление напряжения до уровня близкого к номинальному в течение времени от 10 мс до 30 с.

Временное перенапряжение – это повышение напряжения в точке электрической сети, выше +10 % от номинального, продолжительностью более 10 мс, возникающих в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях.

Коэффициент временного перенапряжения – величина, равная отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети.

Импульс напряжения – резкое изменение напряжения в точке электрической сети в течении нескольких миллисекунд, за которым следует восстановление уровня напряжения.

Как видно из приведенных требований, процессы контроля и управления качеством электрической энергии очень сложны. Приведенный, в данном учебном пособии комплекс лабораторных и практических заданий способствует освоению этого инженерного искусства.

## **2 Лабораторное исследование качества электроснабжения промышленных предприятий**

Оценка качества электроснабжения осуществляется по результатам эмпирических исследований электрических сетей. Процесс исследования неразрывно связан с вопросами выбора измерительных приборов и способов их подключения, организации сбора данных, обработки данных, порядка принятия решений. Освоение представленного лабораторного курса способствует получению основных профессиональных компетенций, необходимых для проведения мониторинга качества электроснабжения.

### **2.1 Техника безопасности при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Качество электроснабжения»**

Практическая часть дисциплины «Качество электроснабжения» выполняется с использованием реальных измерительных приборов и силового оборудования. Студент должен проявить себя сначала в качестве электромонтера собрав схему моделируемой системы электроснабжения, затем в качестве инженера, в задачи которого входит мониторинг параметров сети, анализ полученных данных, разработка рекомендаций для дальнейшей эксплуатации.

По всем признакам в лаборатории «Качества электроснабжения» существует вероятность поражения электрическим током, пожара и утомления обучающихся, что требует проведения инструктажа при допуске студента к самостоятельной работе.

Настоящий параграф не претендует на статус нормативного документа, скорее, здесь дополнительно приведена информация, которая должна остаться в памяти обучаемого после ознакомления с инструкциями по электробезопасности, пожарной безопасности и охране труда, с учетом особенностей эксплуатации стендов и используемого помещения.

В лабораторию «Качества электроснабжения» студенты заходят с разрешения преподавателя, снимают верхнюю одежду и занимают закрепленные за ними рабочие места.

Не допустимо подходить к стендам с едой, напитками и легко воспламеняющимися веществами. Складывать на стенд посторонние вещи: сумки, шапки, куртки. В процессе работы, студент использует

только стандартное лабораторное оборудование, тетради, пишущие принадлежности, калькуляторы и справочную литературу.

В течении всего времени нахождения в аудитории запрещается шуметь, бегать.

Перед началом работы студент должен ознакомиться с методическими указаниями и схемой исследуемой модели электрической сети, после чего получить разрешение у преподавателя на перестановку блоков закрепленных на стенде. Установив нужные блоки, студент приступает к сбору схемы, начиная с соединения гнезд защитного заземления. Для каждого соединения блоков подбирается проводник нужной длины, не допустимо использовать два коротких провода вместо одного длинного. Собранную схему студент должен показать преподавателю и получить разрешение на включение стенда, это же следует делать после каждого изменения собранной схемы. Переключать провода в схеме допустимо только при отключенном источнике питания.

В случаи возникновения внештатной ситуации, появлении запаха горелой изоляции, дыма или открытого огня, следует отключить источник питания стенда. Если отключение источника питания опасно или невозможно, тогда отключить вводной коммутационный аппарат питающий все стенды. Вводной, трехполюсный, автоматический выключатель находится справа от входной двери на высоте 170 см от пола.

С целью предотвращения поражения электрическим током следует выполнять все действия последовательно, исключая одновременное прикосновение к частям электроустановки, допускающим наличие разности потенциалов. Так же, исключить прикосновения к напарнику работающему на другой части электроустановки, особенно при включенном стенде.

В случае поражения электрическим током следует обесточить пострадавшего, оказать ему первую медицинскую помощь, вызвать врача.

Для оказания первой помощи студент может использовать аптечку находящуюся в верхнем ящике стола преподавателя.

В случае появления открытого огня, следует обесточить электроустановки и потушить огонь углекислотным огнетушителем находящимся слева от входной двери.

Обо всех внештатных ситуациях: поражение электрическим током, признаках пожара, неисправностях оборудования следует незамедлительно сообщать преподавателю.

С целью предотвращения ошибочных действий студента вызванных общим утомлением, продолжительность лабораторной работы не превышает двух учебных часов с пятиминутным перерывом между ними.

Обратим внимание на то, что конструкция лабораторных стендов практически исключает возможность причинения вреда здоровью обучающегося, что достигается в основном удобным расположением блоков, хорошей изоляцией проводников, закрытым исполнением разъемов, режимом работы нейтрали стенда и использованием устройств дифференциальной защиты (УЗО). С другой стороны, безопасность каждого студента напрямую связана с его поведением вблизи электроустановки. Постоянное применение правил техники безопасности способствует их усвоению на уровне подсознания, что позволяет сохранить работоспособность на протяжении всей учебной и профессиональной деятельности.

## 2.2 Описание лабораторного оборудования

Лаборатория по дисциплине «Качество электроснабжения» оборудована пятью учебными стендами, представляющими собой столы с установленной на них алюминиевой рамой, предназначенной для крепления элементов системы электроснабжения, в виде отдельных блоков (модулей). Каждый блок выполнен в жестяном корпусе и имеет разъемы для подключения других блоков и защитного заземления с помощью изолированных проводов [4].

В виде блоков на стенд устанавливаются источники питания, измерительные приборы, силовое и дополнительное оборудование. Физические модели изучаемых систем электроснабжения создаются путем закрепления блоков на стенде в удобной для выполнения работы последовательности и соединения их проводниками по схемам, опубликованным в данном учебном пособии.

В качестве лабораторных источников питания используются блоки схематично изображенные которых показано на рис. 1.

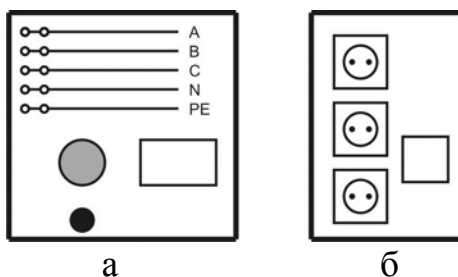


Рисунок 1 – Блоки лабораторных источников питания  
а – источник питания стенда; б – источник питания измерительных приборов.

Блок представленный на рис.1.а, предназначен для питания физической модели от промышленной сети 380 В. Дополнительно оборудован автоматическими выключателями, УЗО, тепловым реле, блокировкой от случайного включения.

Блок на рис.1.б, предназначен для питания измерительных приборов (мультиметры, ваттметры), на передней панели имеет три штепсельных разъема для подключения внешних приборов и еще четыре разъема находятся тыльной стороны блока для питания стендового оборудования. Дополнительно оснащен автоматическими выключателями и УЗО.

Схематичные изображения оборудования предназначенного для непосредственного измерения показаны на рис.2.

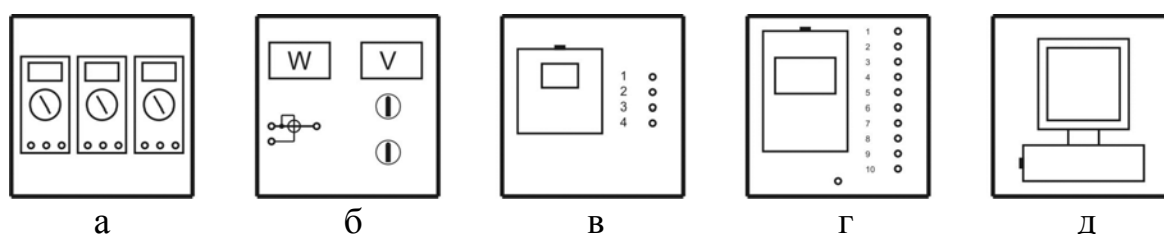


Рисунок 2 – Блоки измерительных приборов

а – блок мультиметров; б – блок измерителей мощности; в – прибор Ресурс ПКЭ 1,5; г – прибор ЭРИС КЭ 06; д – РС.

Измерения токов, напряжений и активных сопротивлений участков сети выполняются блоком представленным на рис.2.а. Блок включает в себя три независимых мультиметра МУ60, для использования которых необходимо подключить приборы по схеме, выставить пределы измерений и включить питания приборов.

Активная и реактивная мощность электрических нагрузок измеряется с помощью блока изображенного на рис.2.б. Блок включает в себя ватт и варметр, тумблер для изменения пределов измерения, сигнальные лампы, мигание красной указывает на перегрузку предела измерения и требует включения более грубого предела, мигание зеленой говорит о нормальной работе и возможности переключения на более точный предел измерения. Второй тумблер позволяет отключать один из приборов блока, что может быть полезно при отсутствие возможности измерений приборами на одинаковых пределах измерений. Так же на лицевой панели стенда расположены разъемы для подключения к измеряемому узлу. Для проведения измерений необходимо подключить прибор к узлу нагрузки и включить его питание.

Следует отметить, что рассмотренные электрические приборы не предназначены для анализа качества электрической энергии по причине



значительного роста погрешности измерений в сетях с несинусоидальным током. Современные приборы позволяющие проводить все интересующие нас измерения изображены на рис.2.в, рис.2.г.

Прибор Ресурс ПКЭ 1.5 предназначен для анализа качества электрической энергии, фиксирует все показатели качества, к узлу нагрузки подключается параллельно, по напряжению, допускает включения через измерительные трансформаторы. На лицевой панели прибора расположен графический экран и порт для связи с компьютером. Прибор получает питание от сети.

Прибор ЭРИС-КЭ06 предназначен учета электрической энергии и постоянного мониторинга качества энергии. Создает архивы по всем ПКЭ кроме фликеров. Подключается как обычный счетчик электрической энергии, допускает только стационарную работу. Имеет удобный графический интерфейс и порт для подключения к компьютеру. Обладает дополнительными опциями для работы в многотарифной зоне, самостоятельно рассчитывает стоимость потребленной энергии с учетом штрафов и надбавок за низкое качество энергии.

В работе с указанными приборами большое значение имеет возможность подключения к компьютеру через порты RS-285 и RS-485. Во-первых просмотр текущих показаний с монитора компьютера значительно удобнее, появляется возможность слежения за несколькими параметрами одновременно. Во-вторых чтение накопленных архивов и изменения уставок приборов возможно только через компьютер.

Программное обеспечение приборов имеет одинаковые элементы и состоит из трех отдельных программ. Первая позволяет просмотр текущих данных, вторая чтение архивов, создание отчетов и их первичный анализ. Третья предназначена для программирования прибора.

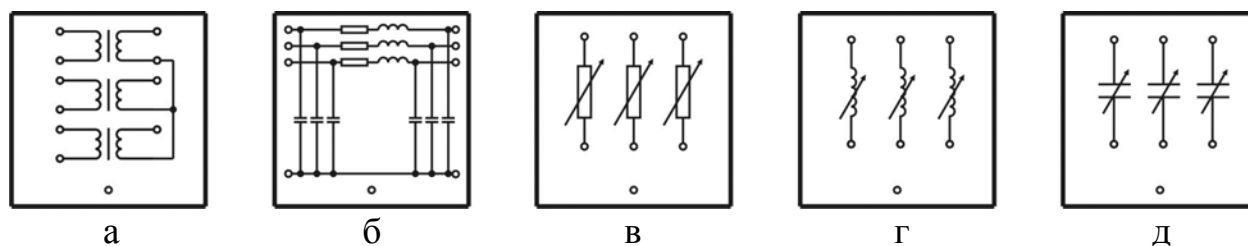


Рисунок 3 – Блоки силового оборудования

а – трехфазная трансформаторная группа; б – линия электропередач; в – активная нагрузка; г – индуктивная нагрузка; емкостная нагрузка.

Для подключения прибора к компьютеру, обозначенного отдельным блоком рис.2.д, требуется подключить прибор к сети, соединить прибор с компьютером, включить сеть, запустить программное обеспе-

чение. Для установки соединения потребуется ввести серийный номер прибора, скорость обмена данными и пароль.

Силовое оборудование моделируемой электрической сети представлено на рис.3.

Основным электрооборудованием распределительных сетей является трансформатор, блок которого изображен на рис.3.а. Блок состоит из трех однофазных трансформаторов допускающих как независимую эксплуатацию так и в составе трансформаторной группы. Первичные обмотки трансформаторов соединены в звезду, вторичные допускают как соединение в звезду так и в треугольник. Номинальный коэффициент трансформатора равен 1, лицевая панель блока дополнена тумблерами для раздельного переключения отпаяк первичной и вторичной обмоток.

Моделирование линии электропередач осуществляется с помощью блока на рис.3.б. Трехфазная линия представлена последовательно включенными активным и индуктивным сопротивлением величина которых изменяется ступенчато тумблерами, симметрично по трем фазам. Моделирование емкостной составляющей линии реализовано двумя группами конденсаторов включенных в начале и конце линии. Величина емкости также может быть изменена.

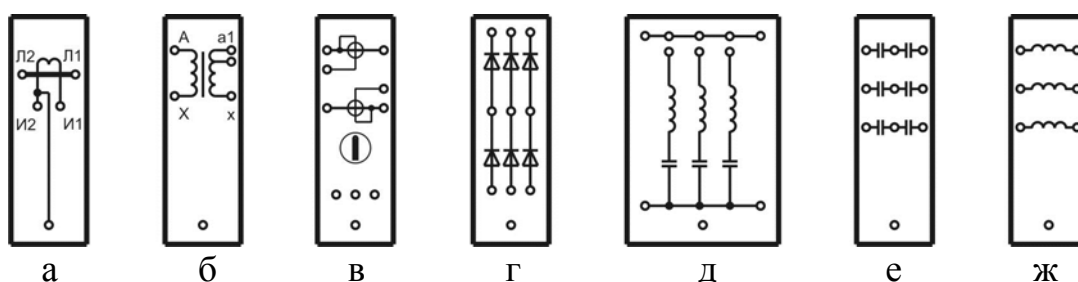


Рисунок 4 – Блоки вспомогательного оборудования

а – трансформатор тока; б - трансформатор напряжения; в – коммутатор; г – силовые диоды; д – фильтро-компенсирующее устройство; е – конденсаторы; ж – дроссель.

Для моделирования силовых нагрузок используются блоки из резистивных, индуктивных и емкостных элементов изображенных на рис.3.в, рис.3.г,рис.3.д соответственно. Блоки состоят из трех элементов сопротивления которых независимо регулируются тумблерами на лицевой панели.

Блоки дополнительного оборудования, используемого для моделирования режимов работы электрической сети представлены на рис.4.

Блоки измерительных трансформаторов тока (рис.4.а) и напряжения (рис.4.б) используются для изучения способов подключения прибо-

ров учета, коэффициенты их трансформации равны 1, поэтому, в данном лабораторном курсе, их использование не влияет на результаты экспериментов.

Для подключения измерительных приборов также используется блок-коммутатор (рис.4.в), в случаях, когда необходимо одновременно подключить один блок измерения мощности (рис.2.б) к нескольким узлам нагрузки. Допускает до пяти присоединений, снабжен тумблером для переключения между узлами нагрузок.

Блок с силовыми диодами, используется для моделирования вентильных нагрузок, на его основе можно собрать схемы как однофазных (одно и двухпульсовых) выпрямителей, так и наиболее распространенного в промышленности мостового шестипульсового выпрямителя.

Назначение блока силовых конденсаторов (рис.4.е) ограничено физическими моделями требующих включения не регулируемых устройств продольной или поперечной компенсации. Блок состоит из трех независимых групп конденсаторов включенных последовательно по две штуки.

С целью ограничения тока на участке цепи или повышения индуктивного сопротивления линии может быть использован блок дросселей (рис.4.ж). Блок состоит из трех не регулируемых, независимых индуктивных элементов.

Рассмотренные блоки представляют физические модели наиболее распространенных элементов электрической сети. Процессы изучаемые на их основе происходят реально. Представленный набор оборудования универсален, что дает широкие возможности для обучающегося познакомиться с методами анализа качества электроснабжения и алгоритмом принятия производственных решений.

## **2.3 Мониторинг электрических сетей**

Электрическая энергия передается по линиям электропередач от генератора до конечного потребителя, при этом визуальных проявлений работы линии не наблюдается. Определить находится ли линия под напряжением, протекает ли по ней ток нагрузки, а так же конкретные значения количественных параметров режима работы линии, возможно только с помощью специальных измерительных приборов, используемых как в режиме тестеров, так и для организации постоянного мониторинга. Способность проводить электрические измерения считается одной из важнейших профессиональных компетенций любого специалиста электроэнергетики.

**Целью работы является** изучения способов подключения лабораторных измерительных приборов к электрической сети и регистрации показаний.

В лаборатории по «Качеству электроснабжения» используются как общедоступные измерительные приборы: вольтметр, амперметр, ваттметр, варметр, так и современные, высокотехнологичные анализаторы качества электрической энергии такие как Ресурс ПКЭ 1.5, ЭРИС-КЭ 0.6. Рассмотрим особенности работы каждого из приборов, обращая особое внимание на способы подключения приборов, порядок проведения измерений, достоинства приборов и недостатки.

Измерения токов и напряжений на лабораторных стендах возможны с помощью мультиметра МУ60. Мультиметром называют измерительный прибор позволяющий проводить измерения разных физических величин. Мультиметры широко используются в качестве тестеров, а также измерительных приборов низкой точности. Распространению мультиметров также способствует низкая стоимость приборов, компактность, широкие функциональные возможности.

В стандартные функции мультиметров входит измерение напряжения (постоянного и переменного), тока, активного сопротивления. В зависимости от модели изменяются пределы измерений и набор дополнительных функций, таких как измерение сопротивления реактивных элементов, частоты, тестеры полупроводниковых элементов и т.д.

Вариант подключения мультиметра для измерения напряжений и тока показан на рис 5.

На лицевой панели мультиметра расположено четыре гнезда для подключения проводов (три красных и один черный), поворотный переключатель пределов измерений и жидко-кристаллический экран.

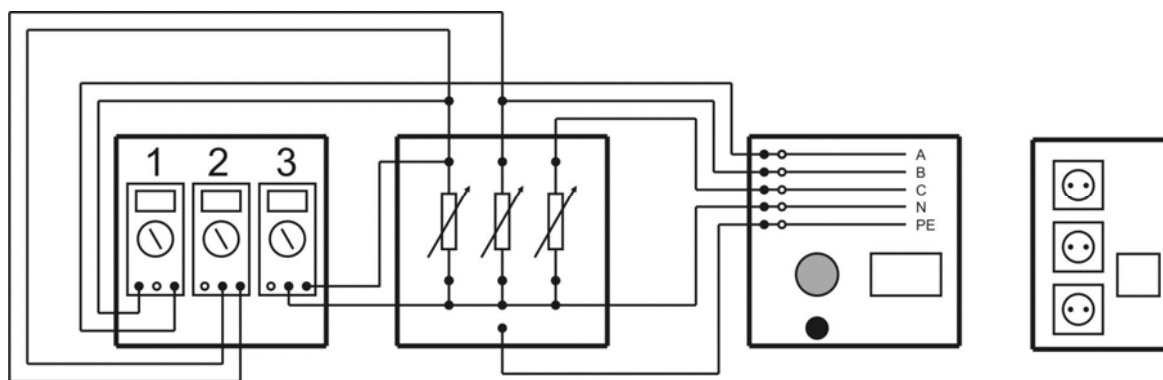


Рисунок 5 – Измерение токов и напряжений

Черное гнездо является общим входом для всех измерений, остальные используются в зависимости от измеряемой величины.

Назначение гнезд и пределы измерений указаны над ними с помощью буквенного обозначения.

Для измерений напряжений, сопротивлений, частоты тока, прибор подключается параллельно участку сети. Соединительные провода подключены в два правых гнезда и поворотный переключатель установлен в требуемый предел измерения. На рис.5 показано подключение мультиметра №2 на линейное напряжение, мультиметра №3 на фазное. В данном случае показания приборов должны отличаться в  $\sqrt{3}$  раз.

Для измерения токов необходимо включить прибор в разрыв электрической сети, соединительные провода подключаются к черному и одному из левых гнезд. Токовые входы защищены плавкими предохранителями, один из них предназначен для измерения токов в мА, другой в А. На рис.5 показано подключение мультиметра №1 в режиме амперметра.

Мощность электрических нагрузок измеряется с помощью ватт и варметров, схемы включения которых показаны на рис.6.

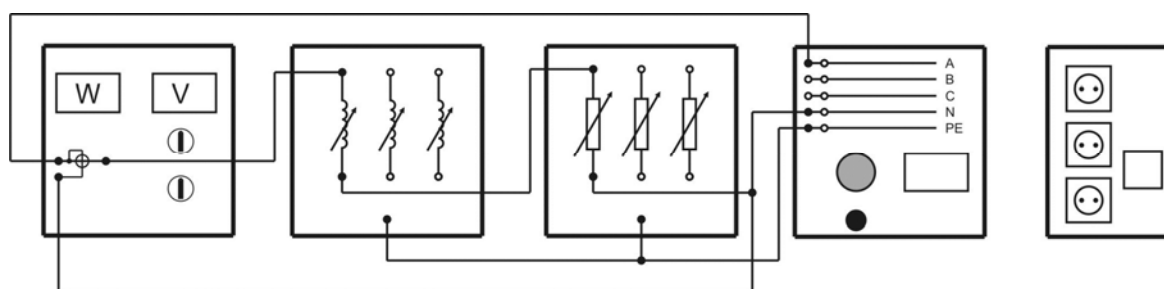


Рисунок 6 – Измерение мощности

Измерение мощности происходит путем аналогового перемножения токов и напряжений. Для подключения прибора токовая обмотка включается в разрыв сети, обмотка напряжения параллельно узлу нагрузки и нейтральной точке. Схематично прибор изображают в виде круга пересеченного двумя перпендикулярными линиями. Горизонтальная линия обозначает токовую обмотку, вертикальная обмотку напряжений. Звездочки на концах обмоток символизируют их начала, т.е. разъем для подключения к питающей сети.

Точность измерения ваттметром зависит от двух основных факторов, класса точности прибора и включенного предела измерения. Пределы измерения по току и напряжению устанавливаются отдельно. Путем умножения пределов тока и напряжения можно узнать максимальные показания прибора и определить цену деления. Предел измерения следует увеличить в случае срабатывания красной лампочки на панели прибора, зеленая лампочка сообщает о нормальной работе и возможно-

сти уменьшения предела. В процессе работы встречаются ситуации когда трудно подобрать предел измерения, например при мощной активной нагрузке измерения реактивной мощности на тех же пределах будет невозможно. Для таких случаев в блоке предусмотрена раздельная работа прибора. Тумблер имеет три положения, работа обоих приборов, работа ваттметра, работа варметра.

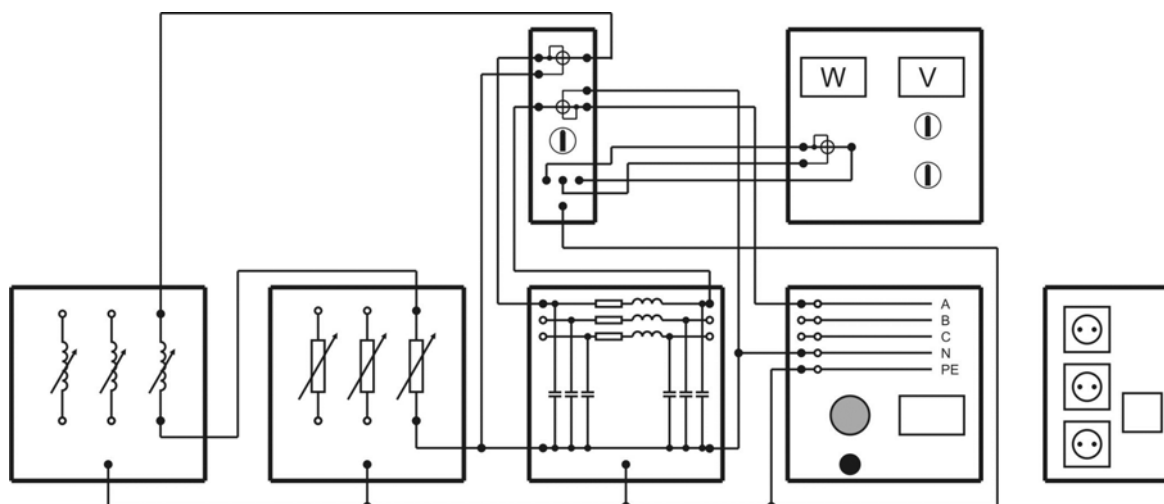


Рисунок 7 – Измерение мощности в разных узлах нагрузки одним прибором

В практических исследованиях возникает необходимость одновременного измерения мощности в разных точках схемы физической модели сети с помощью одного прибора. Для этого используется блок-коммутатор схема включения которого показана на рис.7.

Ваттметры широко используются для проведения текущих измерений мощности, при этом важное значение имеет мощность переданная за определенный временной отрезок. Приборы осуществляющие аналоговое перемножения тока, напряжения и времени их действия называются счетчиками электрической энергии.

Счетчики электрической установлены у каждого потребителя, расчет за использованное электричество ведется именно по их показаниям. Принципиально, схемы подключения ваттметра и счетчика электрической энергии аналогичны. На рис.8 и рис.9, показаны схемы подключения счетчиков электрической энергии к сети. Обратите внимание, что токи и напряжения промышленного потребителя настолько велики, что в основном используется полукосвенное подключение прибора (через трансформатор тока) или косвенное (с использованием трансформаторов тока и напряжения).

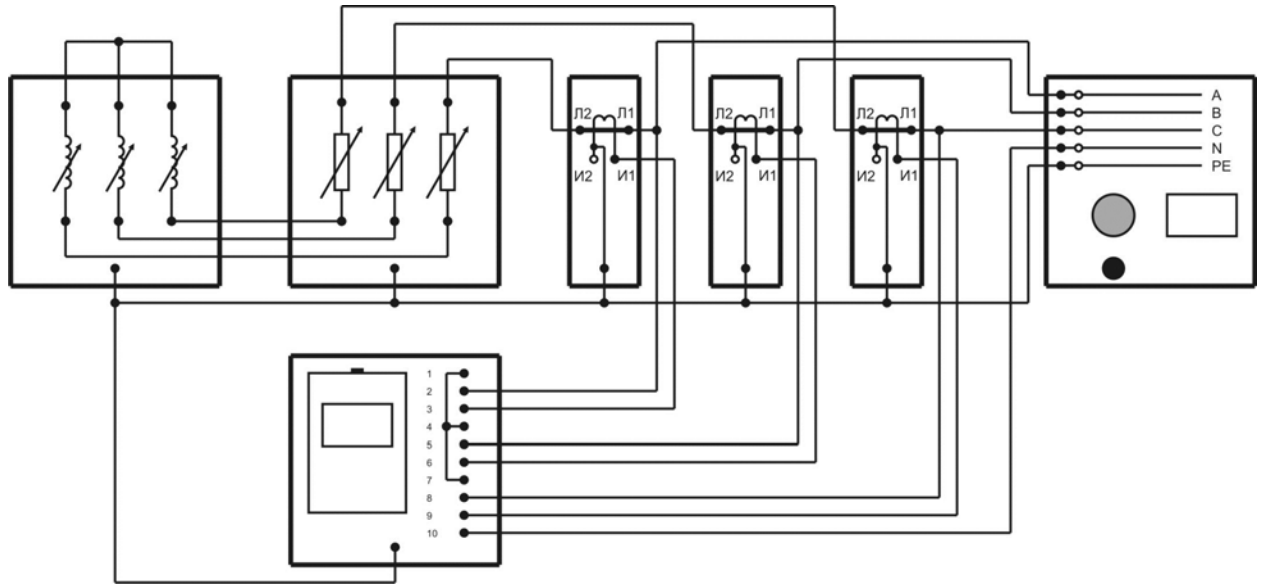


Рисунок 8 – Полукошвенное подключение прибора ЭРИС-КЭ0.6

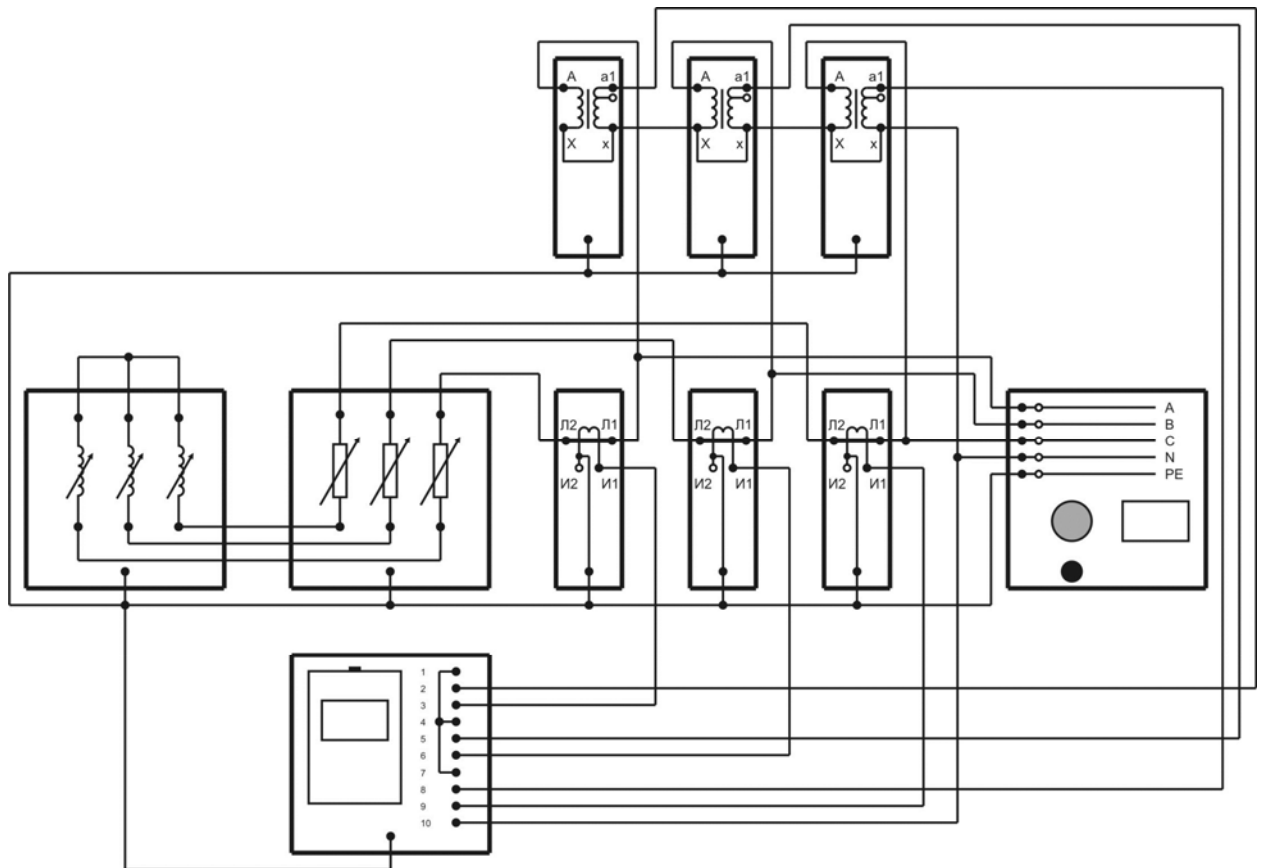


Рисунок 9 – Косвенное подключение прибора ЭРИС-КЭ0.6

В лаборатории «Качества электроснабжения» используются современные счетчики электрической энергии ЭРИС-КЭ0.6. Помимо основной функции, прибор осуществляет постоянный мониторинг каче-

ства электрической энергии по всем показателям кроме фликеров, допускает просмотр показаний как с приборной панели так и через удаленный компьютер. Позволяет создание автоматизированных систем контроля и учета электрической энергии на своей основе. Таким образом, ЭРИС-КЭ0.6 объединяет два прибора в одном корпусе, это счетчик электрической энергии и современный анализатор качества электрической энергии.

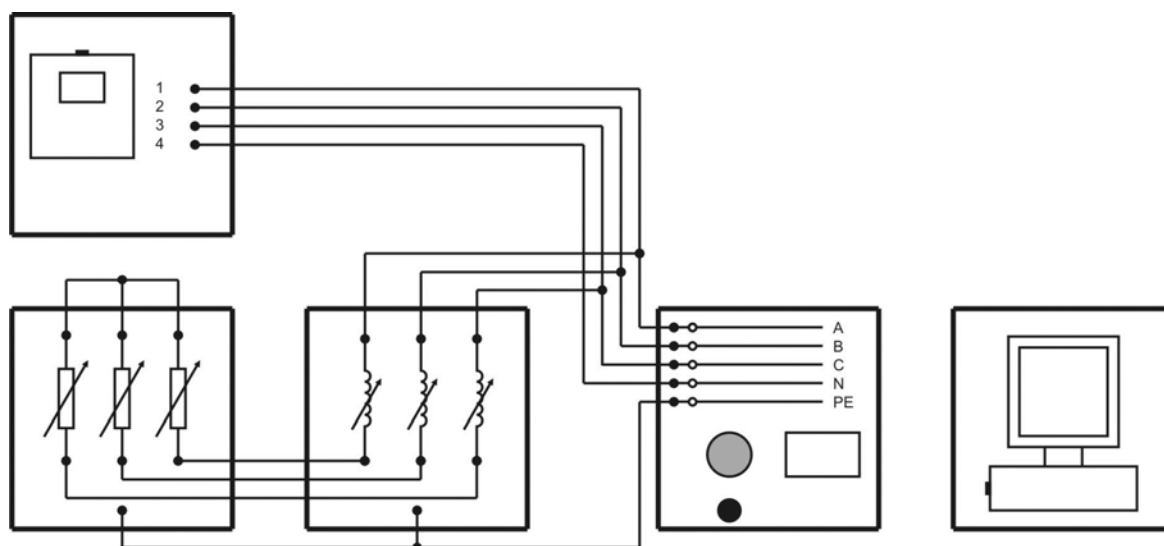


Рисунок 10 – Прямое подключение прибора Ресурс ПКЭ 1,5

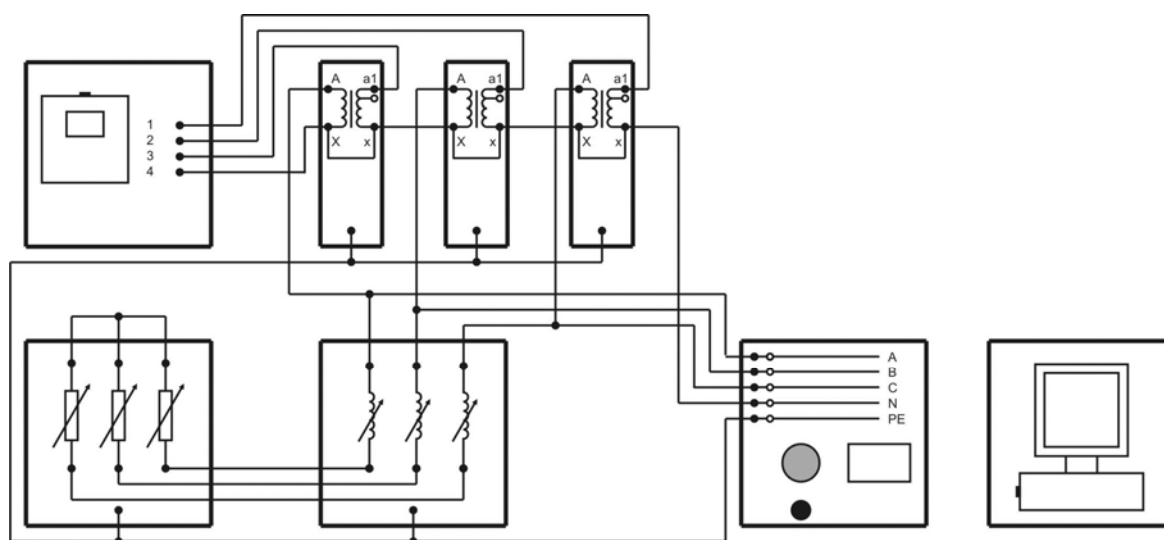


Рисунок 11 – Косвенное подключение прибора Ресурс ПКЭ 1,5

Анализаторы качества электрической энергии это высокоточные, современные узкоспециализированные, мобильные приборы. В лаборатории по «Качеству электроснабжения» используется переносной анализатор Ресурс ПКЭ 1.5. Прибор подключается к узлам нагрузки только



по напряжению, при этом изменение схемы узла не требуется. Прибор осуществляет мониторинг всех показателей качества электрической энергии и может работать с удаленным компьютером. Способы непосредственного и косвенного подключения прибора к сети показаны на рис. 10, рис. 11.

### **Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” источника.
3. Получите задание у преподавателя (преподаватель задает номер схемы);
4. Собрать схему, на лабораторном стенде;
5. Включить стенд;
6. Провести измерения;
7. Показать результат преподавателю;
8. Сделать выводы по работе;
9. Оформить отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Нарисуйте схему подключения амперметра, вольтметра, ваттметра.
2. Объясните, как вычислить цену деления стрелочного прибора.
3. Перечислите показатели качества электрической энергии.
4. Перечислите приборы используемые для анализа качества электрической энергии.
5. Перечислите виды измерительных трансформаторов и их назначение.

## **2.4 Оценка погрешности измерительных приборов в сетях несинусоидального напряжения**

Мониторинг параметров электрической сети происходит в течение всего время эксплуатации. Каждое ответвление от вводного распределительного устройства, оснащается амперметрами, позволяющими оценить загрузку линии электропередач. Дополнительно, в распределении

тельных устройствах, устанавливаются вольтметры, подключенные на фазное и линейное напряжение, счетчики активной и реактивной электрической энергии, частотомеры. Перечисленные приборы, как правило, электромагнитного или электродинамического принципа действия, на сегодняшний день, позволяют оценить лишь принципиальную работоспособность электрической сети, они не пригодны для проведения анализа качества электрической энергии и коммерческого учета.

Показание приборов электромагнитных и электродинамических систем, а также большинства цифровых мультиметров, широко используемых в работе электромонтеров, можно считать достоверными, только в сетях синусоидального напряжения, о чем указано в ГОСТ 13109-97. В сетях с искажением синусоидальности превышающем 5 %, измерение следует проводить электронными измерительными приборами, которые вычисляют действующее значение напряжения как среднеквадратическое за полупериод. Погрешность приборов, вычисляющих действующее значение напряжения как амплитудное деленное на  $\sqrt{2}$ , увеличивается с ростом искажения синусоидальности и зависит от ширины гармонического спектра и действующих значений напряжений высших гармоник.

**Целью лабораторной работы является:** изучение зависимости погрешности мультиметра МУ60 измеряющего напряжение в сети с несинусоидальным током от коэффициента искажения синусоидальности.

Для изучения погрешности мультиметра МУ60, необходима физическая модель электрической сети, собираемая на учебном стенде, и эталонный прибор, позволяющий производить электрические измерения в сетях не синусоидального напряжения. В качестве эталонных приборов применим анализаторы качества электрической энергии ЭРИС КЭ 0.6 и Ресурс ПКЭ 1.5, схемы включения которых в физическую модель электрической сети представлены на рис.12 и рис.13, соответственно.

Относительная погрешность вольтметра вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{U - U_d}{U_d} \cdot 100\%,$$

где,  $U, U_d$  – показания испытуемого и эталонного приборов соответственно.

Результаты эксперимента представляются графической зависимостью  $\delta = f(K_U)$ , используя которую следует сделать выводы о влиянии искажения синусоидальности на метрологические характеристики исследуемого прибора. Результаты эксперимента заносятся в таблицу 1.

В таблице 1 используются следующие обозначения:  $R_N$  – сопротивление между общей точкой первичных обмоток трансформатора и

нейтралью источника питания, Ом;  $K_U$  – коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %;  $U_1, U_2, U_3$  – показания первого, второго и третьего вольтметра соответственно, В;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – относительная погрешность первого, второго и третьего мультиметра соответственно, %.

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

№	Экспериментальные данные						Расчетные данные		
	$R_N$ , Ом	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_d$ , В	$K_U$ , %	$\delta_1$ , %	$\delta_2$ , %	$\delta_3$ , %
1									
2									
...									
7									

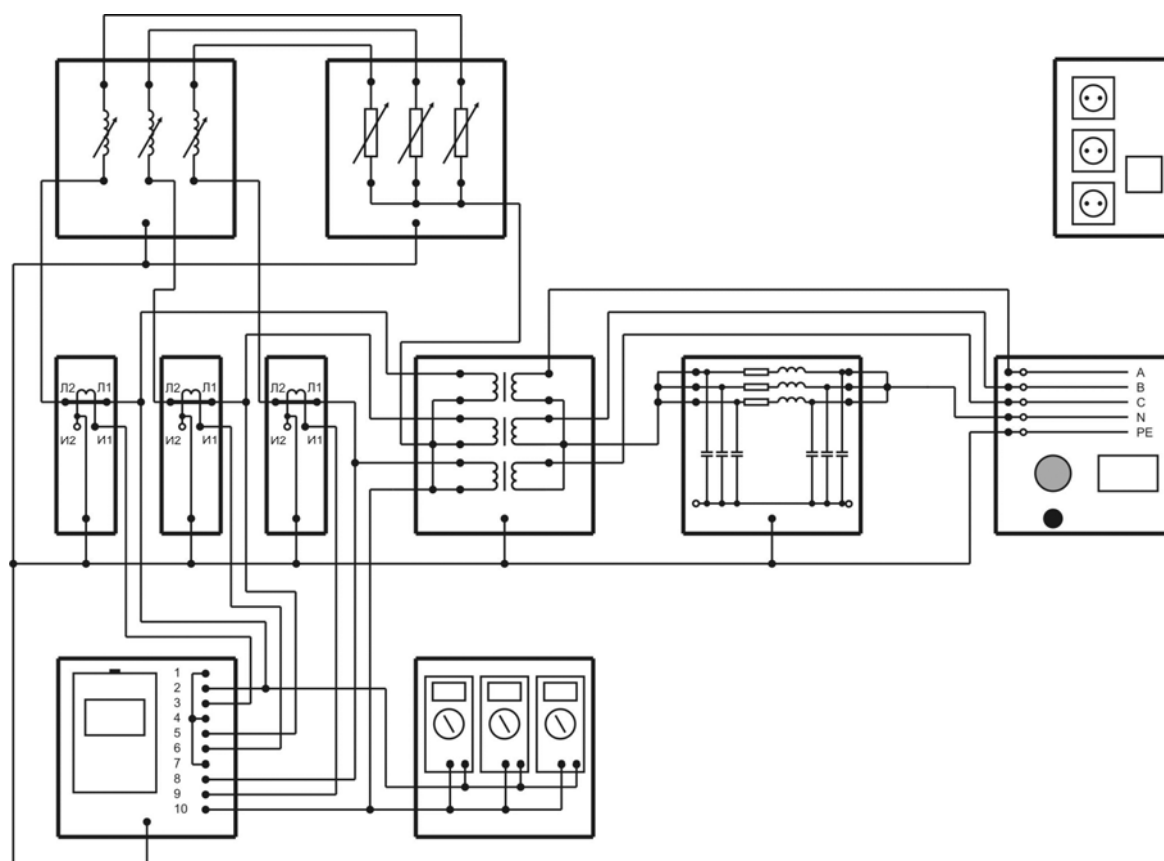


Рисунок 12 – Схема экспериментальной установки с использованием прибора ЭРИС-КЭ0.6

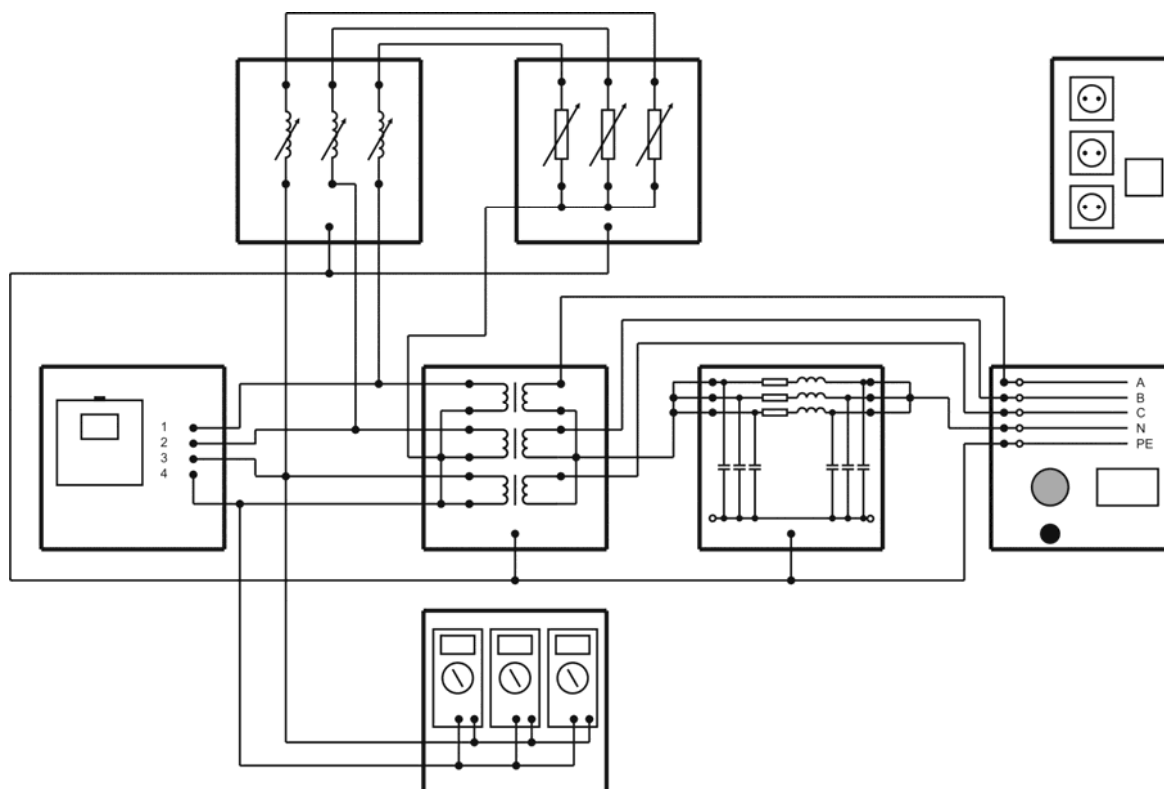


Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки с использованием прибора Ресурс ПКЭ 1.5

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис. 12 или рис.13;
4. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает сопротивление нагрузки.
5. Уменьшить активное и индуктивное сопротивление блока линии электропередач до нуля;
6. Включить установку и зафиксировать показания измерительных приборов в таблице 1;
7. Увеличить сопротивление блока линии электропередач путем снятия перемычек с сопротивлений блока. Для изменения схемы установку выключаем. Таким образом, получают еще две точки измерения. Результат измерений фиксируем в таблице;

8. Увеличить сопротивление блока линии электропередач путем последовательного включения сопротивлений блока. Для изменения схемы установку выключаем. Таким образом, получаются еще две точки измерения. Результат измерений фиксируем в таблице;
9. Создайте видимый разрыв между общей точкой первичных обмоток трансформатора и источником питания. Провести последнее измерение.
10. Построить графические зависимости  $\delta = f(K_U)$  для трех испытуемых приборов;
11. Сделать выводы по работе;
12. Оформить отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите виды погрешности измерительных приборов и способы их определения.
2. Перечислите причины возникновения погрешности измерительных приборов.
3. Перечислите требования к измерительным приборам работающим в сетях не синусоидального напряжения.
4. Объясните, почему измерительные приборы электромагнитной и электродинамической систем не могут быть использованы в современных системах коммерческого учета электрической энергии.
5. Объясните принцип работы анализаторов качества электрической энергии.

### **2.5 Интегральная вероятность отклонения показателей качества электрической энергии**

В процессе эксплуатации электрической сети происходит постоянное изменение нагрузок потребителя, влияющее на значение показателей качества электрической энергии (ПКЭ). Современные технические средства не позволяют точно поддерживать заданное значение ПКЭ в любой момент времени, поэтому действующий стандарт ГОСТ 13109-97 устанавливает допустимые пределы изменения ПКЭ для всех нормируемых величин.

ПКЭ, закон изменения которых можно предугадать на основе известных технологических процессов, отклонение которых, имеет систематический характер - нормируются, к ним относятся: установившиеся отклонения напряжений, колебания напряжений, искажение синусои-

дальности напряжений, искажение симметрии напряжений. Нормирование ПКЭ, отклонения которых происходит в результате случайных процессов, аварийных ситуаций или природных явлений невозможно.

В стандарте ГОСТ 13109-97 для каждого нормируемого ПКЭ, отдельно указано, что допустимое значение ПКЭ должно быть обеспечено с интегральной вероятностью выше 0,95. Другими словами, в течение 95 % времени работы электрической сети значение ПКЭ не должно выходить за рамки допустимых отклонений. Стандарт также учитывает, вероятность возникновения аварийных ситуаций и послеаварийных режимов работы, общее время которых не должно превышать 5 %, когда допускаются работа сети при максимальных отклонениях ПКЭ. Работа сети при значениях ПКЭ превышающих максимальные – не допустима.

Таким образом, анализ качества электрической энергии связан не только с контролем значений ПКЭ, но и временем их существования. В производственных условиях, заключение о соответствии качества электрической энергии требованиям ГОСТ 13109-97 можно сделать только по результатам недельного исследования электрической сети.

**Целью лабораторной работы является** оценка интегральной вероятности отклонений показателей качества электрической энергии на примере установившихся отклонений напряжения.

Существующие методики оценки интегральной вероятности отклонений значений ПКЭ опираются на статистические методы обработки экспериментальных данных и расчете статистических характеристик: вероятность события, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение. В связи с чем, требуется четкое представление о понятии «событие».

Основная особенность производства, распределения и передачи электрической энергии, заключается в одновременности этих процессов. Существование напряжения на зажимах электроприемника – это событие протекающее во времени, описываемое длительностью в секундах, минутах, часах. Существование напряжения с определенными характеристиками или отклонениями ПКЭ – это тоже событие, длительность которого ограничена.

Обсуждаемые события не могут существовать вне времени, поэтому вероятность каждого отдельного события  $P_i$  определяется как отношение времени существования события  $\Delta t_i$  к времени всего исследования  $T$ :

$$P_i = \frac{\Delta t_i}{T}$$

Результаты определения вероятности однотипных событий представляются в табличной форме записи или в виде гистограммы. Рассмотрим гистограмму отклонений напряжений на рис.14.

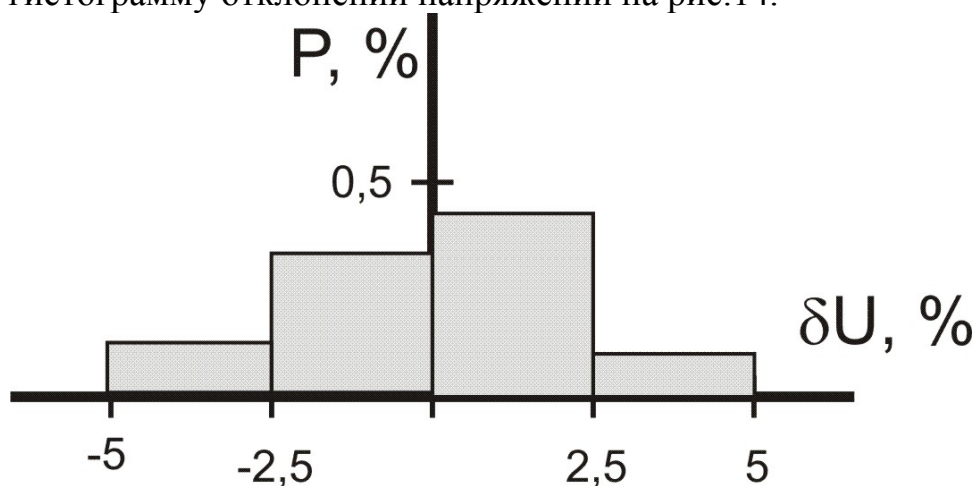


Рисунок 14 – Гистограмма отклонений напряжений

Построим гистограмму отклонений напряжений за сутки. Время между измерениями напряжений один час. Отметим, что в реальных приборах контроля ПКЭ, время между измерениями не превышает 3-х секунд.

По результатам измерений определяем величину отклонений ПКЭ. Формула для расчета установившихся отклонений напряжений записывается следующим образом [2]:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \%,$$

где  $U$ ,  $U_{\text{ном}}$  – фактическое и номинальное напряжения сети соответственно, В.

Из полученного массива данных выделяем наибольшие и наименьшее отклонение и разделяем расстояние между этими значениями на равные интервалы, чем меньше ширина интервала тем точнее анализ данных. На гистограмме рис.14 наибольшее значение отклонения не превышает +5 %, наименьшее –5 %, ширина интервала 2,5 %.

Высота столбика гистограммы характеризует вероятность возникновения события, то есть появления напряжения с отклонением из заданного интервала, ширины столбика. Определение вероятности отклонений напряжения поясняется рис. 15.

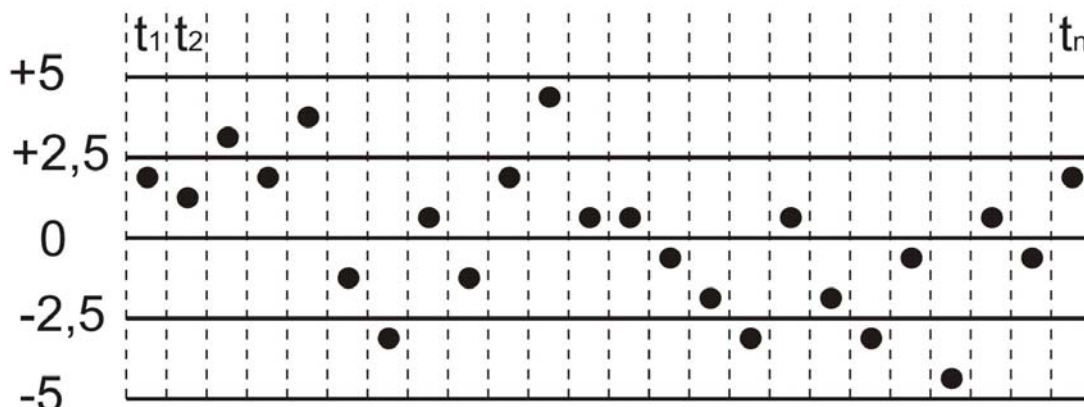


Рисунок 15 – Распределение отклонений напряжения по ширине исследуемого диапазона

Каждая точка на рис. 15, отображает результат одного измерения, длительность которого (в нашем примере) один час, сумма всех точек равна времени исследования, 24 ч. Определим время существования события - отклонения напряжения в пределах от 0 до 2,5 %, 10 точек, 10 часов. Вероятность данного события будет  $10/24$ . Высота других столбиков гистограммы определяется аналогично.

Следует отметить, что вероятность существования напряжения в каждом отдельном интервале – это частное событие, сумма вероятностей частных событий дает вероятность полного события, то есть 1.

Учитывая, что измерения проводились через одинаковое время, определение вероятности ПКЭ можно проводить в следующем порядке: рассчитать отклонения ПКЭ, подсчитать число попаданий отклонения ПКЭ в рассматриваемый интервал, разделить полученное число на общее число измерений, повторить действие для всех интервалов, построить гистограмму, перейти к расчету статистических характеристик.

Основной статистической характеристикой гистограммы называют математическое ожидание – это наиболее вероятное значение исследуемой величины. Математическое ожидание отклонений напряжения определяется как:

$$M(\delta U_y) = \sum_{i=1}^n \delta U_{yi} \cdot P_i,$$

где  $\delta U_{yi}$  – значение середины  $i$ -го интервала, %;  $P_i$  – вероятность попадания отклонений напряжений в  $i$ -й интервал.

Математическое ожидание, по своей сути не однозначно, одно и тоже значение может быть получено комбинацией разных данных, например: представим два столбика гистограммы одинаковой высоты, один будет построен на интервале от -7,5 % до -5%, другой от 5 % до 7,5



%, при этом математическое ожидание будет равно 0. Такое же значение математического ожидания можно получить взяв столбики одинаковой высоты на интервалах от -2,5 % до 0 % и от 0 % до 2,5. Не смотря на то, что математическое ожидание в обоих случаях одинаково, можно сделать вывод, что напряжение в первом случае не качественное.

Для учета разброса точек по ширине исследуемого диапазона в математической статистике используется величина называемая дисперсией.

$$D(\delta U_y) = \sum_{i=1}^n [\delta U_{yi} - M(\delta U_y)]^2 \cdot P_i.$$

В процессе дальнейшего анализа гистограммы отклонения ПКЭ, величина дисперсии нужна для определения следующей статистической величины, называемой среднеквадротическим отклонением:

$$\sigma_y = \sqrt{D(\delta U_y)}.$$

Распределение вероятности отклонения ПКЭ описывается нормальным законом. Известное значение математического ожидания и среднеквадротического отклонения позволяют составить уравнения распределения вероятности, а определенный интеграл, взятый по составленному уравнению, позволит получить искомое значение интегральной вероятности.

Пределы интегрирования, выбираются в зависимости от диапазона допустимых отклонений ПКЭ, например: для отклонений напряжений общепромышленных сетей интегрирования проводится на отрезке от -5 до +5; для осветительных сетей от -2,5 до 5.

В общем виде формула для определения интегральной вероятности записывается как:

$$\eta(\alpha; \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\sigma_y \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{[\delta U_y - M(\delta U_y)]^2}{2\sigma_y^2}} d\delta U_y,$$

где  $\alpha, \beta$  – нижняя и верхняя границы проверяемого диапазона, %.

Современные компьютерные программы, типа Mathcad, MATLAB, реализующие методы числового интегрирования, позволяют достаточно простое вычисление составленного интеграла, о чем написано в разделе help соответствующих программ. Ручное вычисление интеграла практически не возможно, по этой причине широкое распространение получили инженерные методы оценки интегральной вероятности, для объяснения которых следует познакомиться со свойствами нормального закона распределения.

Графическое отображение нормального закона распределения представляет собой перевернутую параболу, пересекающую ось абсцисс в точках  $-3\sigma$  и  $+3\sigma$ . Площадь фигуры, описанной нормальным законом распределения и осью абсцисс соответствует вероятности равной 1, причем 95 % площади фигуры попадает в интервал от  $-2\sigma$  и  $+2\sigma$ . Отсюда появилось правило – «Если среднеквадратическое отклонение меньше четверти допустимого диапазона изменения величины, то интегральная вероятность попадания данной величины в допустимый диапазон превышает 0,95».

Рассмотрим применение данного правила для установившихся отклонений напряжений: установившиеся отклонения напряжений на зажимах общепромышленных электроприемников допустимы в интервале от  $-5\%$  до  $+5\%$ , т.е. ширина диапазона 10 единиц. Четверть диапазона равняется 2,5. Соответственно, если по результатам расчета среднеквадратического отклонения, его значение будет меньше 2,5 то можно считать, что интегральная вероятность попадания отклонения напряжения в диапазон от  $-5\%$  до  $+5\%$  превышает 0,95 и такое напряжение удовлетворяет стандарту качества электрической энергии. Если среднеквадратическое отклонение окажется больше 2,5 то напряжение считаем не качественным.

Результаты практического исследования интегральной вероятности отклонений ПКЭ на лабораторном стенде заносятся в таблицу 2.

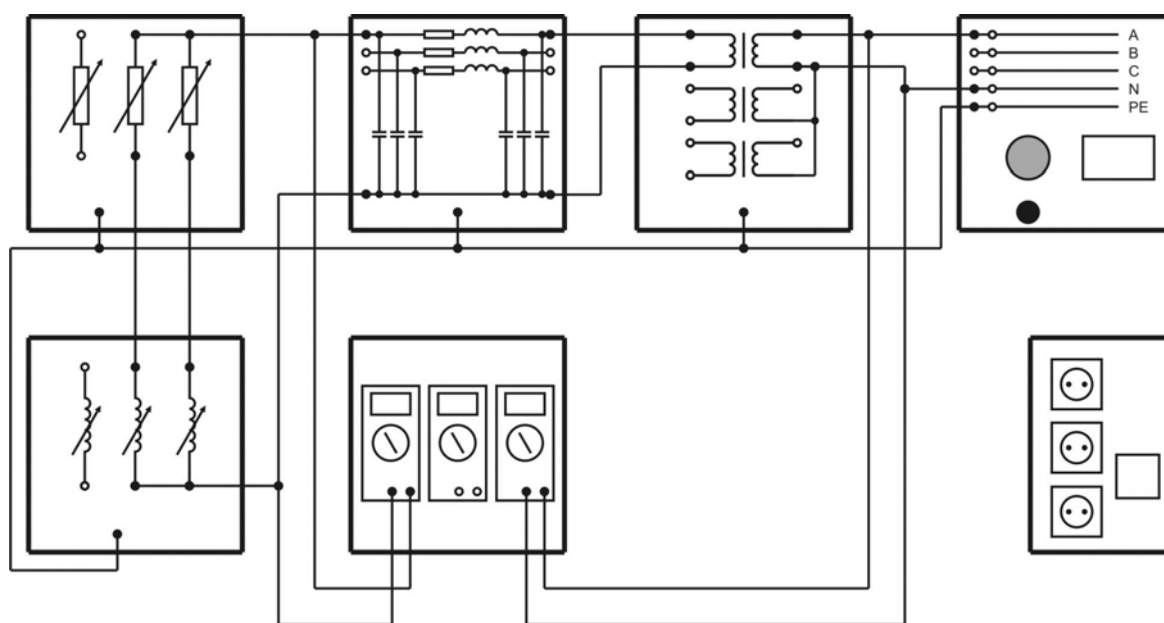


Рисунок 16 – Схема экспериментальной установки

Таблица 2 – экспериментальные и расчетные данные нагрузки

№	U, В	$\Delta U$ , В	$\delta U$ , %	M, %	D, %	$\sigma$ , %
1						
2						
...						
30						

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.16;
4. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает параметры линии электропередач и отпайку трансформатора.
5. Включить стенд и измерительные приборы.
6. Записывать текущие показания измерительного прибора через каждые 20 секунд, в табл. 2 (фиксируем показания на нагрузке и на источнике питания). Через каждые 60 секунд изменять нагрузку в произвольном порядке с помощью тумблеров на блоках активной и индуктивной нагрузки. Общее время исследования сети 10 минут.
7. Используя полученные данные, рассчитать отклонения ПКЭ, вероятность отклонений и построить гистограмму отклонений ПКЭ.
8. Рассчитать статистические характеристики по гистограмме отклонений ПКЭ и сделать вывод о соответствии ПКЭ требованиям нормативных документов.
9. Проверить полученный результат, путем составления уравнения нормального закона распределения вероятности отклонения ПКЭ и проведения числового интегрирования в любой доступной программе.
10. Сделать выводы по проделанной работе.
11. Оформить отчет.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите нормируемые ПКЭ и допустимые их допустимые отклонения.

2. Перечислите нормируемые ПКЭ и их предельно-допустимые отклонения.
3. Перечислите не нормируемые показатели ПКЭ.
4. Объясните смысл таких статистических характеристик как: вероятность события, математическое ожидание значения вероятности события, дисперсии, среднеквадратического отклонения.
5. Объясните методику инженерной оценки интегральной вероятности отклонения ПКЭ на основе свойств нормального закона распределения вероятности.

## **2.6 Управление качеством электроснабжения промышленного предприятия**

Существующие требования к качеству электрической энергии и эффективности режимов работы электротехнического оборудования во многих случаях носят формальный характер и по сути, имеют обязательный исполнительный потенциал только на границах балансовой принадлежности. Качество электроснабжения конечного потребителя в значительной степени зависит от добросовестности подразделений эксплуатирующих сети, величины ущербов обоснованных низким качеством электроснабжения, наличием финансовой поддержки повышения качества, а так же навыков электротехнического персонала в планирование и непосредственном управлении качеством электроснабжения.

**Цель лабораторной работы** заключается в изучение способов управления качеством электроснабжения промышленного предприятия на основе физической модели электросети.

Способы повышения качества электроснабжения характеризуются наукоемкостью, трудоемкостью, экономической и технической эффективности. С точки зрения технической эффективности прежде всего отметим метод встречного регулирования. Суть метода заключается в контроле одного или группы связанных показателей режима работы электрической сети и при возникновении отклонений показателей осуществляется регулирующее воздействие, способное минимизировать отклонение. Например, повышение электрической нагрузки трансформатора приводит к снижению уровня напряжения на шине низкого напряжения. В свою очередь, встречное уменьшение коэффициента трансформации с помощью анцаф приводит к стабилизации напряжения. Следует отметить, что возможности встречного регулирования напряжения ограничены конструктивными особенностями используе-

мых трансформаторов, мощностью нагрузок и параметрами режима работы источника питания, тем не менее, встречное регулирование напряжения является одним из самых эффективных мероприятий.

Встречное регулирование баланса реактивной мощности также широко применяется для управления режимом работы сети. При повышение индуктивных нагрузок линии электропередач достаточно увеличить мощность устройств поперечной компенсации в конце линии, что способствует разгрузки линии от реактивных токов, снижению потерь активной мощности на передачу реактивной и уменьшению потерь напряжения на линии. В свою очередь, поперечная компенсация в начале линии повышает коэффициент мощности на источнике питания, при этом улучшения режим работы линии электропередач и конечного электроприемника менее заметны, в чем можно убедиться экспериментально.

Отдельный вид устройств для компенсации реактивной мощности составляют фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ). Они представляют собой последовательно соединенные индуктивность и емкость подключенных на фазное напряжение и главным образом служат для ограничения токов высших гармонических составляющих. Тем не менее, на частоте основной гармоники ФКУ работает как устройство поперечной компенсации. Поэтому в сетях, где из-за значительной несинусоидальности напряжений эксплуатировать обычные конденсаторные батареи не безопасно используют ФКУ.

Продольная компенсация реактивной мощности также является эффективным средством управления качеством электроснабжения. Этот метод применяют с целью снижения индуктивного сопротивления линии электропередач и коррекции формы тока. Результатом продольной компенсации становится повышение напряжения в конце линии.

Управление качеством электроснабжения сложная задача, требующая комплексного решения. Во-первых необходимо четко представлять каких параметров режима работы электрической сети и потребителя необходимо добиться. В этом смысле, показатели, полученные в результате расчет номинального режима работы электросети устанавливают цели регулирования. Во-вторых, учитывая особенности технологического процесса и конструктивных особенностей электрической сети следует определить набор мероприятий перспективных для реализации. Как правило электрическая сеть имеет сильное разветвление и управление только одним параметром не позволит полностью нормализовать ее работу. Также следует учитывать, что сильные управляющие воздействия могут негативно отразиться на электрически связанных участках сети, которым регулирование не требовалось. В третьих следует учитывать эффективность мероприятий и затраты на их реализацию.

Для проверки описанных реакций электрической сети на управляющее воздействие воспользуемся схемами на рис. 17, рис.18. Результаты экспериментов записывать в таблицу 3.

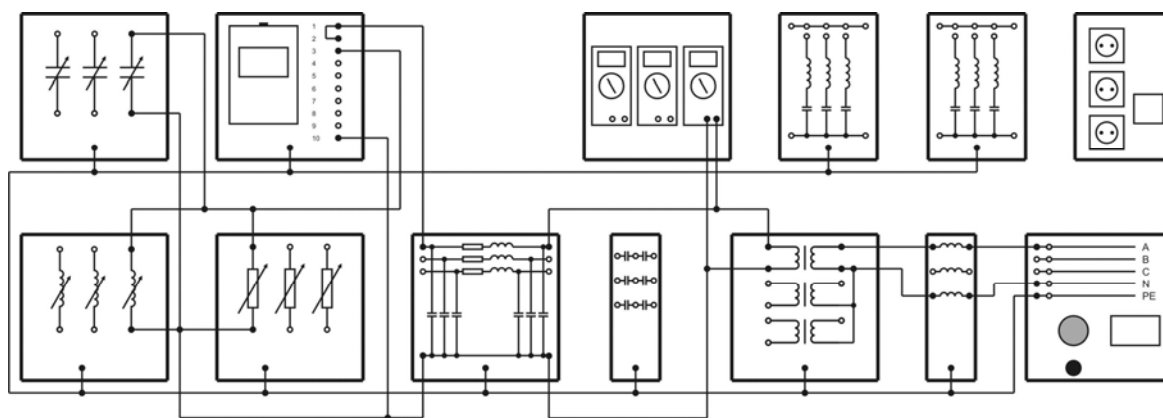


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки

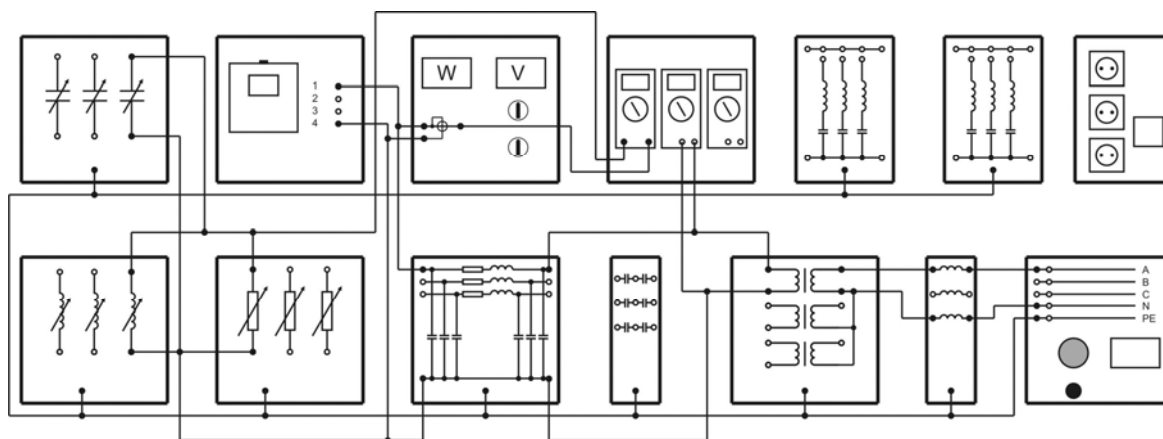


Рисунок 18 – Схема экспериментальной установки

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные

Параметры системы электроснабжения										
$R_{л},$ Ом	$L_{л},$ Гн	$C_{попереч},$ мкФ	$C_{продол},$ мкФ	$P_{н},$ Вт	$Q_{н},$ ВАр	$S_{н},$ ВА	$\phi_{н},$ град.			
Экспериментальные данные схемы по заданию										
$U_{н},$ В	$I_{н},$ А	$P_{н},$ Вт	$Q_{н},$ ВАр	$\phi_{н},$ град.	$K_U,$ о.е.	$U_{тр},$ В	$\Delta U_{л},$ В	$\Delta P_{л},$ Вт	$\Delta Q_{л},$ ВАр	$K_{тр},$ о.е.
Экспериментальные данные при включение фильтро-компенсирующих устройств										
$U_{н},$ В	$I_{н},$ А	$P_{н},$ Вт	$Q_{н},$ ВАр	$\phi_{н},$ град.	$K_U,$ о.е.	$U_{тр},$ В	$\Delta U_{л},$ В	$\Delta P_{л},$ Вт	$\Delta Q_{л},$ ВАр	$K_{тр},$ о.е.

Окончание таблицы 3

<b>Экспериментальные данные при встречном регулировании напряжения</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>Экспериментальные данные при продольной компенсации реактивной мощности</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>Экспериментальные данные при поперечной компенсации реактивной мощности в начале линии электропередач</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>Экспериментальные данные при поперечной компенсации реактивной мощности в конце линии электропередач</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>Экспериментальные данные при реализации комплекса мероприятий</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>Расчетные данные при отсутствие отклонений ПКЭ в узле присоединения нагрузки</b>										
$U_n$ , В	$I_n$ , А	$P_n$ , Вт	$Q_n$ , ВАр	$\phi_n$ , град.	$K_U$ , о.е.	$U_{тр}$ , В	$\Delta U_{л}$ , В	$\Delta P_{л}$ , Вт	$\Delta Q_{л}$ , ВАр	$K_{тр}$ , о.е.
<b>220</b>					<b>0</b>					

**Порядок выполнения работы**

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.17 или рис. 18;
4. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает мощность электрической нагрузка и параметры линии электропередач.

5. Включить стенд. Заполните таблицу экспериментальных данных при исходном состоянии схемы, выключите стенд;
6. Подключите фильтро-компенсирующие устройства (одно или оба параллельно друг другу и сети), повторите эксперимент, верните схему в исходное состояние;
7. Переключите отпайку трансформатора в исследуемой энергосистеме, повторите эксперимент, верните схему в исходное состояние;
8. Подключите устройства продольной компенсации реактивной мощности, повторите эксперимент, верните схему в исходное состояние;
9. Включите устройства поперечной компенсации реактивной мощности расположенные на блоке «линии электропередач» в начале линии, повторите эксперимент, верните схему в исходное состояние;
10. Включите устройства поперечной компенсации реактивной мощности расположенные на блоке «линии электропередач» в конце линии, повторите эксперимент, верните схему в исходное состояние;
11. Проведите анализ экспериментальных данных, составьте программу повышения качества электрической энергии исследуемой энергосистемы, реализуйте составленный комплекс мероприятий в одном эксперименте;
12. Сделайте выводы;
13. Оформите отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите причины потерь мощности и напряжения при передаче электрической энергии.
2. Перечислите способы подавления высших гармоник в промышленных электросетях, объясните принцип действия фильтро-компенсирующих устройств.
3. Объясните назначение продольной компенсации реактивной мощности и особенности выбора мощности компенсирующего устройства.
4. Объясните назначение поперечной компенсации реактивной мощности и особенности выбора мощности компенсирующего устройства.
5. Объясните, в чем заключается метод встречного регулирования напряжения, а также принцип выбора отпайки трансформатора.



## 2.7 Потери электрической энергии в сетях с несинусоидальным напряжением

Развитие преобразователей электрической энергии идет путем создания высокотехнологичных устройств на основе управляемых полупроводниковых приборов. За последние десять лет в российских электросетях появилось большое количество преобразователей частоты, устройств плавного пуска двигателей, сварочных аппаратов и источников бесперебойного питания на основе инверторов, изменивших привычные режимы функционирования электросетей. Повсеместное внедрение полупроводниковых преобразователей привело к появлению широкого спектра высших и интергармонических составляющих в распределительных сетях. В рамках настоящей работы рассмотрим влияние высших гармонических составляющих тока на электрическую сеть.

**Целью работы** является измерение величины искажения синусоидальности напряжения и определение мощности дополнительных потерь в энергосистеме, обусловленных несинусоидальными токами.

Форма токов и напряжений в промышленных электрических сетях отличается от синусоидальной, что связано с широким распространением преобразователей имеющих не линейную вольт-амперную характеристику. Для описания формы не синусоидальных токов и напряжений используются вэйвфлеты или ряды Фурье. Российские нормативно-технические документы разработаны на основе рядов Фурье.

Особенность метода Фурье заключается в возможности описания не гармонической функции произвольной формы с помощью набора гармонических. Другими словами, полуволна не синусоидального тока может быть представлена в виде нескольких гармонических функций частота которых кратна частоте тока в сети. Составляющие ряда с частотой превышающей промышленную частоту, называют высшими гармониками.

Электроприемники предназначены для потребления только гармоники на частоте, 50 Гц, в свою очередь, энергию перенесенные высшими гармониками можно рассматривать как тепловые потери. Дополнительное паразитное влияние высших гармоник заключается в создание тормозящих вращающих моментов в электрических машинах, высокочастотных радиопомех, ускорение старения изоляций под воздействием высокочастотных токов.

Измерение несинусоидальных токов и напряжений имеет свои особенности. Действующее значение токов и напряжений обязательно определяются как среднеквадратические [5]:

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}; I_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt,$$

где  $u(t), i(t)$  – функции напряжения и тока от времени;  $T$  – длительность полупериода, с;  $P$  – активная мощность, Вт.

Следует обратить внимание, что вычисления по представленным формулам для синусоидального тока даст такой же результат, что и стандартная методика, т.е. деление амплитуды полуволны на  $\sqrt{2}$ . В случае не синусоидального тока значение амплитуды полуволны теряет свой смысл, т.к., полуволна может иметь несколько экстремальных точек, имеющих не симметричное расположение.

Современные измерительные приборы вычисляют действующие значение тока и напряжения путем интегрирования дискретных измерений в реальном времени, используя более 5000 точек за один полупериод. Результат отображается в виде коэффициентов искажения синусоидальности рассчитанный по следующим выражениям [2]:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{Ui})^2}{N}}; K_{U(v)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(v)i})^2}{N}},$$

где  $K_{Ui}$  – коэффициент искажения синусоидальности при  $i$ -ом измерении, %;  $K_{U(v)}$  – коэффициент искажения синусоидальности гармонической номера  $v$ , при  $i$ -ом измерении, %;  $N$  – число измерений.

Значения коэффициентов искажения синусоидальности при единичном измерении (один полупериод) находятся как отношение суммы действующих значений напряжений от второй до сороковой гармонической  $\sum_{v=2}^{40} (U_{(v)i})$  или значения напряжения  $v$ -ой гармонической  $U_{(v)i}$  к действующему значению напряжения основной частоты  $U_{(1)i}$ :

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} (U_{(v)i})^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100 \%; K_{U(v)i} = \frac{U_{(v)i}}{U_{(1)i}} \cdot 100 \%.$$

Такой подход не подразумевает ручную обработку данных. В свою очередь инженер может определить действующие значения несинусоидальных напряжений и токов по известному гармоническому составу.

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{U_{(1)}^2 + U_{(3)}^2 + \dots + U_{(v)}^2};$$

$$I_{\text{СК}} = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2 + \dots + I_{(v)}^2},$$

где  $U_{(1)}, U_{(3)}, U_{(v)}$  – действующее значение напряжения соответствующей гармонической составляющей, В;  $I_{(1)}, I_{(3)}, I_{(v)}$  – действующее значение тока соответствующей гармонической составляющей, А.

Мощность передаваемая по электрической сети рассчитывается с учетом выражений [5]:

$$P = U_{(1)}I_{(1)} \cdot \cos(\varphi_{(1)}) + U_{(3)}I_{(3)} \cdot \cos(\varphi_{(3)}) + \dots + U_{(v)}I_{(v)} \cdot \cos(\varphi_{(v)});$$

$$Q = U_{(1)}I_{(1)} \cdot \sin(\varphi_{(1)}) + U_{(3)}I_{(3)} \cdot \sin(\varphi_{(3)}) + \dots + U_{(v)}I_{(v)} \cdot \sin(\varphi_{(v)});$$

$$S = U_{(1)}I_{(1)} + U_{(3)}I_{(3)} + \dots + U_{(v)}I_{(v)} = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

Действующие значения гармонических составляющих токов и напряжений определяются путем разложения реальной полуволны в ряд Фурье. Учитывая, что в трехфазных электрических сетях переменного тока форма электрического сигнала симметрична относительно начала координат то постоянной и косинусной составляющей ряда Фурье можно пренебречь (свойства рядов Фурье), описывая зависимости тока и напряжения от времени следующим образом:

$$u(t) = U_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m(3)} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + U_{m(v)} \sin(v\omega t + \varphi_v);$$

$$i(t) = I_{m(1)} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{m(3)} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + I_{m(v)} \sin(v\omega t + \varphi_v).$$

При использовании ряда Фурье следует обратить внимание на значение угла между током и напряжением гармонических составляющих, а так же их фазы, которые имеют соответствующую кратность аналогичным характеристикам основной гармоники.

В классических учебниках часто указывается на то, что с увеличением порядкового номера и частоты гармонической составляющей ее амплитуда уменьшается. В реальных условиях это правило не всегда отражает фактическое состояние электрической сети.

Импеданс электрической сети различен на разных частотах протекающего тока, что связано с наличием реактивных элементов. Соответственно, индуктивное сопротивление участка сети увеличивается с ростом частоты тока, а емкостное уменьшается. В сетях с активно-индуктивной нагрузкой сила тока высших гармоник действительно ограничивается сопротивлением сети, но появление емкостной нагрузки может снизить сопротивление сети на одной или нескольких частотах, создать проводящий контур для высших гармонических, вызвать резонансные явления загружая сеть током данной гармонической. Таким образом, динамичное изменение сетевых нагрузок в течении суток создает ситуацию когда прогнозирование гармонического состава тока становится невозможным.

Используя физическую модель электрической сети представленную на рис. 19, рис. 20 произведем оценку потерь электрической энергии вызванную наличием высших гармоник в электрической сети. Экспериментальные и расчетные данные занесем в табл. 4.

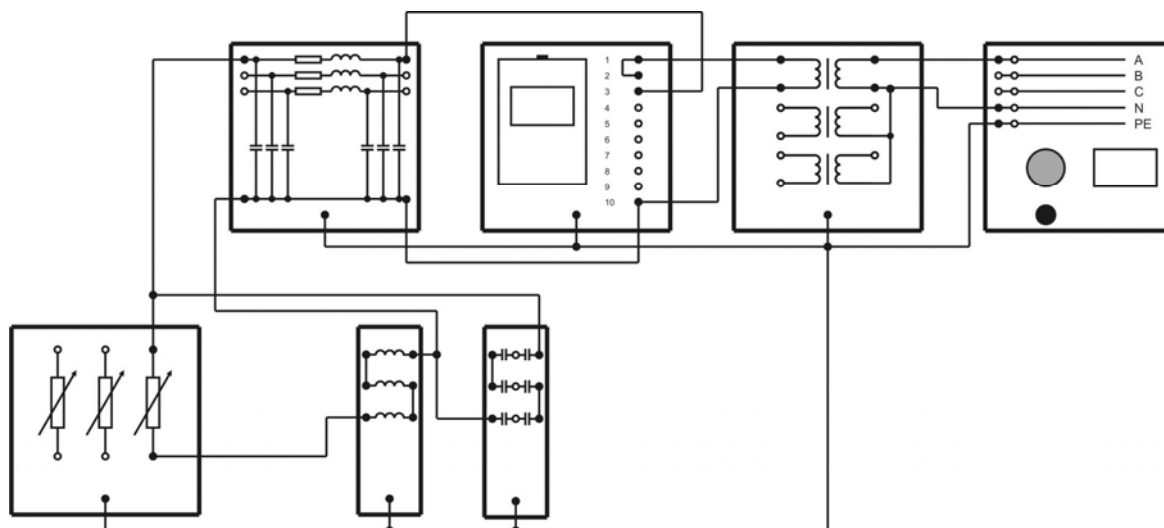


Рисунок 19 – Схема лабораторного стенда

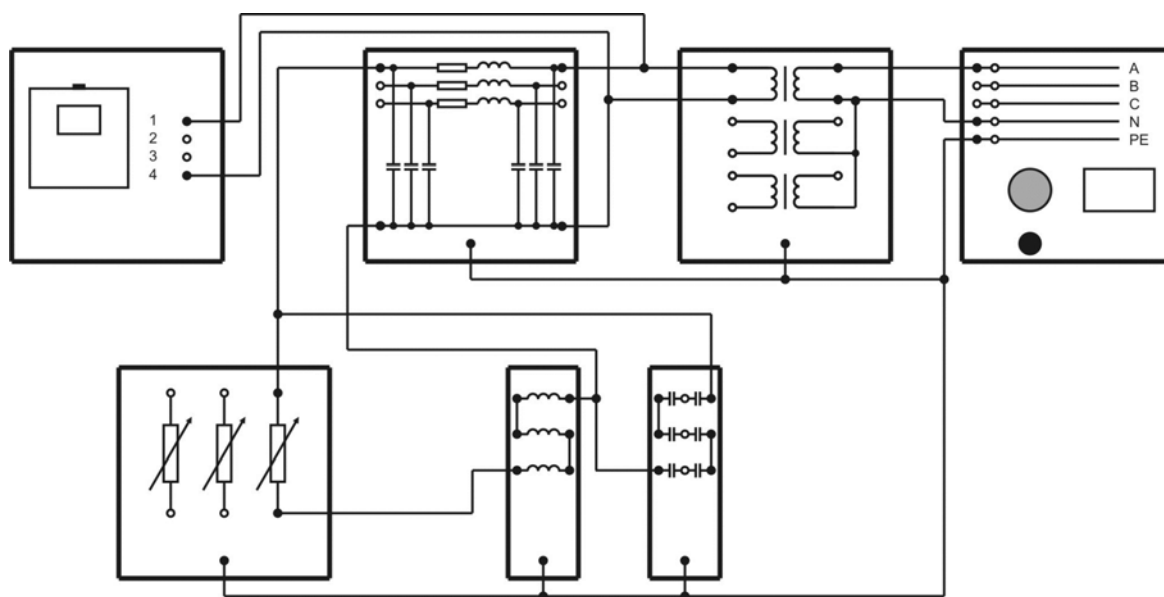


Рисунок 20 – Схема лабораторного стенда

Таблица 4 – Экспериментальные и расчетные данные

№ гармоники	1	2	3	...	n
$K_{Un}, \%$					
$f, \text{Гц}$					
$U, \text{В}$					
$I, \text{А}$					

#### Окончание таблицы 4

$\dot{Z}_L$ , Ом					
$\dot{Z}_H$ , Ом					
$ \dot{Z}_L + \dot{Z}_H $ , Ом					
$\cos^{-1} \left[ \frac{\text{Re}(\dot{Z}_L + \dot{Z}_H)}{ \dot{Z}_L + \dot{Z}_H } \right]$ , град					
$UI \cos(\varphi)$ , Вт					
$UI \sin(\varphi)$ , ВАр					
$\sum_2^n UI \cos(\varphi)$ , Вт					
$\sum_2^n UI \sin(\varphi)$ , ВАр					

#### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.19 или рис. 20;
4. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает сопротивление нагрузок исследуемой электрической сети, параметры линии электропередач и отпайку трансформатора.
5. Включить стенд.
6. Запишите коэффициенты искажения синусоидальности напряжения для высших гармонических составляющих превышающих 0,4%;
7. Рассчитайте сопротивления линии электропередач и нагрузки токам каждой гармонической составляющей;  
**Внимание!!! запишите значения сопротивлений нагрузки и линии электропередач.**
8. Заполните строки таблицы экспериментальных и расчетных данных (табл. 4);
9. Рассчитайте мощность рассеянную на частотах высших гармонических составляющих;
10. Сделайте выводы;
11. Оформите отчет.

#### Контрольные вопросы

1. Объясните, что называют высшими гармоническими составляющими токов и напряжений.

2. Перечислите методы исследования высших гармоник и объясните их суть.
3. Перечислите причины возникновения высших гармонических составляющих тока и напряжения в электрических сетях.
4. Перечислите свойства рядов Фурье.
5. Объясните каким образом импеданс сети влияет на амплитуды высших гармонических составляющих тока.

## 2.8 Потери электрической энергии в сетях с несимметричным напряжением

Качество электроснабжения конечного потребителя электрической энергии зависит от двух основных факторов: качество поставляемой электрической энергии и режима энергопотребления. Эксплуатация фаз трехфазной электрической сети в не одинаковых условиях, приводит к появлению несимметрии фазных напряжений и как следствие появлению дополнительных потерь.

**Целью работы** является экспериментальная оценка величины несимметрии напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения с глухозаземленной нейтралью и определение мощности дополнительных потерь, обусловленных несимметричным режимом работы.

Анализ не симметричных режимов работы трехфазных электрических сетей осуществляется с помощью метода симметричных составляющих. Сущность метода заключается в математическом преобразовании систем фактических токов и напряжений в системы прямой, обратной и нулевой последовательности. На основе определенных, действующих значений величин данных последовательностей рассчитываются коэффициенты несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$ .

Нормально допустимое и предельно допустимое значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и нулевой последовательности в точке общего присоединения к электрическим сетям соответственно равны 2,0 и 4,0 % [2].

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100 \% ; \quad K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100 \%,$$

где  $U_{1(1)}$ ,  $U_{2(1)}$ ,  $U_{0(1)}$  – действующие значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, В.

Следует отметить, что геометрическая сумма токов или напряжений в симметричной трехфазной электрической сети равна нулю. В

симметричных режимах работы присутствуют напряжения и токи только прямой последовательности.

Система уравнений для преобразования напряжений по методу симметричных составляющих записывается в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C); \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C); \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \end{aligned}$$

где  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$  – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, В;  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – фазные напряжения трехфазной электрической сети, В;  $a$  – оператор поворота равный  $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Симметричные составляющие токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$  и коэффициенты несимметрии токов  $K_{2I}, K_{0I}$  определяются аналогично соответствующим характеристикам напряжения.

Мощность дополнительных потерь, обусловленные несимметрией токов сети, состоящей из  $n$  элементов оцениваются по выражению [6]:

$$\Delta P = \sum_{q=1}^n K_{Pq} \cdot \Delta P_{л},$$

где  $K_{Pq}$  – коэффициент потерь мощности для  $q$ -го присоединения к рассматриваемой линии, о.е.;  $\Delta P_{л}$  – мощность потерь в линии при передаче энергии в симметричном режиме.

В общем виде коэффициент потерь мощности для трехфазных сетей с нейтральным проводом определяется в виде:

$$K_P = 1 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 \left( 1 + \frac{3R_N}{R_\phi} \right),$$

где  $K_{2I}, K_{0I}$  – коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности, о.е.;  $R_\phi, R_N$  – сопротивление фазного и нейтрального провода соответственно, Ом.

Расчет мощности потерь в линии для случая симметричного электроснабжения потребителя, на номинальном напряжении, суммарная мощность нагрузок которого равна суммарной мощности не симметричных нагрузок:

$$\Delta P_{л} = \frac{S_A^2 + S_B^2 + S_C^2}{U_{л}^2} \cdot R_\phi = \frac{(U_A I_A)^2 + (U_B I_B)^2 + (U_C I_C)^2}{U_{л}^2} \cdot R_\phi,$$

где  $S_A, S_B, S_C$  – полная мощность фаз, ВА;  $I_A, I_B, I_C$  – действующие значения фазных токов, А;  $U_{л}$  – номинальное линейное напряжение сети, В.

В процессе оценки увеличения потерь электрической энергии, вызванной несимметричной работой электрической сети можно столкнуться с трудностями в непосредственном измерении токов. Последовательное подключение амперметров, как правило, требует изменение существующей схемы электрических соединений, что не всегда допустимо. В таких случаях вычислить значения токов прямой, обратной и нулевой последовательности можно используя закон Ома для схемы замещения сети соответствующей последовательности:

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_1}, I_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_2}, I_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{Z}_0},$$

где  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_0$  – сопротивление электрической сети по прямой обратной и нулевой последовательности.

Схемы замещения фазы А четырехпроводной электрической сети по прямой, обратной и нулевой последовательности показаны на рис. 21.

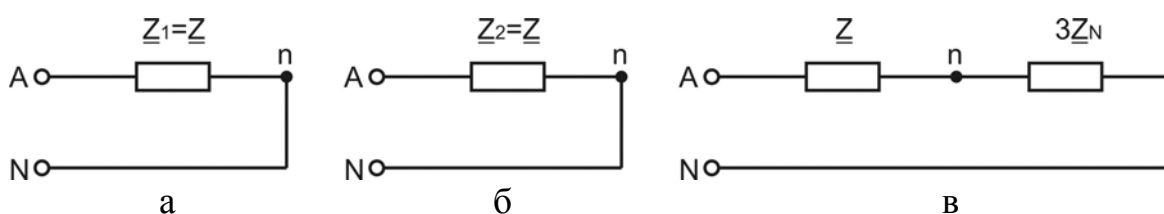


Рисунок - 21 Схемы замещения электрической сети для токов: а – прямой последовательности; б – обратной; в – нулевой.

Представленные схемы замещения будут справедливы для сетей с продольной несимметрией в составе которых нет вращающихся электрических машин. Для сетей с элементами имеющими разное сопротивление по прямой и обратной последовательности схемы должны быть изменены. Также следует обращать внимание, что в сетях без нулевого проводника токи нулевой последовательности отсутствуют.

Несмотря на то, что несимметрия токов и напряжений рассматриваются в технической литературе как аномальный режим работы, в настоящее время, полностью симметрированная сеть является редкостью. Исходя из основной причины возникновения несимметрии различают продольную, то есть обусловленную разными условиями эксплуатации фаз источника питания, и поперечную возникающую в следствие не сбалансированной загрузкой фаз потребителем. Адекватное определение вида несимметрии играет существенную роль при выборе метода снижения потерь электрической энергии обусловленной несимметрией.

Схема исследуемой электрической сети изображена на рис.22.



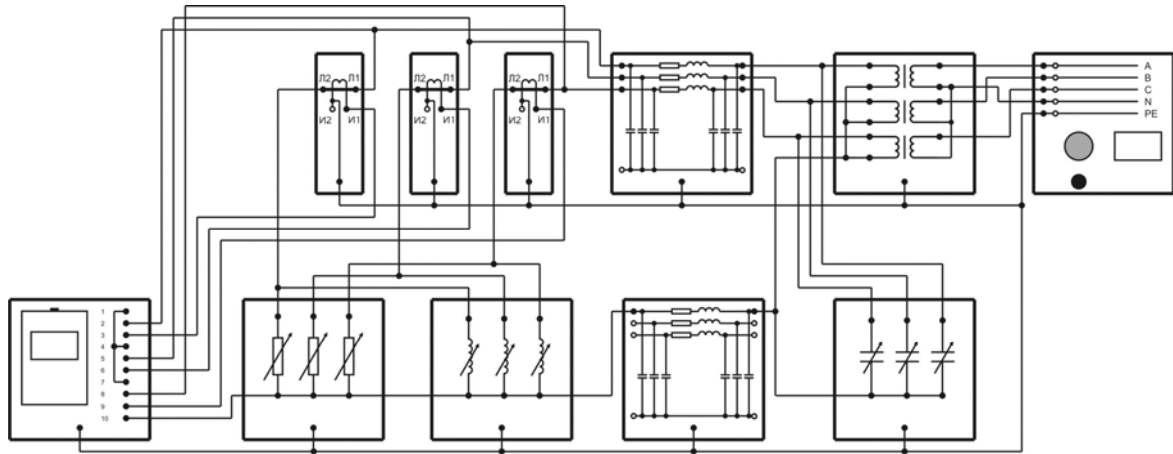


Рисунок 22 – Схема лабораторной установки для исследования несимметрии токов и напряжений

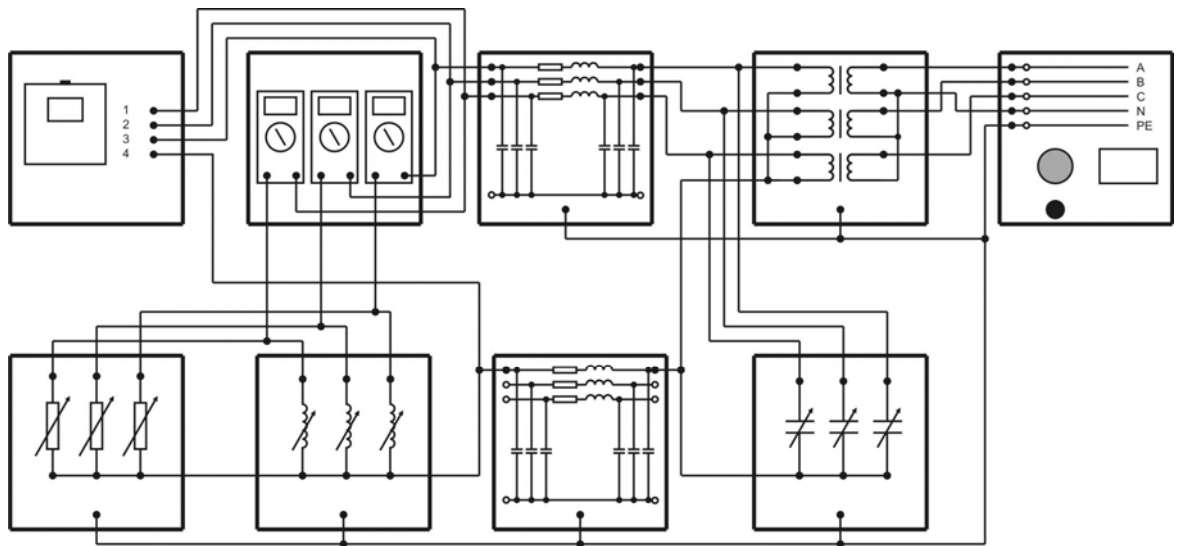


Рисунок 23 – Схема лабораторной установки для исследования несимметрии токов и напряжений

Экспериментальные и расчетные данные заносятся в таблицу 5.

Таблица 5 – Экспериментальные и расчетные данные

Экспериментальные и расчетные данные											
$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$Q_A,$ Вар	$Q_B,$ Вар	$Q_C,$ Вар	$U_A,$ А	$U_B,$ А	$U_C,$ А	$\phi_{UA},$ град	$\phi_{UB},$ град	$\phi_{UC},$ град
*	*	*	*	*	*				*	*	*
$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$\phi_{IA},$ град	$\phi_{IB},$ град	$\phi_{IC},$ град	$U_1,$ А	$U_2,$ А	$U_0,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_0,$ А
			*	*	*	+	+	+			
$Z_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$Z_0,$ Ом	$K_{2U},$ о.е.	$K_{0U},$ о.е.	$K_{2I},$ о.е.	$K_{0I},$ о.е.	$K_p,$ о.е.	$R_\Phi,$ Ом	$R_N,$ Ом	$\Delta P_{л},$ Вт	$\Delta P,$ Вт
+	+	+									

**Примечание:** \* - заполняется для схемы с прибором ЭРИС КЭ 0.6; + - заполняется для схемы с прибором Ресурс ПКЭ 1,5.

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” источника G1.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис. 22 или рис.23;
4. Получить у преподавателя параметры нагрузок и питающей линии, установить их и включить установку;
5. Заполнить таблицу экспериментальных данных (таб.5);  
**Внимание!!!** схема лабораторной установки на основе прибора Ресурс ПКЭ 1,5 позволяют изучать только продольную несимметрию, схема на основе ЭРИС КЭ 0.6 допускает изучение продольной и поперечной несимметрии.
6. Проведите требуемые вычисления и заполнить таблицу расчетных данных;
7. Разработать рекомендации по симметрированию нагрузки;
8. Сделать выводы;
9. Оформить отчет.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность метода симметричных составляющих?

2. Каким образом оценивают величину несимметрии фазных напряжений?
3. Перечислите причины возникновения несимметрии фазных напряжений.
4. Объясните, какое влияние оказывает несимметрия фазных напряжений на работу электроприемников (осветительная аппаратура, электродвигатели, печи)?
5. Объясните принцип действия систем автоматического симметрирования.

## 2.9 Измерение фликеров в цехах промышленных предприятий

Качества электроснабжения объектов на прямую влияет на качество жизни и здоровья людей находящихся на его территории, ярким примером такого воздействия являются фликеры.

Слово фликер означает мигание или мерцание, фликер эффект заключается в изменении светового потока искусственного источника света вызванного колебанием напряжения в электрической сети. Доза фликера, входит в показатели качества электрической энергии, является мерой вредного воздействия светового потока на органы зрения человека. Данный показатель устанавливает количество мерцаний светового потока с определенной амплитудой и скорости его изменения, безопасного для глаза, воспринятых за десять минут и два часа. Превышение допустимой дозы фликера провоцирует усталость зрительных органов, снижение работоспособности и в перспективе ослабление зрения.

**Целью лабораторной работы является** измерение кратковременной дозы фликера анализатором качества электрической энергии Ресурс ПКЭ 1,5, анализ причин возникновения фликеров и разработка мероприятий по их ослаблению.

В процессе электроснабжения происходят постоянные коммутации в электрической сети объекта, включение любой электроустановки приводит к снижению напряжения в сети, выключения к повышению. Как правило электрическая сеть на много мощнее единичной электроустановки и данные изменения не нарушают работу сети. В свою очередь, световой поток искусственного источника света пропорционален квадрату сетевого напряжения, и его постоянное изменения воспринимаются органом зрения человека, вызывая усталость. В свою очередь, человек может не замечать происходящие изменения, в следствие концентрации внимания на другом объекте.

Многочисленные совместные исследования медицинских и технических специалистов установили, что органы зрения слабо восприимчивы к высокочастотным изменениям светового потока, наиболее выраженный вред наносят низкочастотные колебания 8-10 Гц. Вторым фактором вредного воздействия является размах, то есть изменения величин светового потока между текущим и предшествующим моментом времени. Третьим фактором назовем профиль изменения светового потока, который условно представляют в произвольной форме или меандра, что позволяет учесть и адаптивные свойства органа зрения. Совокупность перечисленных факторов позволила выявить зависимости для определения предельно-допустимые дозы фликера [7-8].

Как уже стало понятно, фликер это скорее светотехническая величина с санитарно-гигиеническим смыслом. В список ПКЭ она попала по причине существования четкой закономерности между колебанием напряжения и светового потока. Современные методы измерения фликеров полностью исключают необходимость непосредственного измерения светового потока, что значительно упрощает процесс, но приводит к определенной погрешности при применении не стандартных источников света.

Изначально, для измерения фликера использовали «фликерметр» - это прибор состоящий из датчика, имитировавшего глаз человека, на который была направлена лампа накаливания мощностью 60 Вт, подключенная к электрической сети исследуемого объекта. При этом выбор мощности лампы не случаен. Спираль лампы накаливания другой мощности будет иметь постоянную времени нагрева характерную именно для нее и соответствующую инерционность. Это означает, что работая от той же электрической сети другая лампа либо усилит фликер эффект, либо его ослабит. Учитывая, что в современной России использование ламп накаливания ограничено на законодательном уровне, а полномасштабных исследований фликеров создаваемых диодными и газоразрядными лампами проведено не было, то значение допустимых доз фликера и актуальность самого фликера как санитарно-гигиенического показателя вызывает сомнения.

С другой стороны фликер как показатель качества электрической энергии, определенный величиной размахов и их периодичностью является хорошим индикатором наличия отклонения других ПКЭ, нормирование которых еще не проведено. Примером таких отклонений становятся интергармонические составляющие напряжения сети, появление которых обусловлено широким промышленным внедрением вентиляционных преобразователей влияние которых на сеть не изучено. Интергармониками называют гармонические составляющие тока частота кото-

рых не кратна частоте основной гармоники, следовательно они не могут быть определены с помощью Фурье-анализа используемого в России. В свою очередь интергармоники, особенно с частотой ниже 50 Гц имеют значительные амплитуды и визуализируются как фликер.

Для измерения фликеров анализатором качества электрической энергии Ресурс ПКЭ-1,5 следует собрать схему лабораторной установки представленную на рис.24, и включить установку. Каждые 10 минут прибор будет определять кратковременную дозу фликера. За одно учебное занятие следует зафиксировать 4 кратковременные дозы при разных условиях эксплуатации сети. Длительная доза фликера вычисляется на основе кратковременных доз измеряемых в течении двух часов, что не позволяет провести данное измерение в условиях стандартного занятия.

Имитация фликера на лабораторной установке достигается созданием высших гармонических составляющих с относительно большой амплитудой (2, 3, 4, 5 порядка), для чего в две фазы включаем однополупериодные выпрямители.

Учитывая особенности прибора Ресурс ПКЭ 1.5 чтение измеренных значений фликера с графического монитора прибора затруднено. Для чтения архивов прибора рекомендуется опросить прибор используя персональный компьютер программу “Измеритель ПКЭ” на обучение работы с которой потребуется 40 минут в течение которых прибор будет накапливать данные.

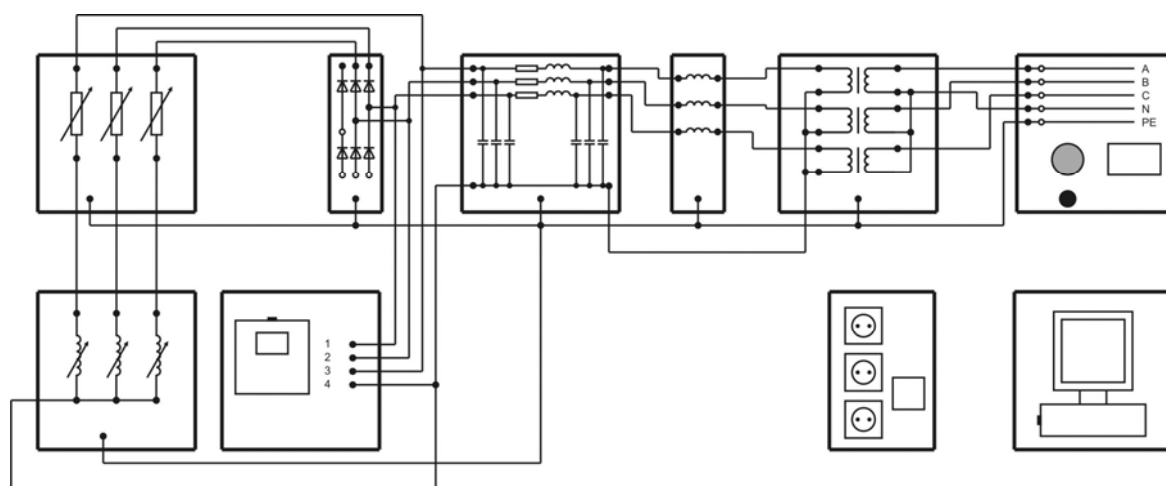


Рисунок 24 – Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.24;
4. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает параметры линии электропередач.
5. Включить стенд;
6. Запустить программу “Конфигуратор ПКЭ”, установить связь с прибором;
7. Перейти на вкладку “Уставки”, затем “Системные”, нажать на иконку “Чтение”, установить режим работы прибора “Стоп”, нажать на иконку “Запись”;
8. После отработки предыдущей команды изменить режим работы прибора на “Пуск” и нажать “Запись”, закрыть “Конфигуратор ПКЭ”;
9. Оставить прибор Ресурс ПКЭ 1,5 на 40 минут для сбора данных, рекомендуется через каждые 10 минут изменять нагрузки.
10. В освободившееся время рекомендуется ознакомиться с процедурой чтения архивов созданных прибором и произвести пробный пробный опрос прибора.
11. Запустить программу “Измерители ПКЭ” (UF2Plus) и установить связь с прибором;
12. Запустить процесс “Чтение системных данных” нажатием на соответствующую иконку, в результате которого в рабочей области появится вкладка “Системные”;
13. Запустить процесс “Чтение архивных данных”, для чего необходимо активировать соответствующую иконку и отметить в форме запроса следующее:
  - Время начала – «Сегодня», нажать кнопку;
  - Время окончания – «Системное», нажать кнопку;
  - Основные данные – «Колебания», отметить;
14. Опросить прибор, в результате чего в рабочей области появится вкладка «Архивы», в которой можно выбрать для просмотра или  $P_{st}$  или  $P_{Li}$ ;
15. Зафиксировать результаты измерений, обратить особое внимание на зависимость между величиной фликера и второй гармоникой (контролируемой в течение эксперимента), а также влияние источника фликера одной фазы на уровень фликеров других фаз и межфазных напряжений;
16. Записывать результаты измерений в таблицу 6;
17. Сделайте выводы;
18. Оформите отчет.

Таблица 6 – экспериментальные данные

№	Время чч:мм	$K_{UA}$ , %	$K_{UB}$ , %	$K_{UC}$ , %	$K_{U2A}$ , %	$K_{U2B}$ , %	$K_{U2C}$ , %	$P_{stA}$ , о.е.	$P_{stB}$ , о.е.	$P_{stC}$ , о.е.	$P_{stAB}$ , о.е.	$P_{stBC}$ , о.е.	$P_{stCA}$ , о.е.
1													
2													
3													
4													

### Контрольные вопросы

1. Объясните, что называют фликером и чем он опасен.
2. Перечислите причины возникновения фликеров.
3. Перечислите способы ограничения фликеров.
4. Перечислите способы измерения фликеров и объясните соответствующие методики.
5. Перечислите современные источники света, объясните, каким образом колебания напряжения влияют на создаваемый ими световой поток и возникновения фликера.

### 2.10 Качество электрической энергии в сетях с многочисленными абонентами

Электрическая энергия это продукт параметры качества которого установлены государственным стандартом. Качество производственных процессов у абонентов электрических сетей напрямую зависят от закупаемого сырья - электричества. При этом закон о защите прав потребителей позволяет абоненту взыскать ущерб или не полученную прибыль с энергоснабжающей организации при наличии доказательств вины последней в низком качестве электроснабжения.

На практике, закон о защите прав потребителей не учитывает основное отличие электрической энергии от привычных групп товаров и удовлетворение жалобы отдельного абонента возможно лишь в долгосрочной перспективе.

В отличие от других товаров, качество электрической энергии зависит не только от производителя и поставщика, но и от совокупного режима работы потребителей, подключенных к сетям. Каждый абонент вносит в работу электрической сети искажения, характерные для своего технологического процесса, одновременное функционирование нескольких потребителей, с искажениями одинаковой природы, суммар-

ная мощность которых соизмерима с мощностью сети, способны нарушить режим работы сети и соответственно, все абоненты получают энергию низкого качества.

**Целью работы** является оценка возможностей нарушения качества электрической энергии в общественных сетях действиями абонентов.

На качество электрической энергии в распределенных сетях влияет множество факторов, обозначим главные из них:

- соотношение мощности электрической сети и потребителя;
- загрузка силового оборудования электрических сетей;
- уровень электроснабжения;
- наличие устройств повышающих качество электрической энергии и уровня автоматизации управления режимом работы сети.

Наиболее распространенными отклонениями качества электрической энергии являются установившиеся отклонения напряжений, возникающие в часы максимума нагрузок, обусловленные загрузкой силовых трансформаторов, размахи и провалы напряжения, вызванные включением мощных электроприемников с большими пусковыми токами, несимметрия фазных напряжений, основной вклад в которую вносят однофазные нагрузки, искажения синусоидальности, за что ответственны электроприемники на основе полупроводниковых преобразователей. Рассмотрим влияние силовых преобразователей подключенных к низковольтным распределительным сетям на качество электрической энергии в магистральных сетях. На рис. 25, рис. 26 показаны схемы моделируемой системы электроснабжения.

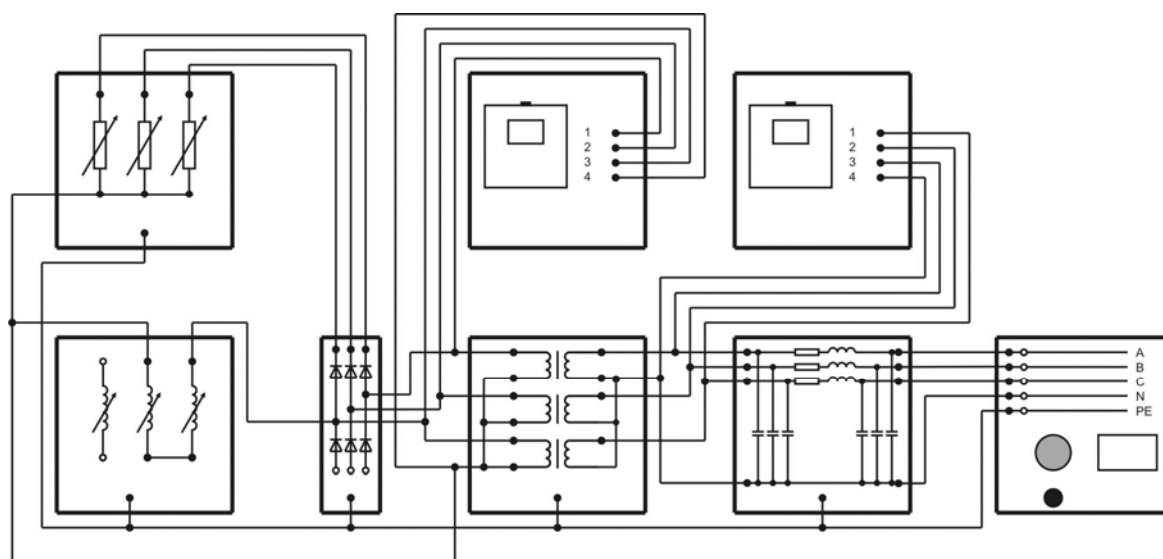


Рисунок 25 - Схема лабораторной установки



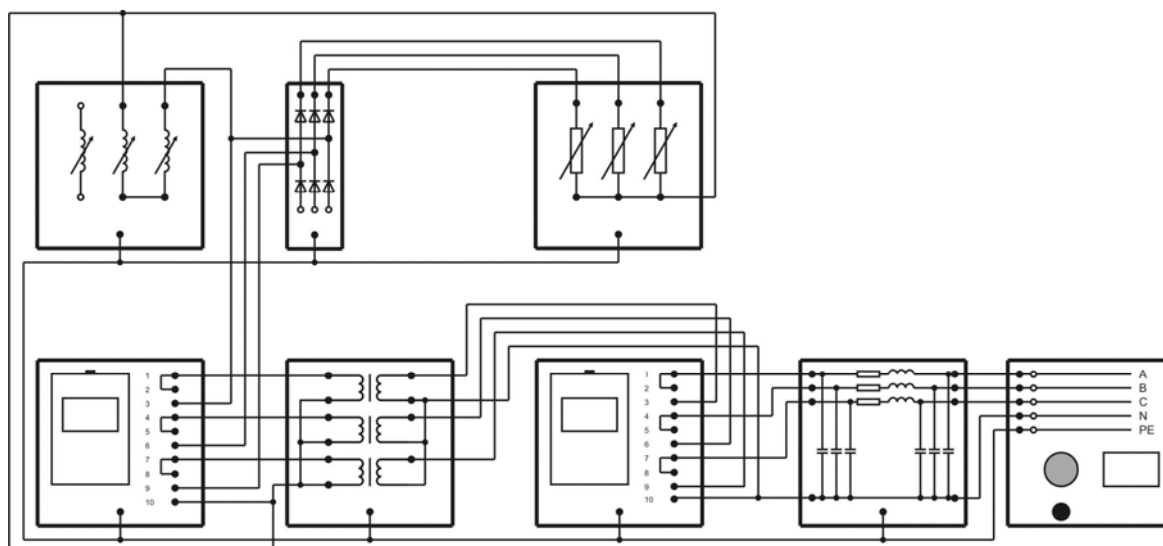


Рисунок 26 - Схема лабораторной установки

Большинство потребителей создают ряд одинаковых отклонений ПКЭ, поэтому выделить вклад отдельного абонента в общее нарушение качества электроснабжения достаточно трудно. Например, искажение синусоидальности напряжения на частотах нечетных гармонических составляющих явление обычное (3, 5, 7, 9, 11 и т.д.), так же как и для гармонических кратных трем (3, 6, 9, 15 и т.д.). Четные гармоники (2, 4, 8, 12 и т.д.) встречаются в трехфазных сетях крайне редко, поэтому мощность оборудования, способного генерировать данные составляющие в западных странах ограничена на законодательном уровне. В рамках экспериментального исследования создадим с помощью трехпульсового выпрямителя спектр четных гармоник и определим вредное воздействие выпрямительной нагрузки на питающую сеть. Результаты исследований фиксируются в таблицу 7.

Таблица 7 – Экспериментальные данные

Показатели качества электрической энергии											
$\delta U$ , %	$K_{2U}$ , о.е.	$K_{0U}$ , о.е.	$K_U$ , о.е.	$K_{U2}$ , о.е.	$K_{U3}$ , о.е.	$K_{U4}$ , о.е.	$K_{U5}$ , о.е.	$K_{U6}$ , о.е.	$K_{U7}$ , о.е.	$K_{U8}$ , о.е.	$K_{U9}$ , о.е.
ПКЭ магистрали, нагрузка абонента отключена											
ПКЭ магистрали, абонент включил только вентиляльную											
ПКЭ магистрали, абонент включил только индуктивную нагрузку											
ПКЭ магистрали, абонент включил индуктивную нагрузку и вентиляльную нагрузку											

### Окончание таблицы 7

ПКЭ абонента, включена только вентильная нагрузка											
ПКЭ абонента, включена только индуктивная нагрузка											
ПКЭ абонента, включена индуктивная и вентильная нагрузка											

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” источника.
3. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.25, прибор Ресурс ПКЭ 1,5 допускает присоединение к работающей сети, что позволяет выполнять эксперимент имея только один прибор;
4. Если экспериментальная установка собирается по схеме рис.26, то изменения схемы под напряжением не допустимы. Схема обязательно собирается на двух приборах ЭРИС КЭ0.6. **Внимание!!!** схема включения прибора ЭРИС КЭ06 представленная на рис.26 допустима только если ток протекающий через прибор не превышает 1 А, во всех остальных случаях необходимо использовать трансформаторы тока;
5. Получить задание у преподавателя. Преподаватель устанавливает сопротивление нагрузок и питающей линии для исследуемой электрической сети.
6. Включить стенд;
7. Заполнить таблицу экспериментальных данных;
8. Сделайте выводы;
9. Оформите отчет.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите виды ущербов абонентов электрических сетей вызванных нарушением качества электроснабжения.
2. Перечислите причины низкого качества электрической энергии в магистральных сетях.

3. Объясните причины по которым в спектре высших гармоник промышленных сетей преобладают нечетные гармоники и гармоники кратные трем.
4. Перечислите способы повышения качества электрической энергии в магистральных сетях.
5. Перечислите методы стимулирования абонентов к улучшению качества электрической энергии.

## **2.11 Применение осциллографа для исследования промышленных электрических сетей**

Средства контроля качества электрической энергии совершенствовались вместе с развитием общественной энергосистемы страны, увеличение протяженности линий электропередач, объединение локальных электростанций в единую сеть, было бы невозможно без стабилизации уровня напряжений и частоты тока, основных показателей качества электрической энергии.

На сегодняшний день эксплуатация электрической сети подразумевает мониторинг 11 показателей качества электрической энергии, которые могут быть измерены с помощью одного универсального прибора – осциллографа.

**Целью лабораторной работы** является определение показателей качества электрической энергии с помощью осциллографа.

Осциллограф это измерительный прибор, предназначенный для наблюдения за быстро изменяющимися величинами. Современные осциллографы представляются как устройства преобразующие аналоговое напряжение поданный на его вход в цифровой сигнал, состоящей из дискретных значений, которые хранятся в оперативной памяти прибора, и отображаемый на мониторе как непрерывная функция в режиме реального времени. Такой подход, позволяет организовать постоянный мониторинг измеряемой величины с сохранением всех полученных данных.

Напряжение входа цифрового осциллографа не должно превышать  $\pm 5$  В, что не позволяет использовать его для непосредственных измерений в электрических сетях. Подключение осциллографа к исследуемому узлу нагрузки, напряжением до 1000 В, осуществляется с помощью делителя напряжения. В большинстве случаев, делитель представляет собой несколько, последовательно соединенных резистивных элементов суммарное сопротивление которых составляет от сотен кОм

до нескольких МОм. Делитель напряжения может состоять минимум из двух резисторов разного сопротивления, причем во всех режимах измерения, падение напряжения на малоомном резисторе не должно превышать входное напряжения осциллографа. Делитель подключается к сети параллельно узлу нагрузки, на вход осциллографа подается напряжения с малоомного резистора. Для пересчета результатов измерений в реальные величины, значения измеренные осциллографом должны быть умножены на коэффициент делителя напряжения.

С целью получения осциллограмм с узлов нагрузки работающих на напряжение свыше 1000 В, делитель напряжения подключают к вторичной обмотке трансформатора напряжения. Результаты измерений приводятся к реальным значениям путем умножения на коэффициент трансформации и коэффициент деления.

Осциллограф это прибор измеряющий только напряжения. Для измерения токов необходимо дополнительно использовать «шунт». Шунт представляет собой низкоомное активное сопротивление, включенное последовательно с другими элементами сети и оказывающий пренебрежительно малое влияние на режим ее работы. При прохождении тока через шунт на шунте возникает падение напряжения, которое и подается на вход осциллографа. Сопротивление шунта выбирается таким образом, чтобы падение напряжение на шунте, при максимальном токе нагрузки, не превысило входное напряжение осциллографа. Известное сопротивление шунта позволяет пересчитать осциллограмму напряжения шунта в осциллограмму тока используя закон Ома для участка сети.

В сетях со значительной токовой нагрузкой или высоким напряжением, непосредственное включение шунта не возможно. Шунт включают во вторичную обмотку трансформатора тока.

Комбинированное использование трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, делителей напряжения и шунтов позволяет изучение любых электрических сигналов с помощью осциллографа. Для промышленных электрических сетей осциллограф является универсальным измерительным устройством, позволяющим проведения комплексного анализа качества электрической энергии. Порядок обработки осциллограмм с примерами расчета приведен в третьей главе учебного пособия.

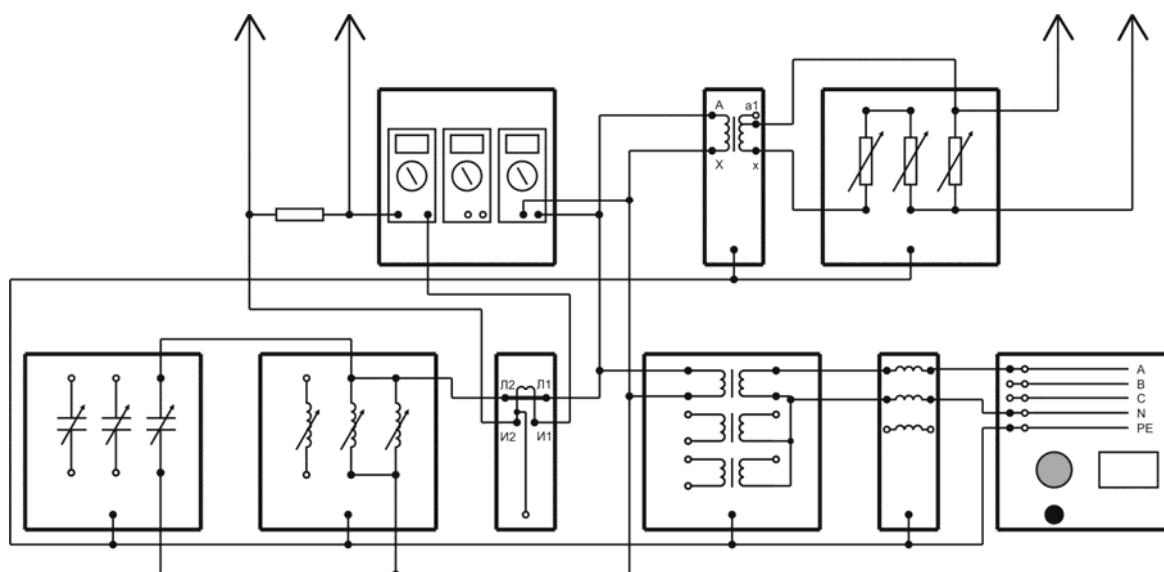


Рисунок 27 – Измерения в промышленной электрической сети с помощью осциллографа

### Порядок выполнения работы

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления “⊕” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” источника.
3. Получить задание у преподавателя, преподаватель устанавливает отпайку трансформатора и ступени на нагрузки;
4. Используя сопротивления блока резистивной нагрузки собрать делитель напряжения, рассчитать коэффициент деления;
5. Из набора шунтов выбрать шунт с нужным сопротивлением;
6. Собрать, на лабораторном стенде, схему изображенную на рис.27;
7. Подключить цифровой осциллограф ЛА-50USB к измеряемой сети и персональному компьютеру, запустить программу «Самописец»;
8. Включить лабораторную установку и зафиксировать осциллограммы токов и напряжения на одной временной оси;
9. Провести анализ качества электрической энергии в соответствии с примерами обработки осциллограмм приведенных в параграфе 3.2 пособия;
10. Сделать выводы;
11. Оформите отчет.

## **Контрольные вопросы**

1. Объясните каким образом выбирают сопротивление шунта, приведите пример расчета шунта.
2. Объясните каким образом выбирают сопротивления делителя напряжения, приведите пример расчета коэффициента деления.
3. Объясните принцип действия аналогового осциллографа.
4. Объясните принцип действия цифрового осциллографа.
5. Перечислите этапы анализа качества электрической энергии по осциллограмме напряжения.

### **3 Инженерное исследование качества электроснабжения промышленных предприятий**

Теоретический анализ качества электроснабжения, а также обработка результатов эмпирических исследований являются наукоемкими и сложными задачами. В данном разделе учебного пособия представлены индивидуальные задания для организации самоподготовки студентов по дисциплине «Качество электроснабжения», приведены примеры выполнения наиболее важных заданий и рекомендации по оформлению расчетно-графических работ.

#### **3.1 Основные принципы расчета надежности систем электроснабжения**

Повсеместное использование электрической энергии современным индустриальным обществом обуславливает потребность в бесперебойном электроснабжении всех сфер народного хозяйства. С течением времени, электротехническое оборудование систем электроснабжения изнашивается, надежность систем электроснабжения снижается, риски перерыва электроснабжения и величины сопутствующих ущербов становятся не прогнозируемыми.

Как правило, уровень надежности систем электроснабжения России обеспечивается и поддерживается путем классификации объектов электроснабжения по категории надежности, нормированию конструктивных особенностей систем электроснабжения для каждой из категорий и определением периодичности ремонтного обслуживания, что в свою очередь позволяет поддерживать электрические сети в работоспособном состоянии. Недостатки данного подхода стали заметны в течении последнего десятилетия, когда повышенное внимание стало уделяться средствам углубленного мониторинга систем электроснабжения, в том числе и надежности. Отсутствие утвержденных методик оценки текущего уровня надежности систем электроснабжения, а также нормированных значений показателей надежности электроснабжения затрудняют принятия обоснованных решений для управления надежностью электроснабжения.

В рамках современной теории надежности элементы систем электроснабжения можно характеризовать: вероятностью безотказной работы, потокам отказов, наработкой на отказ, временем восстановления, но для сложных энергетических систем и комплексов в мировой практике

особое внимание уделяется двум характеристикам - коэффициент оперативной готовности и ожидаемое время прекращения электроснабжения в течение года.

Рассмотрим задачу определения коэффициента оперативной готовности для узла нагрузки изображенного на рис.28а, для которой, так же составим схему замещения надежности рис.28б.

Схема замещения надежности отображает все элементы и структурные связи исходной электрической сети [9]. Элементы обозначаются одинаковыми фигурами для которых по справочным материалам определяются свойства надежности элемента. В рамках рассматриваемого примера, справочные данные выбираем из таблиц 8-11.

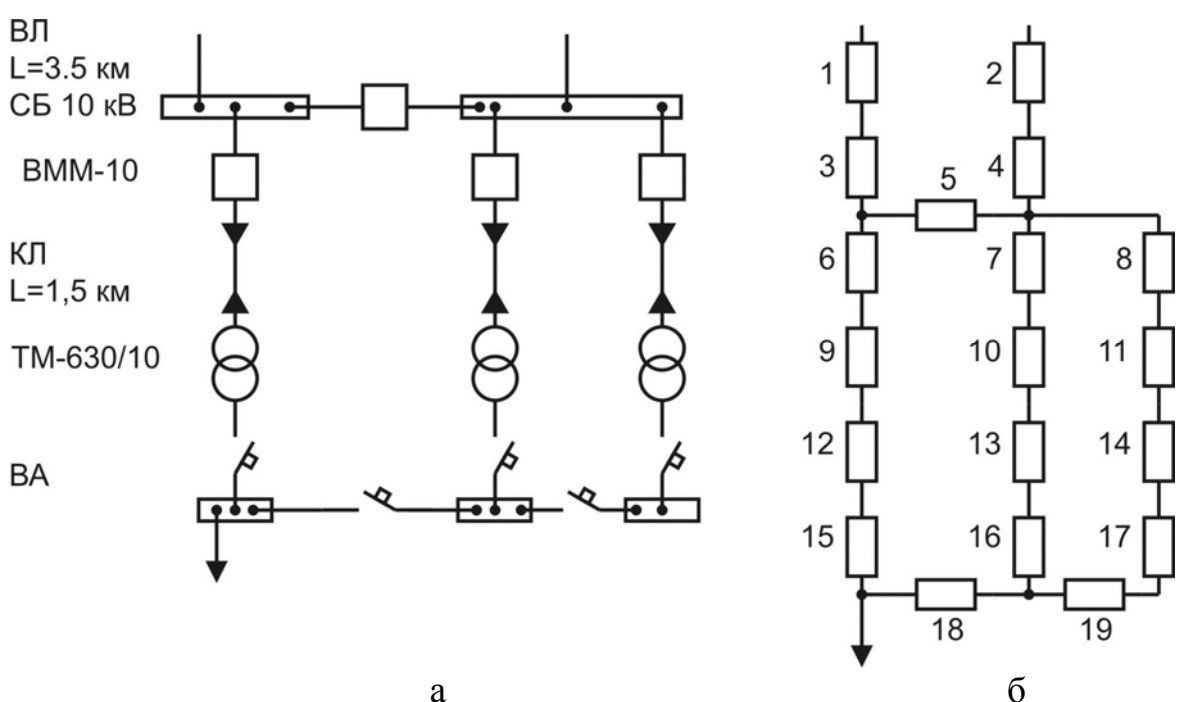


Рисунок 28 – Схема системы электроснабжения  
 а – электрическая схема системы электроснабжения;  
 б – схема замещения надежности.

Схема системы электроснабжения на рис 28а состоит из распределительного устройства 10 кВ имеющего две секции сборных шин, взаиморезервирующих друг друга через секционный выключатель. Питание распределительного устройства осуществляется по воздушной линии электропередач длиной 3,5 км. Все присоединения к сборным шинам выполнены через маломасленные выключатели, коммутирующие токи в кабельных линиях, питающих цеховые трансформаторы на удаление 1,5 км. Исследуемый узел электрической нагрузки подключен к системе электроснабжения через низковольтные автоматические выключатели.



Таблица 8 – Характеристики надежности линии электропередач [10]

Тип линии	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$\omega$ , 1/100 км·год	$T_{\text{в}}$ , ч
ВЛ	до 1	25	2
	6...10	7,6	5
	110	0,7	11
КЛ	до 1	10	2
	6...10	7,5	16
	35	3,2	16

Таблица 9 – Характеристики надежности трансформаторов [10]

Мощность кВА	$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	$\omega$ , год <sup>-1</sup>	$T_{\text{в}}$ , ч
до 2,5	6...10	0,016	50
	35	0,01	40
2,5...7,5	6...10	0,008	120
	35	0,007	65
	110	0,018	40
10...80	35	0,012	70
	110	0,014	70

На схеме замещения надежности элементы №1, 2 соответствуют воздушной линии электропередач 10 кВ. Фактическая надежность линии зависит от ее длины к примеру поток отказов линии составляет  $\omega = 7,6$  1/100 км·год, для линии длиной 3,5 км поток отказов составит  $\omega_{1,2} = 7,6 \cdot 3,5/100 = 0,266$  год<sup>-1</sup>. Продолжительность ремонта это время в течение которого элемент не будет участвовать в электроснабжение объекта, начиная с момента его выхода из строя, для линии электропередач 10 кВ среднее время восстановления составляет 5 ч [9].

Элементы 3, 4 соответствуют сборным шинам  $\omega_{3,4} = 0,03$  год<sup>-1</sup>,  $\tau_{\text{в}3,4} = 5$  ч. Элементы 5, 6, 7, 8 - маломаслянные выключатели 10 кВ,  $\omega_{5,6,7,8} = 0,007$  год<sup>-1</sup>,  $\tau_{\text{в}5,6,7,8} = 20$  ч. Элементы 9, 10, 11 – кабельная линия 10 кВ,  $\omega_{9,10,11} = 0,113$  год<sup>-1</sup>,  $\tau_{\text{в}9,10,11} = 16$  ч. Элементы 12, 13, 14 - трансформаторы 10/0,4, такие трансформаторы изготавливаются мощностью до 2,5 МВА  $\omega_{12,13,14} = 0,016$  год<sup>-1</sup>,  $\tau_{\text{в}12,13,14} = 50$  ч. Элементы 15, 16, 17, 18, 19 – воздушные автоматические выключатели до 1 кВ,  $\omega_{15,16,17,18,19} = 0,03$  год<sup>-1</sup>,  $\tau_{\text{в}15,16,17,18,19} = 4$  ч.

Таблица 10 – Характеристики надежности выключателей [10]

Тип выключателя	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$\omega$ , год <sup>-1</sup>	$T_{\text{в}}$ , ч
Воздушный автоматический	до 1	0,03	4
Электромагнитный	6...10	0,01	11
Маломасляный	10	0,007	20
	35	0,016	25
	110	0,04	20
Воздушный	35	0,016	40
	110	0,017	20

Таблица 11 – Характеристики надежности сборных шин [10]

$U_{\text{ном}}$ , кВ	$\omega$ , год <sup>-1</sup>	$T_{\text{в}}$ , ч
6...10	0,03	5
35	0,02	7
110	0,016	5

Для определения характеристик надежности узла нагрузки следует упростить схему замещения для чего производят сложение всех последовательно и параллельно соединенных элементов. После сложения последовательных элементов схема принимает вид как на рис.29а.

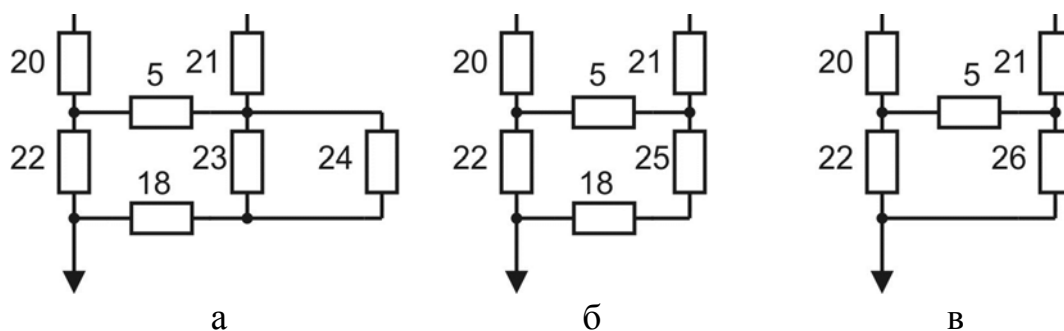


Рисунок 29 – Преобразование схемы замещения надежности

а – последовательное сложение элементов;

б – параллельное сложение элементов;

в – схема со сложной структурой.

На рис29а, элемент 20 получен путем последовательного сложения элементов 1 и 3. Расчет характеристик элемента 21 идентичен. Частота отказов последовательных элементов равна сумме частот отказов каждого элемента от 1 до n:

$$\omega_{20} = \sum_1^n \omega_i = \omega_1 + \omega_3 = 0.266 + 0.03 = 0.269 \text{ год}^{-1}.$$

Ожидаемое время восстановления последовательно соединенных элементов находим как:

$$\tau_{B20} = \frac{\sum_1^n \omega_i \cdot T_{Bi}}{\sum_1^n \omega_i} = \frac{0.266 \cdot 5 + 0.03 \cdot 5}{0.266 + 0.03} = 5.5 \text{ ч.}$$

Аналогичным образом производится вычисления для других элементов:

$$\begin{aligned} \omega_{20,21} &= 0,269 \text{ год}^{-1}; \tau_{B20,21} = 5,5 \text{ ч;} \\ \omega_{22,23} &= 0,166 \text{ год}^{-1}; \tau_{B22,23} = 17,3 \text{ ч;} \\ \omega_{24} &= 0,196 \text{ год}^{-1}; \tau_{B,24} = 15,3 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Следует отметить, что характеристики элемента 22 получается путем сложения характеристик элементов: 6, 9, 12, 15. В состав элемента 23 вошли элементы: 7, 10, 13, 16. В состав элемента 24 вошли элементы: 8, 11, 14, 17, 19.

Дальнейшее упрощение схемы связано с параллельным сложением элементов 23 и 24, (получается элемент 25) и последовательным сложением с элементом 18 (получается элемент 26) преобразует схему замещения к варианту изображенном на рис 29б.

Осуществим параллельное сложение элементов 23 и 24:

$$\begin{aligned} \omega_{25} &= 8760^{1-m} (\prod_{j=1}^m \omega_j \cdot \tau_j) \cdot (\sum_{j=1}^m \tau_j^{-1}) = \\ &= 8760^{-1} \cdot \omega_{23} \cdot \tau_{23} \cdot \omega_{24} \cdot \tau_{24} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{B23}} + \frac{1}{\tau_{B24}} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0.166 \cdot 17.3 \cdot 0.196 \cdot 15.3 \cdot \left( \frac{1}{17.3} + \frac{1}{15.3} \right) = 0.121 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\tau_{B25} = \left( \sum_{j=1}^m \tau_j^{-1} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{\tau_{B23}} + \frac{1}{\tau_{B24}} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{17,3} + \frac{1}{15,3} \right)^{-1} = 8,13 \text{ ч.}$$

Последовательно складываем надежность элементов 25 и 18:

$$\omega_{26} = \omega_{25} + \omega_{18} = 0,121 \cdot 10^{-3} + 0.03 = 0.03 \text{ год}^{-1};$$

$$\tau_{B26} = \frac{\sum_1^n \omega_i \cdot T_{Bi}}{\sum_1^n \omega_i} = \frac{0,121 \cdot 10^{-3} \cdot 8,13 + 0.03 \cdot 5}{0,121 \cdot 10^{-3} + 0.03} = 5 \text{ ч.}$$

Дальнейшее упрощение схемы, на основе рассмотренных правил невозможно, полученная на рис.29 в сложная структура называется «мостиковой», для ее решения используются специальные методы. Наиболее простой из них заключается в составлении гипотез, каждая из которых проверяется и за истинную принимают гипотезу с самыми низкими показателями надежности. Для данного примера первая гипотеза может предполагать, что ток может протекать по пути 20-22, вторая 21-5-22, третья 20-5-26, четвертая 21-26. Недостатком данного метода является излишняя трудоемкость и сложность в автоматизации расчета с помощью вычислительной техники. Также, следует упомянуть метод «исключения элемента», в котором для расчета сложных структур рассматривают два варианта, в первом переключатель считается абсолютно надежной и заменяется короткой, во втором исключается полностью. Заметим, что если структура включает в себя несколько переключателей объем расчета значительно увеличивается. В общем случае, решение «мостиковых» схем в задачах электроэнергетики проводится с использованием метода «минимальных сечений».

Суть метода заключается в предположении, что в каждой электрической схеме существует группа элементов одновременный отказ которых разорвет все пути для протекания тока в рассматриваемый узел нагрузки. Набор элементов отказ которых приводит к отказу структуры в теории надежности называют сечением. Для определения надежности структуры методом «минимальных сечений» следует выявить все сечения, определить надежность каждого из них и осуществить последовательное сложение надежности сечений. Схема минимальных сечений, для рассматриваемого примера, изображена на рис.30.

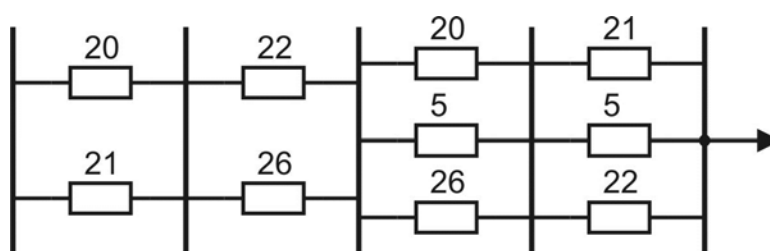


Рисунок 30 – Схема минимальных сечений

$$\begin{aligned} \omega_{27} &= 8760^{-1} \cdot \omega_{20} \cdot \tau_{20} \cdot \omega_{21} \cdot \tau_{21} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{B20}} + \frac{1}{\tau_{B21}} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0.269 \cdot 5.5 \cdot 0.269 \cdot 5.5 \cdot \left( \frac{1}{5.5} + \frac{1}{5.5} \right) = 0.91 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}; \end{aligned}$$

$$\tau_{B27} = \left( \frac{1}{5.5} + \frac{1}{5.5} \right)^{-1} = 2,75 \text{ ч.}$$

$$\begin{aligned}\omega_{28} &= 8760^{-1} \cdot \omega_{22} \cdot \tau_{22} \cdot \omega_{26} \cdot \tau_{26} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{B22}} + \frac{1}{\tau_{B26}} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0.166 \cdot 17,3 \cdot 0.03 \cdot 5 \cdot \left( \frac{1}{17,3} + \frac{1}{5} \right) = 0.127 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$\tau_{B28} = \left( \frac{1}{17,3} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 3,88 \text{ ч.}$$

$$\begin{aligned}\omega_{29} &= 8760^{-2} \cdot \omega_{20} \cdot \tau_{20} \cdot \omega_5 \cdot \tau_5 \cdot \omega_{26} \cdot \tau_{26} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{B20}} + \frac{1}{\tau_{B5}} + \frac{1}{\tau_{B26}} \right) = \\ &= 8760^{-2} \cdot 0.269 \cdot 5,5 \cdot 0.007 \cdot 20 \cdot 0.03 \cdot 5 \cdot \left( \frac{1}{5,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{5} \right) = \\ &= 0.175 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$\tau_{B29} = \left( \frac{1}{5,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 2,31 \text{ ч.}$$

$$\begin{aligned}\omega_{30} &= 8760^{-2} \cdot \omega_{21} \cdot \tau_{21} \cdot \omega_5 \cdot \tau_5 \cdot \omega_{22} \cdot \tau_{22} \cdot \left( \frac{1}{\tau_{B21}} + \frac{1}{\tau_{B5}} + \frac{1}{\tau_{B22}} \right) = \\ &= 8760^{-2} \cdot 0.269 \cdot 5,5 \cdot 0.007 \cdot 20 \cdot 0.166 \cdot 17,3 \cdot \left( \frac{1}{5,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{17,3} \right) = \\ &= 2.25 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$\tau_{B30} = \left( \frac{1}{5,5} + \frac{1}{20} + \frac{1}{17,3} \right)^{-1} = 3,45 \text{ ч.}$$

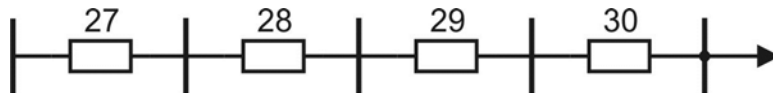


Рисунок 31 – Упрощенная схема минимальных сечений

Определим показатели надежности узла нагрузки путем сложения элементов 27, 28, 29, 30 (рис. 31):

$$\begin{aligned}\omega_y &= \omega_{27} + \omega_{28} + \omega_{29} + \omega_{30} = 0.91 \cdot 10^{-6} + 0.127 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 0.175 \cdot 10^{-9} + 2.25 \cdot 10^{-9} = 1.04 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};\end{aligned}$$

$$\tau_{By} = \frac{2,75 \cdot 0.91 \cdot 10^{-6} + 3,88 \cdot 0.127 \cdot 10^{-6} + 2,31 \cdot 0.175 \cdot 10^{-9} + 3,45 \cdot 2.25 \cdot 10^{-9}}{1.04 \cdot 10^{-6}} = 2.89 \text{ ч.}$$

Среднее время безотказной работы узла нагрузки:

$$T_{py} = (\omega_y)^{-1} = \frac{1}{1,04 \cdot 10^{-6}} = 961538 \text{ ч} = 109,76 \text{ год};$$

Коэффициент оперативной готовности [9]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{ру}}}{T_{\text{ру}} + \tau_{\text{ву}}} = \frac{961538}{961538 + 2,89} = 0,999997.$$

Полученные расчетные данные говорят о высокой надежности рассматриваемого узла электрических нагрузок, показатели надежности узла удовлетворяют требования потребителя второй и первой категории по надежности электроснабжения. В текущем состоянии, система электроснабжения не нуждается в дополнительных средствах повышения надежности.

### 3.2 Оценка качества электрической энергии по осциллограмме напряжения

Генераторы и электроприемники подключенные к электрической сети создают электромагнитные колебания, как периодического так и случайного характера. Периодические колебания описываются тригонометрическими выражениями, значение которых изменяется по гармоническому закону, например напряжение:

$$U = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $U_{\text{max}}$  – амплитудное значение напряжения, В;  $\omega$  – круговая частота вращения равная  $2\pi f$ , рад/с;  $f$  – частота напряжения сети, Гц;  $t$  – время, с;  $\varphi$  – фаза сдвига функции напряжения, рад.

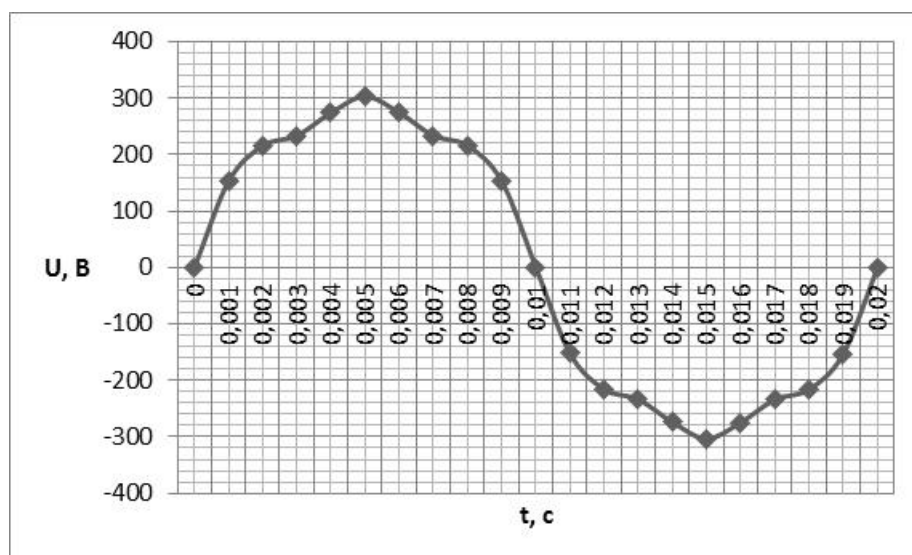


Рисунок 32 - Осциллограмма фазного напряжения

В результате напряжение электрической сети представляет сумму всех электромагнитных колебаний сети. Реальное напряжение электрической сети имеет вид искаженной синусоидальной кривой, один из возможных вариантов которой изображен на рис. 32.

При значительном искажении формы напряжения сети ухудшаются рабочие характеристики электрооборудования, что приводит к материальному ущербу, поэтому искажение синусоидальности напряжений контролируются с помощью соответствующих коэффициентов, значение которых вычисляют с помощью разложения реальной функции напряжения в ряды Фурье. Другими словами, для оценки искажения синусоидальности напряжений, требуется, определить функции всех электромагнитных колебаний сети, сумма которых будет равна фактическому напряжению, вычислить действующие значения этих сигналов и рассчитать коэффициенты искажения синусоидальности.

Следует отметить, что при использовании рядов Фурье все составляющие фактического напряжения будут представлены в виде гармонических функций, за счет чего они и получили свое название – гармоники. Частота каждой гармоники кратна частоте первой гармоники, или как ее еще называют основной. Таким образом, высшими гармониками можно назвать электромагнитные колебания изменяющиеся по гармоническому закону с частотой кратно превышающей частоту основной гармоники.

Электрическая энергия в сети считается качественной, если в 95 % измерений, в течение суток коэффициенты искажения синусоидальности не превышают допустимых значений.

Наиболее трудоемким этапом анализа качества электрической энергии является разложение кривой напряжения в ряд Фурье по уравнению:

$$U(t) = U_0 + \sum_{m=1}^{\infty} U_{vmax} \cdot \sin(v\omega t + \varphi_v),$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая. В трехфазных промышленных электрических сетях, постоянная составляющая напряжения, как правило, отсутствует, поэтому  $U_0 = 0$ ;  $U_{vmax}$  – амплитудное значение гармоники напряжения, В;  $\varphi_v$  – фаза  $v$ -ой гармоники напряжения.

При ручной обработке осциллограмм ряд Фурье записывается в другом виде:

$$U(t) = \sum_{v=1}^{\infty} (U'_{vm} \sin(v\omega t) + U''_{vm} \cos(v\omega t)),$$

Коэффициенты ряда определяются следующим образом:

$$U'_{vm} = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \cdot \sin(v\theta_i); U''_{vm} = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \cdot \cos(v\theta_i),$$

где  $m$  – число интервалов квантования исходной несинусоидальной кривой  $U(t)$  на интервале, равном одному периоду;  $U_i, \theta_i$  – ордината кривой и угол, соответствующий  $i$ -му интервалу квантования, ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

Амплитуда  $v$ -ой гармоники определяется как:

$$U_v = \sqrt{(U'_{vm})^2 + (U''_{vm})^2}.$$

Использование свойств периодических кривых, обладающих симметрией, позволяет сократить объем расчетной работы [5]:

- в разложении кривых, симметричных относительно оси абсцисс отсутствует постоянная составляющая и четные гармоники, т.е. равны нулю коэффициенты  $U_0 = U'_2 = U''_2 = U'_4 = U''_4 = \dots = 0$ ;
- в разложении кривых симметричных относительно оси ординат отсутствует синусная составляющая, т.е.  $U'_1 = U'_2 = U'_3 = \dots = 0$ ;
- в разложении кривых симметричных относительно начала координат отсутствует косинусная и постоянная составляющая  $U''_1 = U''_2 = U''_3 = \dots = 0$ .

При вычислении  $U'_{vm}$  и  $U''_{vm}$ , нечетных  $v$ , следует учесть, что значение сумм синусной и косинусной составляющих за первый полупериод равно значению аналогичных сумм за второй полупериод, что позволит сократить расчет удваивая результат вычислений за один полупериод, данная особенность учтена в представленных формулах для определения коэффициентов ряда Фурье.

**Пример 1.** Используя осциллограмму напряжений на рис. определите частоту напряжения сети и ее отклонения.

Частота изменения любой периодической функции обратно пропорциональна длительности ее периода  $T$ , с. Для измерения периода напряжения по осциллограмме достаточно определить интервал времени между точками в которых кривая напряжения пересекает ось времени, что будет соответствовать длительности полупериода. На рис. длительность полупериода составляет 0,01 с.

Соответственно период напряжения равен 0,02с;

$$\text{Частота напряжения } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot 0,01} = 50 \text{ Гц};$$



Отклонение частоты  $\Delta f = f - f_H = 50 - 50 = 0$  Гц;

Отклонение частоты  $\delta f = \frac{f-f_H}{f_H} \cdot 100 \% = \frac{50-50}{50} \cdot 100 \% = 0 \%$ ;

Угловая частота вращения  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$  рад/с.

В результате установлено, что установившиеся отклонения частоты находятся в допустимых пределах.

**Пример 2.** Разложить кривую напряжения изображенную на рис. в ряд Фурье, составить уравнение сетевого напряжения, оценить искажение синусоидальности.

Для определения параметров искажения напряжения по рис.32. разделим первый полупериод синусоиды на равные интервалы квантования. Ширина интервала квантования определяет точность расчета, рекомендуется использовать интервалы не шире 5 Гц, соответственно для определения первой гармоники достаточно 10 интервалов, для третьей тридцати и т.д. В данном случае разделим полупериод на 10 интервалов. Определим фазу для каждого из интервалов, результаты запишем в таблицу 12.

Таблица 12 – Квантование осциллограммы фазных напряжений

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_i, \text{с}$	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01
$\varphi_i, \text{град}$	18	36	54	72	90	108	126	144	162	180
$U_i, \text{В}$	152	216	234	274	303	274	234	216	153	1

Найдем коэффициенты ряда Фурье для основной частоты:

$$U'_v = \frac{2}{10} \sum_{i=1}^m 0 \cdot \sin(1 \cdot 0) + 152 \cdot \sin(1 \cdot 18) + 216 \cdot \sin(1 \cdot 36) + \\ + 234 \cdot \sin(1 \cdot 54) + 274 \cdot \sin(1 \cdot 72) + 303 \cdot \sin(1 \cdot 90) + \\ + 274 \cdot \sin(1 \cdot 108) + 234 \cdot \sin(1 \cdot 126) + 216 \cdot \sin(1 \cdot 144) + \\ + 153 \cdot \sin(1 \cdot 162) + 1 \cdot \sin(1 \cdot 180) = 310,3 \text{ В}$$

Т.к. исследуемая кривая симметрична относительно начала координат  $U''_1 = 0$ . Коэффициенты ряда Фурье для третьей и пятой гармонической определяются аналогично:  $U'_3 = 32 \text{ В}$ ,  $U'_5 = 25,6 \text{ В}$ ,  $U''_3 = U''_5 = 0$ .

Найдем амплитудное значения напряжения первой гармоники как:

$$U_{1max} = \sqrt{310,3^2 + 0} = 310,3 \text{ В},$$

Амплитудные значения напряжений третьей и пятой гармоники соответственно равны 32 и 25,6 В.

Используя расчетные значения коэффициентов рядов Фурье составим уравнение для напряжения осциллограмма которого изображена на рис.32.

$$U(t) = 310 \cdot \sin(314 \cdot t) + 32 \cdot \sin(942 \cdot t) + 26,5 \cdot \sin(1570 \cdot t).$$

Графическая интерпретация полученного уравнения показана на рис.33. Кривая 4 на, является суммой кривой 1, 2, 3, искомым гармонических составляющих. Кривая 4 на, идентична кривой напряжения на рис.32, что свидетельствует о правильности определения гармонического состава.

Определим коэффициенты искажения синусоидальности напряжения сети:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{v=3}^5 (U_{(v)i})^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100 \% = \frac{\sqrt{\left(\frac{32}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{26,5}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\left(\frac{310}{\sqrt{2}}\right)} \cdot 100 \% = 13,4 \%.$$

Определим коэффициенты искажения синусоидальности напряжения сети  $i$  – ой гармонической:

$$K_{U(3)i} = \frac{\frac{32}{\sqrt{2}}}{\frac{310}{\sqrt{2}}} \cdot 100 \% = 10,3 \%, K_{U(5)i} = \frac{\frac{26,5}{\sqrt{2}}}{\frac{310}{\sqrt{2}}} \cdot 100 \% = 8,5 \%.$$

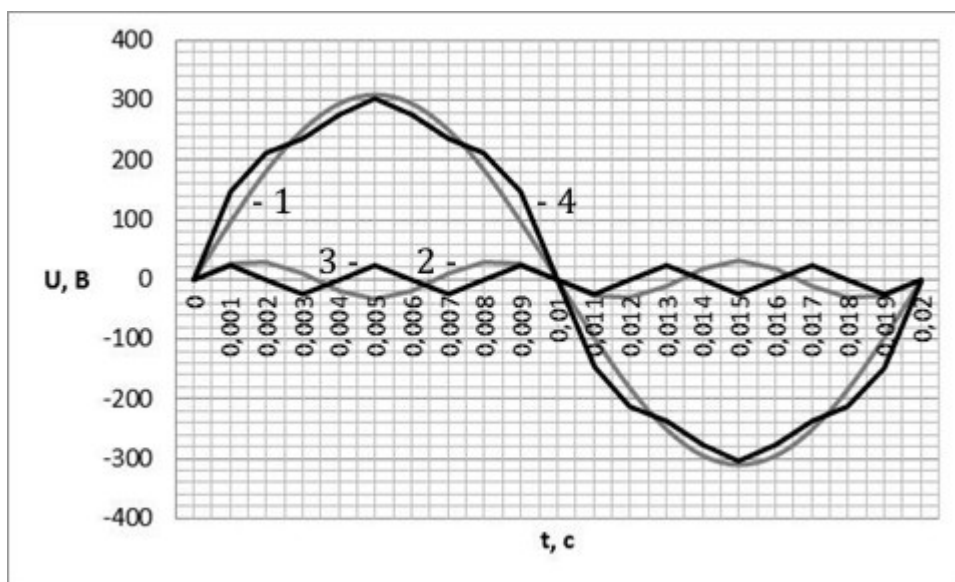


Рисунок 33 – Высшие гармонически составляющие напряжения сети: 1 – кривая первой гармонической составляющей; 2 – кривая третьей гармонической составляющей; 3 – кривая пятой гармонической составляющей; 4 – кривая представляющая сумму исследуемых гармонических составляющих.

Из полученных данных видно - величины коэффициентов искажения синусоидальности превышают контролируемый уровень из этого следует, что качество электрической энергии в сети, в момент измерения был ниже требуемого. Для получение объективной информации необходимо провести N измерений в течении суток и сделать вывод опираясь на их средней результат.

Точность описанного метода анализа несинусоидальной кривой в значительной степени зависит от параметров квантования исследуемой графической зависимости. Значение действующих напряжений при моделировании исследуемой кривой составляли 220, 25 и 20 В для первой, третьей и пятой гармоники соответственно. В результате разложения несинусоидального напряжения в ряд Фурье определенные значение составили 220, 22,7, 18,8, т.е. величины третьей и пятой гармонической определены со значительной погрешностью, причина которой кроется в малой частоте квантования исходной кривой, не позволяющей точное определение гармоник данных номеров.

**Пример 3** Определите действующие значения тока, напряжения и мощностей по несинусоидальным периодическим функциям изображенных на рис., изменяющихся по следующим законам:

$$u(t) = 311 \cdot \sin(300t) + 24,9 \cdot \sin(900t)$$

$$i(t) = 212 \cdot \sin(300t - 0,6) + 53 \cdot \sin(900t - 1,8).$$

Из законов изменения мгновенных значений токов и напряжений видно, что в гармоническом спектре заданных кривых присутствует высшая гармоническая составляющая, частота которой в три раза превышает частоту основной гармоники. Угловая частота основной гармоники ниже номинального значения угловой частоты промышленной электрической сети на 14 рад/с.

Действующее напряжения основной гармонической составляющей

$$U_{(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{1,41} = 220 \text{ В};$$

Действующее напряжения третьей гармонической составляющей

$$U_{(3)} = \frac{U_{m(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{24,9}{1,41} = 17,6 \text{ В};$$

Действующее напряжения сети

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{220^2 + 17,6^2} = 220,7 \text{ В};$$

Действующий ток основной гармонической составляющей

$$I_{(1)} = \frac{I_{m(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{212}{1,41} = 150 \text{ А};$$

Действующий ток третьей гармонической составляющей

$$I_{(3)} = \frac{I_{m(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{53}{1,41} = 37,5 \text{ A};$$

Действующее тока сети

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{150^2 + 37,5^2} = 154,6 \text{ A};$$

Угол фазового сдвига между основными гармониками тока и напряжения равен 0,6 рад., что составляет  $0,6 \cdot \frac{180}{\pi} = 34,4$  град.

Угол фазового сдвига между третьей гармонической тока и напряжения в три раза больше углов фазовых сдвигов основных гармонических и составляет 1,8 рад. или 103 град.

Суммарная активная мощность несинусоидальных токов и напряжений находится как:

$$P = U_{(1)}I_{(1)}\cos(\varphi_{(1)}) + U_{(3)}I_{(3)}\cos(\varphi_{(3)}) = 220 \cdot 150 \cdot \cos(34,4) + 17,6 \cdot 37,5 \cdot \cos(103) = 27,22 - 0,148 = 27,07 \text{ кВт}$$

Суммарная реактивная мощность несинусоидальных токов и напряжений находится как:

$$Q = U_{(1)}I_{(1)}\sin(\varphi_{(1)}) + U_{(3)}I_{(3)}\sin(\varphi_{(3)}) = 220 \cdot 150 \cdot \sin(34,4) + 17,6 \cdot 37,5 \cdot \sin(103) = 18,64 + 0,64 = 19,28 \text{ кВАр}$$

Суммарная полная мощность несинусоидальных токов и напряжений находится как:

$$S = U_{(1)}I_{(1)} + U_{(3)}I_{(3)} = 220 \cdot 150 + 17,6 \cdot 37,5 = 33,66 \text{ кВА}$$

Допускается определять полную активную мощность как

$$S = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2} + \sqrt{P_{(3)}^2 + Q_{(3)}^2} = \sqrt{27,22^2 + 18,64^2} + \sqrt{(-0,148)^2 + 0,64^2} = 32,99 + 0,66 = 33,65 \text{ кВА}$$

Таким образом, расчет действующих значений токов, напряжений и мощностей в промышленных электрических сетях требует учета параметров каждой гармонической составляющей в отдельности из которых складываются действующие значения параметров реального электрического сигнала.

**Пример 4** Определить величину несимметрии трехфазной системы напряжений, фазные напряжения которой изменяются по следующем законам:

$$u_A(t) = 311 \cdot \sin(314t);$$

$$u_B(t) = 305 \cdot \sin(314t - 2,44);$$

$$u_C(t) = 312 \cdot \sin(314t + 1,92).$$

Для оценки уровня несимметрии используется метод симметричных составляющих. В полностью симметричной системе напряжений будет присутствовать только составляющая прямой последовательности, при возникновении несимметрии величины обратной и нулевой последовательности будут характеризовать величину несимметрии.

Представим фазные напряжения в виде действующих значений и запишем в комплексной форме:

$$\dot{U}_A = 220,6 \text{ В}; \dot{U}_B = 216,3e^{-i140} \text{ В}; \dot{U}_C = 221,3e^{i110} \text{ В}.$$

Определим действующее значение напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}(220,6 + e^{i120} \cdot 216,3e^{-i140} + e^{i240} \cdot 221,3e^{i110}) = 217,2e^{-i9,93} \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}(220,6 + e^{i240} \cdot 216,3e^{-i140} + e^{i120} \cdot 221,3e^{i110}) = 19,88e^{i46,7} \text{ В} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}(220,6 + 216,3e^{-i140} + 221,3e^{i110}) = 23,99e^{i106,88} \text{ В} \end{aligned}$$

Действующие значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно равны:

$$|\dot{U}_1| = 217,2 \text{ В}; |\dot{U}_2| = 19,9 \text{ В}; |\dot{U}_0| = 23,99 \text{ В}.$$

Коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности равны:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \% = \frac{19,88}{217,2} \cdot 100 \% = 9,15 \%;$$

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_0}{U_1} \cdot 100 \% = \frac{\sqrt{3} \cdot 23,99}{217,2} \cdot 100 \% = 19,1 \%.$$

Расчет коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательности показал, что в заданной сети несимметрия значительно превышает предельно допустимые нормы.

### 3.3 Индивидуальное домашнее задание

В целях получения практических навыков контроля, анализа и управления параметрами качества электроснабжения Вам предлагается выполнить расчетно-практическую работу состоящую из трех частей: анализа надежности электроснабжения узла нагрузки, анализа качества электрической энергии и разработки мероприятий по повышению энергоэффективности.

На рис. 34 изображена типовая однолинейная схема электроснабжения предприятия. Номер узла нагрузки на схеме, является номером Вашего варианта, он должен совпадать с последней цифрой номера в Вашей зачетной книжке. Для выбора Вашей системы уравнений токов и напряжений, полученных в результате предварительных исследований, используйте предпоследнюю цифру в номере зачетной книжки.

После выполнения задания, в качестве отчетной документации, Вы представляете расчетно-графическую записку, оформленную в соответствии с СТО ТПУ 2.5.01-2006 и сделанную в строгом соответствии с рекомендациями приведенными ниже.

**Цель работы:** проведение анализа качества электроснабжения промышленного предприятия для последующего определения объема организационных и технических мероприятий способствующих оптимизации работы системы электроснабжения.

#### Основные задачи работы:

1. провести анализ надежности электроснабжения узла нагрузки;
2. провести анализ показателей качества электрической энергии и энергоэффективности по известным уравнениям тока и напряжения узла нагрузки;

3. разработать рекомендации по оптимизации надежности электроснабжения, качества электрической энергии и энергоэффективности для заданного узла нагрузки.

### **Последовательность анализа надежности электроснабжения узла нагрузки**

1. составить схему замещения надежности для рассматриваемого узла нагрузки;
2. используя справочную литературу определить характеристики надежности элементов входящих в состав схемы;
3. рассчитать ожидаемое время простоя узла нагрузки за год, коэффициента оперативной готовности;
4. сделать выводы о соответствии уровня надежности электроснабжения для рассматриваемого потребителя и дать рекомендации по повышению надежности электроснабжения.

### **Последовательность анализа качества электрической энергии и энергоэффективности по осциллограммам тока и напряжения**

1. определить частоту напряжения в электрической сети  $f$  и отклонение частоты,  $\Delta f$ , Гц;
2. вычислить коэффициенты несинусоидальности напряжения (общий и по каждой  $\nu$ -ой гармонической);  $K_U, K_{U(3)}, K_{U(5)}$ ;
3. вычислить действующее значение напряжения основной гармоники и определить отклонения напряжения,  $\delta U_y$ , %;
4. вычислить симметричные составляющие токов и напряжений ( $U_1, U_2, U_0$ , В;  $I_1, I_2, I_0$ , А; ), коэффициенты несимметрии обратной и нулевой последовательности ( $K_{2U}, K_{0U}, K_{2I}, K_{0I}$ , %);
5. вычислить мощность активных и реактивных нагрузок по фазам, коэффициенты мощности;
6. вычислить потери электрической энергии вызванные несимметрией и несинусоидальностью за 1 час работы сети, с учетом равенства сопротивлений проводников фазы и рабочего заземления;
7. вычислить количество полезной электрической энергии полученной потребителем за 1 час работы сети;
8. оценить потенциал энергосбережения в электрической сети, опираясь на рассчитанные данные;
9. разработать конкретные технические решения по повышению качества электрической энергии и энергоэффективности, предло-

жить порядок внедрения мероприятий, марки дополнительного оборудования, его описание и мощность. Разрабатывая мероприятия следует обратить внимание на показатели отличные от допустимых значений.

### Содержание расчетно-графической записки:

1. краткое описание энергосистемы, особенностей электрических нагрузок в контролируемом узле, норм и требований к показателям надежности электроснабжения, энергоэффективности, показателям качества электрической энергии;
2. цель работы, текст задания;
3. схему замещения для расчета параметров надежности электроснабжения узла нагрузки и примеры расчета.
4. примеры расчета показателей качества электрической энергии и энергоэффективности;
5. сводную таблицу расчетных данных (табл. 13);
6. обзор возможных мероприятий по повышению качества электроснабжения в узле нагрузки, технические сведения об устройствах для повышения качества электрической энергии, пример их выбора;
7. заключение в форме рекомендаций;
8. список литературы.

Таблица 13 – Сводная таблица\*

Фаза	А	В	С	Фаза	А	В	С
показатель				показатель			
$\Delta f$ , Гц				$I_1$ , А			
$\delta U_y$ , %				$I_2$ , А			
$\cos(\varphi)$				$I_0$ , А			
L или С				$K_{2U}$ , %			
$K_U$ , %				$K_{0U}$ , %			
$K_{U(3)}$ , %				$K_{2I}$ , %			
$K_{U(5)}$ , %				$K_{0I}$ , %			
$K_I$ , %				$P_{несим}$ , кВт			
$K_{I(3)}$ , %				$P$ , кВт			
$K_{I(5)}$ , %				$Q$ , кВАр			
$P_v$ , кВт				$S$ , кВА			
$U_1$ , В				$W_{сум.}$ , кВтч			
$U_2$ , В				$W_{полез.}$ , кВтч			
$U_0$ , В				$W_{потер.}$ , кВтч			

\*-  $P_v$  – активная мощность высших гармоник, кВт; L или С – характер коэффициента мощности, индуктивный или емкостной;  $P_{несим}$  – мощность потерь вызванных несимметрией напряжений, кВт;  $W_{сум.}$  – потребленная электрическая энергия, кВтч;  $W_{полез.}$  – электрическая энергия полезная для потребителя, кВтч.



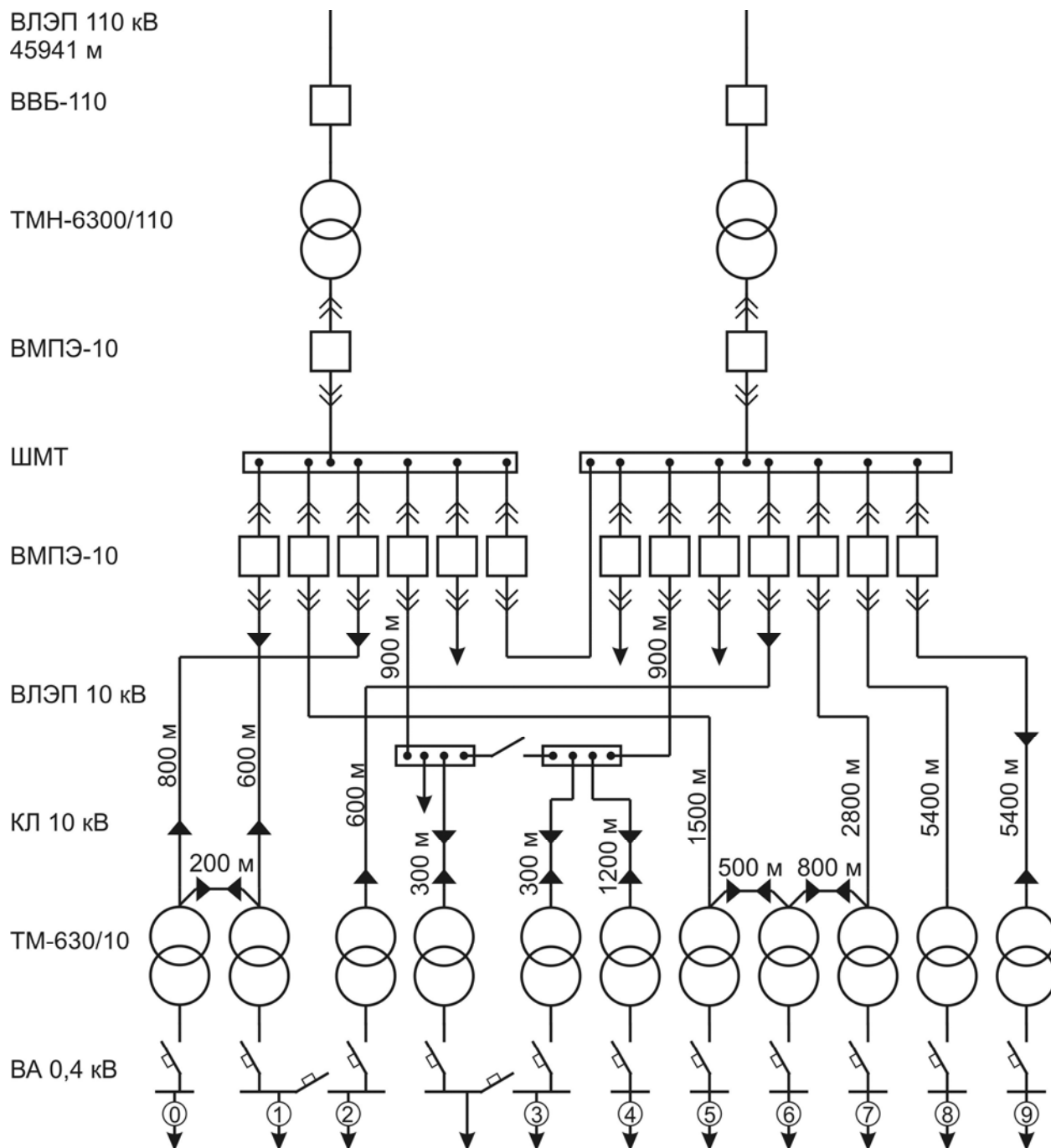


Рисунок 34 – Однолинейная электрическая схема промышленного предприятия (номер узла нагрузки должен соответствовать последней цифре номера Вашей зачетной книжки)

## Уравнения токов и напряжений узла нагрузки

На основе эмпирических исследований параметров трехфазной электрической сети были составлены уравнения токов и напряжений, полностью описывающие работу трехфазной электрической сети в установившемся режиме работы, на основании которых Вам предлагается провести анализ качества электрической энергии. Номер Вашего варианта соответствует предпоследней цифре номера Вашей зачетной книжки.

### Вариант 0

$$\begin{aligned}U_A &= 535,8 \cdot \sin(313 \cdot t) + 30 \cdot \sin(939 \cdot t) + 22 \cdot \sin(1565 \cdot t) \\U_B &= 542 \cdot \sin(313 \cdot t + 2,18) + 34 \cdot \sin(939 \cdot t + 6,54) + 20 \cdot \sin(1565 \cdot t + 10,91) \\U_C &= 529 \cdot \sin(313 \cdot t - 1,91) + 30 \cdot \sin(939 \cdot t - 5,76) + 22 \cdot \sin(1565 \cdot t - 9,6) \\I_A &= 40 \cdot \sin(313 \cdot t - 0,4) + 4 \cdot \sin(939 \cdot t - 1,2) + 1 \cdot \sin(1565 \cdot t - 2) \\I_B &= 35 \cdot \sin(313 \cdot t + 1,66) + 6 \cdot \sin(939 \cdot t + 4,97) + 3 \cdot \sin(1565 \cdot t + 8,29) \\I_C &= 41 \cdot \sin(313 \cdot t - 2,27) + 2 \cdot \sin(939 \cdot t - 6,81) + 1 \cdot \sin(1565 \cdot t - 11,34)\end{aligned}$$

### Вариант 1

$$\begin{aligned}U_A &= 930,6 \cdot \sin(315 \cdot t) + 70 \cdot \sin(945 \cdot t) + 65 \cdot \sin(1575 \cdot t) \\U_B &= 940 \cdot \sin(315 \cdot t + 2,29) + 50 \cdot \sin(945 \cdot t + 6,86) + 30 \cdot \sin(1575 \cdot t + 11,43) \\U_C &= 926 \cdot \sin(315 \cdot t - 2,09) + 40 \cdot \sin(945 \cdot t - 6,28) + 25 \cdot \sin(1575 \cdot t - 10,47) \\I_A &= 25 \cdot \sin(315 \cdot t - 0,17) + 6 \cdot \sin(945 \cdot t - 0,52) + 4 \cdot \sin(1575 \cdot t - 0,87) \\I_B &= 21 \cdot \sin(315,5 \cdot t + 2,32) + 4 \cdot \sin(945 \cdot t + 6,96) + 3 \cdot \sin(1575 \cdot t + 11,61) \\I_C &= 53 \cdot \sin(315 \cdot t - 2,34) + 6 \cdot \sin(945 \cdot t - 7,02) + 5 \cdot \sin(1575 \cdot t - 11,69)\end{aligned}$$

### Вариант 2

$$\begin{aligned}U_A &= 310,2 \cdot \sin(312 \cdot t) + 10 \cdot \sin(936 \cdot t) + 8 \cdot \sin(1560 \cdot t) \\U_B &= 315 \cdot \sin(312 \cdot t + 1,91) + 50 \cdot \sin(936 \cdot t + 5,76) + 30 \cdot \sin(1560 \cdot t + 9,6) \\U_C &= 306 \cdot \sin(312 \cdot t - 2,53) + 30 \cdot \sin(936 \cdot t - 7,59) + 25 \cdot \sin(1560 \cdot t - 12,65) \\I_A &= 40 \cdot \sin(312 \cdot t - 0,08) + 3 \cdot \sin(936 \cdot t - 0,26) + 1 \cdot \sin(1560 \cdot t - 0,44) \\I_B &= 31 \cdot \sin(312 \cdot t + 1,71) + 8 \cdot \sin(936 \cdot t + 5,13) + 6 \cdot \sin(1560 \cdot t + 8,55) \\I_C &= 48 \cdot \sin(312 \cdot t - 2,88) + 7 \cdot \sin(936 \cdot t - 8,64) + 5 \cdot \sin(1560 \cdot t - 14,87)\end{aligned}$$

### Вариант 3

$$\begin{aligned}U_A &= 155,1 \cdot \sin(314,5 \cdot t) + 12 \cdot \sin(943,5 \cdot t) + 9 \cdot \sin(1572,5 \cdot t) \\U_B &= 140 \cdot \sin(314,5 \cdot t + 2,18) + 12 \cdot \sin(943,5 \cdot t + 6,54) + 8 \cdot \sin(1572,5 \cdot t + 10,91) \\U_C &= 158 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 2,18) + 10 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 6,54) + 6 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 10,91)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_A &= 60 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 0,35) + 20 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 1,05) + 15 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 1,75) \\I_B &= 75 \cdot \sin(314,5 \cdot t + 1,75) + 28 \cdot \sin(943,5 \cdot t + 5,24) + 18 \cdot \sin(1572,5 \cdot t + 8,73) \\I_C &= 55 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 2) + 18 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 6,02) + 12 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 10,03)\end{aligned}$$

### Вариант 4

$$\begin{aligned}U_A &= 530 \cdot \sin(312 \cdot t) + 40 \cdot \sin(936 \cdot t) + 21 \cdot \sin(1560 \cdot t) \\U_B &= 525 \cdot \sin(312 \cdot t + 2,27) + 25 \cdot \sin(936 \cdot t + 6,81) + 28 \cdot \sin(1560 \cdot t + 11,34) \\U_C &= 520 \cdot \sin(312 \cdot t - 2) + 30 \cdot \sin(936 \cdot t - 5,76) + 26 \cdot \sin(1560 \cdot t - 9,6)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_A &= 55 \cdot \sin(312 \cdot t - 0,61) + 20 \cdot \sin(936 \cdot t - 1,83) + 15 \cdot \sin(1560 \cdot t - 3,05) \\I_B &= 60 \cdot \sin(312 \cdot t + 2) + 28 \cdot \sin(936 \cdot t + 6,02) + 18 \cdot \sin(1560 \cdot t + 10,03) \\I_C &= 75 \cdot \sin(312 \cdot t - 2,09) + 18 \cdot \sin(936 \cdot t - 6,28) + 12 \cdot \sin(1560 \cdot t - 10,47)\end{aligned}$$

### Вариант 5

$$\begin{aligned}U_A &= 305 \cdot \sin(310 \cdot t) + 40 \cdot \sin(930 \cdot t) + 21 \cdot \sin(1550 \cdot t) \\U_B &= 301 \cdot \sin(310 \cdot t + 2,18) + 25 \cdot \sin(930 \cdot t + 6,54) + 28 \cdot \sin(1550 \cdot t + 10,9) \\U_C &= 308 \cdot \sin(310 \cdot t - 2) + 30 \cdot \sin(930 \cdot t - 6) + 26 \cdot \sin(1550 \cdot t - 10,03)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_A &= 81 \cdot \sin(310 \cdot t - 0,35) + 36 \cdot \sin(930 \cdot t - 1,05) + 23 \cdot \sin(1550 \cdot t - 1,75) \\I_B &= 90 \cdot \sin(310 \cdot t + 1,92) + 48 \cdot \sin(930 \cdot t + 5,76) + 30 \cdot \sin(1550 \cdot t + 9,6) \\I_C &= 65 \cdot \sin(310 \cdot t - 1,83) + 32 \cdot \sin(930 \cdot t - 5,5) + 24 \cdot \sin(1550 \cdot t - 9,16)\end{aligned}$$

### Вариант 6

$$\begin{aligned}U_A &= 525 \cdot \sin(313 \cdot t) + 32 \cdot \sin(939 \cdot t) + 25 \cdot \sin(1565 \cdot t) \\U_B &= 530 \cdot \sin(313 \cdot t + 2,18) + 34 \cdot \sin(939 \cdot t + 6,54) + 26 \cdot \sin(1565 \cdot t + 10,91) \\U_C &= 532 \cdot \sin(313 \cdot t - 1,91) + 18 \cdot \sin(939 \cdot t - 5,76) + 16 \cdot \sin(1565 \cdot t - 9,6)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_A &= 58 \cdot \sin(313 \cdot t - 0,4) + 16 \cdot \sin(939 \cdot t - 1,2) + 12 \cdot \sin(1565 \cdot t - 2) \\I_B &= 45 \cdot \sin(313 \cdot t + 1,66) + 12 \cdot \sin(939 \cdot t + 4,97) + 4 \cdot \sin(1565 \cdot t + 8,29) \\I_C &= 42 \cdot \sin(313 \cdot t - 2,27) + 8 \cdot \sin(939 \cdot t - 6,81) + 2 \cdot \sin(1565 \cdot t - 11,34)\end{aligned}$$

## Вариант 7

$$U_A = 530 \cdot \sin(315 \cdot t) + 60 \cdot \sin(945 \cdot t) + 55 \cdot \sin(1575 \cdot t)$$

$$U_B = 520 \cdot \sin(315 \cdot t + 2,29) + 70 \cdot \sin(945 \cdot t + 6,86) + 48 \cdot \sin(1575 \cdot t + 11,43)$$

$$U_C = 518 \cdot \sin(315 \cdot t - 2,09) + 40 \cdot \sin(945 \cdot t - 6,28) + 30 \cdot \sin(1575 \cdot t - 10,47)$$

$$I_A = 25 \cdot \sin(315 \cdot t - 0,17) + 11 \cdot \sin(945 \cdot t - 0,52) + 10 \cdot \sin(1575 \cdot t - 0,87)$$

$$I_B = 21 \cdot \sin(315 \cdot t + 2,32) + 19 \cdot \sin(945 \cdot t + 6,96) + 9 \cdot \sin(1575 \cdot t + 11,61)$$

$$I_C = 53 \cdot \sin(315 \cdot t - 2,34) + 22 \cdot \sin(945 \cdot t - 7,02) + 18 \cdot \sin(1575 \cdot t - 11,69)$$

## Вариант 8

$$U_A = 530 \cdot \sin(310 \cdot t) + 40 \cdot \sin(930 \cdot t) + 21 \cdot \sin(1550 \cdot t)$$

$$U_B = 540 \cdot \sin(310 \cdot t + 2,18) + 25 \cdot \sin(930 \cdot t + 6,54) + 28 \cdot \sin(1550 \cdot t + 10,9)$$

$$U_C = 528 \cdot \sin(310 \cdot t - 2) + 30 \cdot \sin(930 \cdot t - 6) + 26 \cdot \sin(1550 \cdot t - 10,03)$$

$$I_A = 81 \cdot \sin(310 \cdot t - 0,35) + 36 \cdot \sin(930 \cdot t - 1,05) + 23 \cdot \sin(1550 \cdot t - 1,75)$$

$$I_B = 68 \cdot \sin(310 \cdot t + 1,92) + 48 \cdot \sin(930 \cdot t + 5,76) + 30 \cdot \sin(1550 \cdot t + 9,6)$$

$$I_C = 85 \cdot \sin(310 \cdot t - 1,83) + 32 \cdot \sin(930 \cdot t - 5,5) + 24 \cdot \sin(1550 \cdot t - 9,16)$$

## Вариант 9

$$U_A = 520 \cdot \sin(314,5 \cdot t) + 12 \cdot \sin(943,5 \cdot t) + 9 \cdot \sin(1572,5 \cdot t)$$

$$U_B = 530 \cdot \sin(314,5 \cdot t + 2,18) + 12 \cdot \sin(943,5 \cdot t + 6,54) + 8 \cdot \sin(1572,5 \cdot t + 10,91)$$

$$U_C = 532 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 2,18) + 10 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 6,54) + 6 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 10,91)$$

$$I_A = 60 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 0,35) + 20 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 1,05) + 15 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 1,75)$$

$$I_B = 48 \cdot \sin(314,5 \cdot t + 1,75) + 28 \cdot \sin(943,5 \cdot t + 5,24) + 18 \cdot \sin(1572,5 \cdot t + 8,73)$$

$$I_C = 46 \cdot \sin(314,5 \cdot t - 2) + 18 \cdot \sin(943,5 \cdot t - 6,02) + 12 \cdot \sin(1572,5 \cdot t - 10,03)$$

### 3.4 Оформление расчетно-графических работ

В процессе освоения дисциплины «Качество электроснабжения», студент развивает как профессиональные компетенции в области анализа качества электроснабжения и принятия технических решений, так и общекультурные, заключающиеся в работе со справочной литературой, компьютерной техникой и оформлении результатов лабораторных исследований.

В течение обучения, студент встречается преподавателей разных поколений, научных школ, подготовки, соответственно, имеющих разные представления о способах оформления результатов лабораторных исследований и расчетно-графических работ. В итоге, студенту прихо-

дится приспособливается к требованиям отдельных преподавателей, что не допустимо для технических специальностей.

В Национальном исследовательском Томском политехническом университете, содержание отчета по лабораторной работе студента регламентировано СТП ТПУ 2.3.05. – 2006 «Занятия лабораторные. Общие требования к организации и проведению». В общем виде, отчет по лабораторной работе должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- краткое теоретическое описание исследуемой проблемы;
- схему лабораторной установки и описание принципа ее действия;
- таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
- один пример расчета для каждого уникального вычисления;
- вывод по результатам лабораторных исследований;
- список используемой литературы.

При оформлении отчета, наибольшие затруднения, студент испытывает на предпоследнем этапе. Следует отметить, что порядок хода работы и ее цели, опубликованные под заголовком «вывод», выводом не является. Вывод резюмирует результат каждого проведенного эксперимента или расчета, достоверно отображая состояние объекта исследования. В отдельных случаях, вывод может быть представлен в форме рекомендаций для последующих действий, подтвержденных результатами экспериментов.

По возможности, вывод должен содержать лишь результаты, видные из проведенных экспериментов (расчетов). В этой связи, следует ограниченно использовать теоретические данные известные от других авторов, из общедоступной литературы, особенно если они имеют лишь косвенное отношение к проведенному исследованию.

Суть вывода, заключается в кратком представлении результатов работы, поэтому его объем должен быть минимально возможным для однозначного толкования полученных данных и создания представления о соответствии результатов работы поставленной цели.

Отдельно следует отметить, что нормативные документы регламентируют, не только структуру отчета по лабораторной работе студента, но и оформление его текстовой части.

Основными документами по оформлению текстовой части расчетно-графических работ любого инженера является «Единая конструкторская документация». В рамках НИ ТПУ этот набор документов упразднен и в правилах оформления лабораторных работ СТП ТПУ 2.3.05. – 2006 имеются указания о необходимости оформ-

ления текстовой части отчета с учетом требований СТО ТПУ 2.5.01 – 2006 «Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления».

Студенту рекомендовано использовать представленный стандарт для оформления текстовой части большинства исполняемых в ТПУ учебных работ включая лабораторные, что позволяет подготовиться к оформлению выпускной квалификационной работы.

Рассмотрим элементы оформления текстовой части работы, по СТО 2.5.01-2006, на которые следует обратить внимание.

Нумерация страниц на титульном листе не ставится, но титульный лист входит в общую нумерацию. Действующий образец титульного листа можно скопировать с сайта НИ ТПУ ([tpu.ru](http://tpu.ru)), в разделе «студенту», в подразделе «документы и шаблоны», там же имеются полнотекстовые версии обсуждаемых документов.

В работе используется сквозная нумерация таблиц и рисунков.

Формулы нумеруются только если на них имеются ссылки по тексту работы.

Выравнивание текста работы выполняется по ширине страницы.

В качестве основного шрифта используем Times New Roman, 14 pt, с полуторным или одиночным интервалом. При оформлении названий рисунков, таблиц, а так же их заполнения допускается использовать шрифт размером 12 pt.

Обратим внимание на оформление рисунков. Название рисунка выравнивается по центру страницы и располагается под рисунком. Название должно быть написано в следующем формате: слово «рисунок» с заглавной буквы, пробел, номер рисунка (без знака «№»), пробел, тире, пробел, название с заглавной буквы. Отметим, что точка после названия рисунка не ставится. Если рисунком является графическая зависимость, то у нее обязательно подписываются оси с помощью символа обозначающего физическую величину и единиц измерения.

Оформление таблиц во многом похоже на оформление рисунков. Название таблицы располагается над таблицей и выравнивается по левому краю. Формат названия таблиц следующий: слово «таблица» с заглавной буквы, пробел, номер таблицы (без знака «№»), пробел, тире, пробел, название с заглавной буквы. Точка после названия таблицы не ставится.

Названия разделов работы располагаются по центру страницы. Нумерация разделов сквозная. После последней цифры в номере раздела точка не ставится, как и после названия раздела. Допустимое

количество подразделов зависит от объема работы, предпочтение отдается простым структурам.

Использование курсивных и жирных шрифтов допускается для выделения особо важной информации, например заголовков и не допустимо в целях создания креативного вида работы.

В заключение, обратим внимание на черту присущую всем правилам оформления технической документации – это единообразие оформления типовых элементов работы. Это правило которое позволяет отличить качественно оформленную работу от черновика.

Использование единых правил оформления расчетно-графических работ, принятых в НИ ТПУ на уровне нормативных документов, значительно сокращает время проверки работы. Студент ТПУ, использующий описанные правила оформления работ может с уверенностью отстаивать свои права, ссылаясь на приведенные нормативные документы в конфликтных ситуациях. Описанные правила оформления согласуются с положениями единой конструкторской документации, что способствует интеграции студентов в сообщество инженеров еще на этапе обучения.

## Заключение

На рубеже второго десятилетия 21-го века можно с уверенностью говорить о перспективах дальнейшего развития индустриального общества с развитой электроэнергетикой. Из новейшей истории России самым зажиточным временем считается период с 60-х до 90-х годов прошлого века. Это период, когда система электроснабжения России в привычном для современного инженера виде уже была сформирована и дальнейшее развитие страны, подразумевало повышение качества электроснабжения объектов и жизни людей, которых не произошло. Следует сказать, что развитие электроэнергетики было затруднительно в условиях начавшийся в 1991 году перестройки. Отключение от системы электроснабжения СССР стран получивших политическую независимость требовало решительного реформирования и энергетики России. Только в 2010 году появились официальные заявления о завершение постперестроечных реформ и зарождение рыночных отношений в электроэнергетической отрасли. Это означает, что повышение качества электроснабжения не просто стало возможным, а необходимо для современного общества. Это обязанность, возложенная на инженеров электроэнергетиков в рамках обучения которых написано учебное пособие «Качество электроснабжения промышленных потребителей».

В представленном учебное пособие отражены основные направления развития качества электроснабжения. Прежде всего, это способы измерения показателей качества и обработки эмпирических данных. Уделено внимания планированию управления качеством электроснабжения. Приведены варианты индивидуальных заданий с примерами решения для самоподготовки студентов электроэнергетических специальностей.

Учебное пособие написано для изучения дисциплины «Качество электроснабжения» в рамках существующих образовательных программ. Основной составляющей обучения является самостоятельная работа студента, превышающая объем аудиторной нагрузки как минимум в три раза. В структуре аудиторной работы можно выделить избыточное количество лабораторных и практических занятий в сравнение с лекционными, что в свою очередь может быть воспринято как недостаток поклонниками классического образования.



## Список литературы

1. Куско А Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии // Куско А., Томпсон М., пер. с англ. Рабодзея А.Н. – М.: Додека-XXI, 2010. – 336 с.: ил.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 59 с.
3. ГОСТ Р 54149 – 2010. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартиформ, 2012. – 20 с.
4. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Муравлев А.И. Качество электрической энергии: Лабораторный практикум. - Томск: ТПУ, 2010. - 87 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1996 – 638 с.
6. Магазинник Л.Т., Егорова Н.Ю. Оценка величины дополнительных потерь мощности, обусловленных несимметрией токов // Конференция по энергетике и управлению переработкой отходов – Интернет ресурс: [http://econfr.rael.ru/pdf/2006/04/Magazinnik\\_2.pdf](http://econfr.rael.ru/pdf/2006/04/Magazinnik_2.pdf)
7. Волков Н.Г. Качество энергии в системах электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во томского политехнического университета, 2010. – 152 с.
8. Общий метод расчета доз фликера напряжения // Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева, Н.В. Цыганкова, Л.В. Черникова – Интернет ресурс: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2002/eltf/melnic/elbibl/ted/ted.htm>
9. Надежность систем электроснабжения. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клепель Ф., Адлер Г. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 192 с.
10. Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение». – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006.
11. Руководство по эксплуатации ЭРИС КЭ 06 – Интернет ресурс: <http://www.erisnpf.ru/Support.htm>
12. Руководство по эксплуатации Ресурс ПКЭ 1.5 – Интернет ресурс: <http://www.entp.ru/documentation/pke>

Учебное издание

ЛУКУТИН Борис Владимирович  
МУРАВЛЕВ Игорь Олегович  
МУРАВЛЕВ Алексей Игоревич

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Учебное пособие


Корректурa *С.Н. Карапотин*  
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 20.05.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 4,89. Уч.-изд. л. 4,42.  
Заказ 435-14. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)