

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Учебная программа дисциплины

Учебное пособие по курсовому проектированию

Учебное пособие по дипломному проектированию

Учебное пособие к практическим занятиям

Конспект лекций

- Методические указания по лабораторным работам
- Методические указания по самостоятельной работе
- Банк тестовых заданий в системе UniTest



УДК 621.311
ББК 32.29-5
А61

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Электроснабжение» подготовлен в рамках инновационной образовательной программы «Создание группового проектного обучения студентов СФУ, как одного из основных элементов инновационной образовательной программы в рамках приоритетного образовательного проекта «Образование» на базе учебно-научно-производственного комплекса», реализованной в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;

Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

А61 Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : метод. указания по лаб. работам / сост. А. С. Амузаде. – Электрон. дан. (1 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение : УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 1 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD* ; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1387-6 (комплекса)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802719 от 19.12.2008 г. (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Электроснабжение», включающего учебную программу, конспект лекций, учебное пособие по курсовому проектированию, учебное пособие по дипломному проектированию, учебное пособие к практическим занятиям, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Электроснабжение. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Электроснабжение. Презентационные материалы».

Приведены лабораторные работы по дисциплине «Электроснабжение».

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 140200.62 «Электроэнергетика» укрупненной группы 140000 «Энергетика».

© Сибирский федеральный университет, 2008

Рекомендовано к изданию

Инновационно-методическим управлением СФУ

Редактор Т. И. Тайгина

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения информационно-аналитического департамента СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 10.12.2008

Объем 1 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Описание лабораторной установки.....	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ	
УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ	
МОДЕЛИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ СЭПП	17
Краткие теоретические сведения.....	17
Подготовка к работе.....	19
Порядок выполнения работы.....	19
Требования к отчету	20
Контрольные вопросы.....	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ	
НАГРУЗКИ.....	21
Краткие теоретические сведения.....	21
Подготовка к работе.....	23
Порядок выполнения работы.....	23
Требования к отчету	24
Контрольные вопросы.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ	
ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА	
ТРАНСФОРМАТОРОВ ЦЕХОВОЙ ТП	25
Краткие теоретические сведения.....	25
Подготовка к работе.....	26
Порядок выполнения работы.....	26
Требования к отчету	27
Контрольные вопросы.....	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И	
РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В	
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ	28
Краткие теоретические сведения.....	28
Подготовка к работе.....	30
Порядок выполнения работы.....	30
Требования к отчету	31
Контрольные вопросы.....	31

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХ ПО ЭЛЕКТРОПИТАНИЮ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ	32
Краткие теоретические сведения.....	32
Подготовка к работе.....	33
Порядок выполнения работы.....	33
Требования к отчету	33
Контрольные вопросы.....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	34
Краткие теоретические сведения.....	34
Подготовка к работе.....	39
Порядок выполнения работы.....	39
Требования к отчету	41
Контрольные вопросы.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ	42
Краткие теоретические сведения.....	42
Подготовка к работе.....	45
Порядок выполнения работы.....	45
Требования к отчету	46
Контрольные вопросы.....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по курсу «Электроснабжение» включает 7 лабораторных работ ([табл. В1](#)). В лаборатории находятся две идентичных лабораторных установки, каждая из которых представляет собой физическую модель типовой системы электроснабжения. В лаборатории могут одновременно работать две бригады студентов. Все лабораторные работы каждая бригада выполняет на одной, закрепленной на весь цикл работ лабораторной установке. Лабораторный практикум предполагает комплексное изучение режимов работы типовой системы электроснабжения. При этом результаты предшествующих работ используются при проведении последующих.

На каждой лабораторной установке моделируется суточный цикл функционирования системы электроснабжения. Между собой установки отличаются параметрами режимов (графиками нагрузок), что обеспечивает самостоятельность работы каждой бригады студентов и разнообразие результатов.

В качестве универсального регистратора состояния лабораторной установки применяются компьютер под управлением Windows и программа верхнего уровня лабораторной установки SCADASES. Все измерительные приборы на лицевой панели дублируются виртуальными в программе, и в процессе работы установки их показания автоматически записываются в файл на диске компьютера.

Цели лабораторных работ:

- 1) изучить конструкцию лабораторной установки, принцип ее работы и параметры моделируемых элементов СЭПП;
- 2) исследовать режим работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени и определить параметры режимов;
- 3) исследовать процесс нагрева электрического кабеля и трансформатора при изменяющейся нагрузке и определить их расчетные нагрузки;
- 4) изучить методы расчета и способы реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов;
- 5) изучить методики оценки уровней напряжения в сети и способы их улучшения на суточном интервале времени;
- 6) исследовать провалы напряжения в промышленных электросетях, являющихся помехами по электропитанию для цифровых технических средств;
- 7) изучить основные принципы компенсации реактивных нагрузок (КРН) в промышленных электрических сетях (ПЭС);
- 8) изучить методики исследования высших гармоник тока и напряжения в промышленных электросетях и работу фильтрокомпенсирующего устройства.

Перечень лабораторных работ

Модуль дисциплины	Самостоятельная работа: задания по лабораторным работам, трудоемкость (объем в часах)	Наименование лабораторных работ, трудоемкость (объем в часах)
1	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 1, 2 ЗЕ – 0,138 (5 часов)	Лабораторная работа № 1. Изучение конструкции установки и исследование режимов работы моделируемой системы СЭПП (4 часа)
		Лабораторная работа № 2. Исследование и определение расчетной электрической нагрузки (2 часа)
2	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 3, 4, 5 ЗЕ – 0,138 (5 часов)	Лабораторная работа № 3. Исследование экономически целесообразного режима трансформаторов цеховой ТП (2 часа)
		Лабораторная работа № 4. Исследование и регулирование уровней напряжения в промышленных электросетях (2 часа)
		Лабораторная работа № 5. Исследование помех по питанию в промышленных электросетях (2 часа)
3	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 6, 7 ЗЕ – 0,138 (5 часов)	Лабораторная работа № 6. Компенсация реактивных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий (2 часа)
		Лабораторная работа № 7. Исследование и компенсация высших гармоник тока и напряжения в распределительных электросетях (3 часа)
Общий объем	0,42 ЗЕ (15 часов)	0,47 ЗЕ (17 часов)

В результате изучения лабораторного практикума студент должен [\[8\]:](#)
знать:

1) режимы работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени и определение параметров режимов;

2) метод расчета и способ реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов;

3) методику оценки уровней напряжения в сети и способ их улучшения на суточном интервале времени;

4) основные принципы компенсации реактивных нагрузок в промышленных электрических сетях;

5) методику исследования высших гармоник тока и напряжения в промышленных электросетях.

уметь:

1) определять параметры режимов работы моделируемой СЭПП;

2) исследовать процессы нагрева электрического кабеля и трансформатора при изменяющейся нагрузке;

3) исследовать высшие гармоники тока и напряжения в промышленных электросетях;

4) рассчитывать общую мощность компенсирующих устройств для потребителя;

5) оценивать влияние компенсации реактивных нагрузок на режим напряжения и рассчитывать экономический эффект.

В результате изучения дисциплины «Электроснабжение» студенты должны приобрести следующие компетенции:

инструментальные (ИК):

способность самостоятельно работать на компьютере (базовые навыки, ИК-1);

способность пользоваться Интернетом, электронной почтой и другими средствами оперативного обмена информацией, воспринимать и анализировать информацию (ИК-2);

способность самостоятельно работать с современными измерительными приборами (ИК-3);

способность применять современные методы исследования и испытаний электрооборудования (ИК-4);

готовность использовать основные компьютерные технологии в сфере своей профессиональной деятельности (ИК-6);

способность понимать и использовать идеи и мысли (когнитивные способности) (ИК-10);

общенаучные (ОНК):

способность использовать основные понятия и методы математического анализа, аналитической геометрии, линейной алгебры, дифференциального и интегрального исчисления, векторного анализа и элементов теории поля, гармонического анализа, теории вероятностей, физики, информатики, теоретических основ электротехники (ОНК-2);

готовность применять методы дифференциального и интегрального исчисления, теории вероятности, математической статистики, функций комплексных переменных и численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений (ОНК-3);

готовность использовать основные законы механики, термодинамики, электротехники, теплотехники, оптики, ядерной физики и теории колебаний (ОНК-4);

способность самостоятельно использовать средства компьютерной техники и основные компьютерные технологии в сфере своей профессиональной деятельности (ОНК-7);

готовность к выполнению простых операций по алгоритмизации и программированию компьютерных средств с использованием основных языков программирования (ОНК-8);

профессиональные (ПК):

проектно-конструкторская деятельность:

готовность разрабатывать проекты электротехнических систем и отдельных их компонентов (ПК-1);

способность разрабатывать простые конструкции электротехнических объектов (ПК-2);

готовность использовать информационные технологии в своей предметной области (ПК-3);

способность использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного тока (ПК-4);

готовность применять способы графического отображения геометрических образов изделий и объектов электрооборудования, схем и систем (ПК-5);

готовность обосновать принятие конкретного технического решения при создании электротехнического оборудования (ПК-7);

способность рассчитывать режимы работы электроэнергетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов (ПК-9);

производственно-технологическая деятельность:

способность применять современные информационные технологии, управлять информацией с помощью прикладных программ деловой сферы деятельности; использовать сетевые компьютерные технологии и базы данных, пакеты прикладных программ в своей предметной области (ПК-12);

способность использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации электроэнергетических и электротехнических

объектов, элементы экономического анализа в практической деятельности (ПК-13);

готовность определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса по заданной методике (ПК-16);

организационно-управленческая деятельность:

способность анализировать технологический процесс как объект управления (ПК-21);

способность к дальнейшему обучению на втором уровне высшего профессионального образования, получению знаний в рамках одного из конкретных профилей, в области научных исследований и педагогической деятельности (ПК-26)

готовность обеспечивать соблюдение заданных параметров технологического процесса и качество вырабатываемой продукции (ПК-30);

научно-исследовательская деятельность:

способность применять современные методы исследования объектов и систем электротехники (ПК-31);

готовность изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования (ПК-32);

готовность понимать существо задач анализа и синтеза объектов в технической среде (ПК-34);

способность формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде научно-технического отчета с его публикацией и публичной защитой (ПК-35);

способность применять современные методы исследования и испытаний электрооборудования и объектов электротехники (ПК-36);

способность выполнять экспериментальные исследования по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов (ПК-37);

сервисно-эксплуатационная деятельность:

способность к проверке технического состояния и остаточного ресурса оборудования и организации профилактических осмотров и текущего ремонта (ПК-41);

готовность к приемке и освоению вводимого оборудования (ПК-42).

Самостоятельная подготовка к выполнению и защите лабораторных работ состоит в изучении методических указаний по лабораторным работам [5, 10, 11] и оформлении отчета после выполнения работы.

В [табл. В2](#) приведен график выполнения лабораторных работ.

График выполнения лабораторных работ

Наименование модуля, срок его реализации	Перечень тем лекционного курса, входящих в модуль	Перечень лабораторных занятий, входящих в модуль	Перечень самостоятельных видов работ, входящих в модуль, их конкретное наполнение	Формируемые компетенции
Модуль 1. Выбор схем электроснабжения 1–6-я недели	Разделы: 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7	Лабораторные работы № 1, 2	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 1,2	ИК-1, 2, 3, 4, 6, 10 ОНК-2, 3, 4, 7, 8 ПК-1, 2, 3, 4, 7, 9
Модуль 2. Выбор и расчет элементов систем электроснабжения 7–12-я недели	Разделы: 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6	Лабораторные работы № 3, 4, 5	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 3, 4, 5	ИК-1, 2, 3, 4, 6, 10 ОНК-2, 3, 4, 7, 8 ПК-1, 2, 3, 4, 7, 9, 21, 26, 30
Модуль 3. Оптимизация режимов и основы проектирования систем электроснабжения 13–17-я недели	Разделы: 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7	Лабораторные работы № 6, 7	Подготовка к выполнению и защите лаб. работ № 6, 7	ИК-1, 2, 3, 4, 6, 10 ОНК-2, 3, 4, 7, 8 ПК-1, 2, 3, 4, 7, 9, 21, 26, 30, 31, 32, 34-37, 41, 42

Оформление отчета по каждой лабораторной работе осуществляется бригадой студентов в соответствии со следующими требованиями [7]:

- 1) поля страниц должны быть: левое – 22 мм; правое – 22 мм; верхнее – 30 мм, включая номер страницы; нижнее – 20 мм;
- 2) шрифт текста – Times New Roman кегль 14, через 1 интервал;
- 3) абзацный отступ – 1,25 см;
- 4) заголовки и подзаголовки отделяют от основного текста двумя междустрочными интервалами сверху и снизу;
- 5) названия параграфов - кегль 14 заглавный жирный, для подпараграфов – кегль 14 строчный жирный;
- 6) в формулах латинские символы и индексы набирают *курсивом* (кроме

обозначений тригонометрических функций, постоянных const, Re и общепринятых латинских сокращений min, max и т. д.);

7) в формулах римские и арабские цифры, буквы греческого и русского алфавитов набирают прямым шрифтом;

8) формулы набирают в редакторе формул, отбивают двумя междустрочными интервалами сверху и снизу, располагают по центру страницы. Нумеровать следует только те формулы, на которые приводятся ссылки. Нумерация формул может быть сквозной однозначной или включать номер главы, параграфа, подпараграфа;

9) слово «таблица» пишут кеглем 12 в правой стороне страницы. Таблица может иметь название, которое располагают ниже. Название таблиц центрируют и набирают кеглем 12. Таблицы нумеруют, если их несколько;

10) рисунок располагают по центру страницы;

Не допускается включать в текст сканированные формулы, таблицы, рисунки.

Описание лабораторной установки

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

Мнемосхема установки, приведенная на ее лицевой панели, имеет следующие элементы типовой СЭПП ([рис. В1](#)):

- главную понизительную подстанцию (ГПП) 110/10 кВ, состоящую из трансформаторов Т1, Т2 номинальной мощностью по 10000 кВА и распределительного устройства (РУ) 10 кВ. Есть возможность ручного или автоматического по времени суток переключения анцапф РПН трансформатора Т2;
- цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ с трансформаторами Т3 и Т4 номинальной мощностью по 1000 кВА. Трансформатор Т4 оснащен устройством переключения отпаяк без возбуждения (ПБВ);
- синхронный двигатель СДН-10-1250, имеющий ручную регулировку возбуждения;
- батареи силовых конденсаторов на номинальное напряжение 10,5 кВ (БК1 и БК2) и на напряжение 0,4 кВ (БК3 и БК4). Имеется возможность ручного или автоматического по времени суток включения и отключения батареи. Мощность батарей задается тумблерами, расположенными под их мнемосимволами на схеме;

- силовой пункт (СП) в цеховой сети 380/220 В, к которому подключена нелинейная нагрузка S3, вызывающая появление на шинах СП высших гармоник напряжения;
- фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ), предназначенное для уменьшения уровня высших гармоник напряжения на шинах СП.

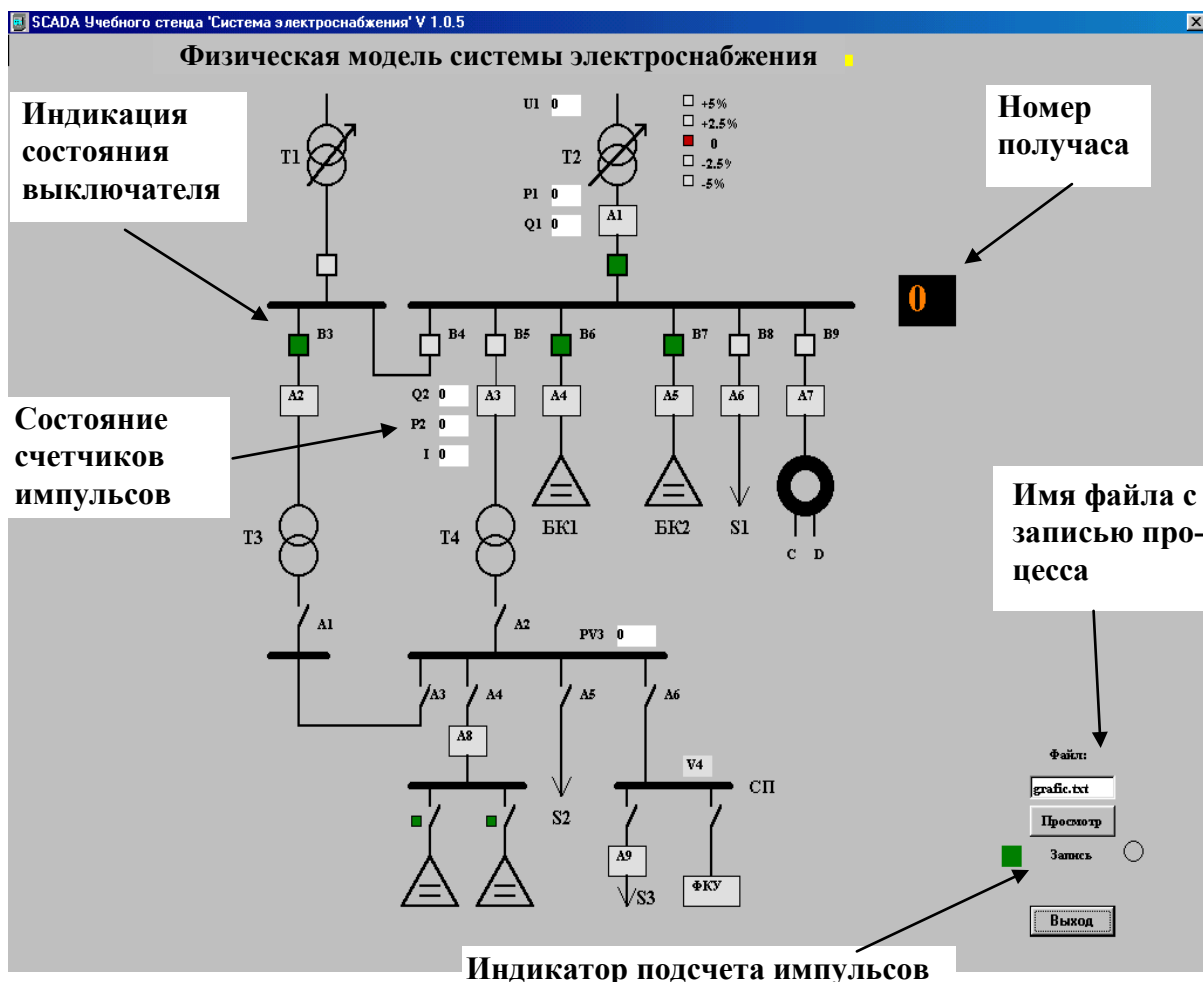


Рис. В1

- На мнемосхеме размещены следующие измерительные приборы:
- V1 – киловольтметр для измерения напряжения с высокой стороны трансформатора ГПП T2 (на линии раздела балансовой принадлежности сетей);
 - V2 – киловольтметр для контроля напряжения на шинах РУ 10 кВ;
 - V3 – вольтметр для контроля напряжения на шинах РУ 380/220 В цеховой ТП;
 - V4 – вольтметр для контроля напряжения на шинах 220 В СП;
 - A1–A9 – виртуальные амперметры, служащие для контроля токов в моделируемой сети. Параметры моделируемых элементов приведены в [табл. В3](#).

Параметры элементов системы электроснабжения,
моделируемой на лабораторной установке

Обозначение на мнемосхеме (рис. В1)	Тип	Номинальное напряжение	Параметры
T1, T2	ТДН-10000/110	115/11	$S_n = 10000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 27$ кВт, $\Delta P_{кз} = 74$ кВт, $U_k = 10,5$ %, $I_{xx} = 0,9$ %. Ступени РПН: +5 %, +2,5 %, 0, -2,5 %, -5 %
T3, T4	ТМЗ-1000/10	10/0,4	$S_n = 1000$ кВА, $\Delta P_{xx} = 2,4$ кВт, $\Delta P_{кз} = 12,2$ кВт, $U_k = 5,5$ %, $I_{xx} = 2$ %; $T_0 = 1,5$ ч, $V_\mu = 55^\circ\text{C}$. Ступени ПБВ: +5 %, +2,5 %, 0, -2,5 %, -5 %
БК1, БК2		10,5	$Q_n = 4 \cdot 287,5 = 1150$ квар (каждая батарея имеет 4 ступени по 287,5 квар)
БК3, БК4	УКЛ-0,38	0,4	$Q_n = 3 \cdot 105 = 315$ квар
Кабель питающий Т4	АСБ-10 (3*50)	10,5	$I_{дд} = 140$ А; $R_0 = 0,62$ Ом/км; $X_0 = 0,04$ Ом/км; $l = 1$ км; $T_0 = 15$ мин; $V_{дд} = 45^\circ\text{C}$
СД	СДН-10-1250	10	$P_n = 1250$ кВт; $\cos \varphi_n = 0,9$; $K_z = 0,8$; $Q_n = 5 \cdot 140 = 700$ квар
ФКУ		0,4	Фильтр 3-й гармоники

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

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

В моделируемой сети 0,4/0,23 кВ представлен на мнемосхеме один из силовых пунктов с нелинейной нагрузкой (однофазный выпрямитель), которая искажает кривую напряжения. Для компенсации гармоник установлено фильтрокомпенсирующее устройство, которое подключают тумблером, рас-

положенным на лицевой панели. На лицевую панель выведены клеммы для измерения напряжения на шинах СП, а также токов в нелинейной нагрузке и ФКУ.

Все органы управления установкой расположены на лицевой панели. В нижнем правом углу панели установлен автомат включения питания. У изображения коммутационных аппаратов находятся кнопки включения (черная кнопка) и отключения (красная кнопка) этих аппаратов. Сигнальные лампы показывают положение коммутационного аппарата. Измерительные приборы, размещенные на лицевой панели, служат для измерения токов в линиях и напряжений на шинах 10,5 и 0,4 кВ. Активная и реактивная энергия в цепях Т2 и Т4 измеряется индукционными счетчиками, установленными внутри стенда. Счетчики снабжены датчиками числа оборотов их дисков. Рядом с мнемосимволом трансформатора Т2 расположены кнопки переключения анцапф трансформатора и сигнальные лампы.

Тумблеры «Мощность БК» и переключатель «Реактивная мощность СД» предназначены для задания величины генерируемой реактивной мощности конденсаторных батарей и синхронного двигателя соответственно (мощность указана в кВАрах). Переключателем «Отпайка Т4» устанавливают отпайку трансформатора Т4. В центральной части лицевой панели расположены органы управления режимами работы всей установки: кнопка «Пуск» – для запуска установки в исходное положение; кнопка «Сброс» – для возврата установки в исходное положение; кнопка «Остановка» – фиксирование какого-либо режима установки; цифровое табло – для контроля модельного времени суток. Коммутационное поле, расположенное в правом верхнем углу, предназначено для задания автоматического режима работы элементов схемы. В лабораторной установке возможно автоматическое по времени суток переключение анцапф трансформатора Т2, а также включение и отключение трансформатора Т3 и конденсаторных батарей БК1, БК2, БК3, БК4.

Лабораторная установка имеет два режима работы. Стенд имеет два основных режима:

1) режим «Программирование/Ручное» (в дальнейшем «Программирование») состояния выключателей и РПН трансформаторов 110/10 кВ Т1, Т2 с использованием кнопочных выключателей на лицевой панели установки для каждого получаса их состояния дублируется в программе;

2) режим «Работа/Автоматическое» (в дальнейшем режим «Работа»), в котором установка автоматически воспроизводит записанную ранее программу режима «Программирование».

Включение режима «Работа» осуществляется тумблерами рядом с индикатором номера получаса в положениях «Работа» и «Автоматическое». Пуск режима «Работа» осуществляется кнопками «Пуск» (запуск в автоматическом режиме), «Останов» (остановка воспроизведения программы), «Сброс» (сбрасывает счетчик получасов). При нажатии кнопки «Пуск» вклю-

чается процесс моделирования нагрузок суточного цикла. Загорается цифра 01 на цифровом табло, и происходит подача питания на моделируемую схему, которая до этого была обесточена.

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

По окончании суточного цикла установка автоматически возвращается в исходный режим. При необходимости установку можно вернуть в исходный режим принудительным нажатием кнопки «Сброс». Кнопкой «Останов» останавливают программу моделирования суточного цикла. В этом режиме задают начальные условия (включение и отключение соответствующих элементов системы); устанавливают программу работы по времени суток устройства РПН трансформатора Т2, трансформатора Т3 и конденсаторных батарей БК1, БК2, БК3, БК4 (на коммутационном поле). Подключают и настраивают необходимые измерительные приборы, а также проверяют готовность установки к «прогону» суточного цикла.

Включение режима «Программирование/Ручное» осуществляется тумблерами рядом с индикатором номера получаса в положениях «Программирование» и «Ручное». Переход к следующему полчаса с записью текущего состояния установки происходит при нажатии кнопки «Программирование».

Масштабы всех величин приведены в [табл. В4](#).

Таблица В4

Масштабы модели

Наименование		Обозначение	Единица измерения	Числовые значения
Масштабы модели		μ_t	$\frac{C_{\text{модели}}}{C_{\text{действ}}}$	120
Масштабы счетчиков электроэнергии	Wh1	$\mu_{\text{аз}}$	$\frac{\text{кВт} \times \text{ч}}{\text{импульс}}$	250
	Warh1	$\mu_{\text{рз}}$	$\frac{\text{квар} \times \text{ч}}{\text{импульс}}$	
	Wh2	$\mu_{\text{аз}}$	$\frac{\text{кВт} \times \text{ч}}{\text{импульс}}$	35 (70)
	Warh1	$\mu_{\text{рз}}$	$\frac{\text{квар} \times \text{ч}}{\text{импульс}}$	

Окончание табл. В4

Наименование		Обозначение	Единица измерения	Числовые значения
Масштабы измерительных трансформаторов напряжения (ТН) и тока (ТТ)	ТН1	μ_u	$\frac{V_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	100
	ТН2	μ_u	$\frac{V_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	10
	ТН3	μ_u	$\frac{V_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	10
	ТТ1	μ_i	$\frac{A_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	100
	ТТ2	μ_i	$\frac{A_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	10
	ТТ3	μ_i	$\frac{A_{\text{действ}}}{\text{импульс}}$	10
Масштаб блока определения температуры перегрева кабеля (рис. В2)	БОТ	μ_v	$\frac{^{\circ}\text{C}}{V_{\text{модели}}}$	1

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

Для проведения необходимых измерений при выполнении лабораторных работ имеется панель гнезд «Измерительная аппаратура» (ИА). Гнезда расположены на лицевой панели установки.

Схема подключения самопишущего прибора для определения температуры перегрева кабеля с БОТ показана на [рис. В2](#).

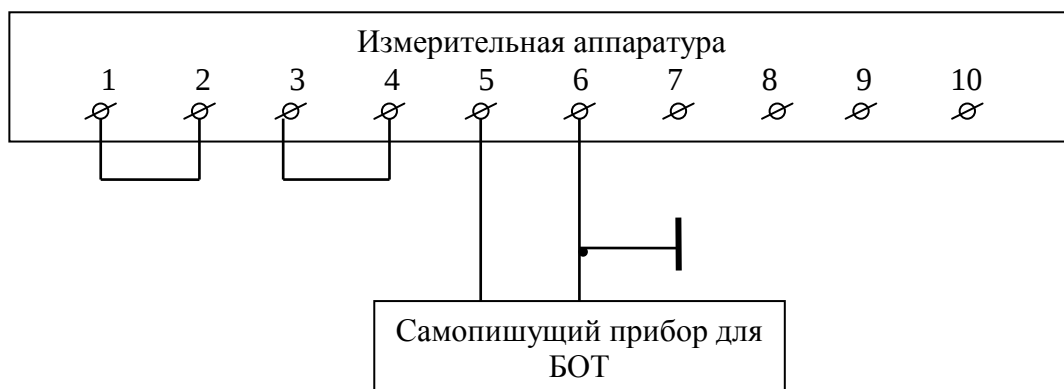


Рис. В2

При выполнении ряда измерений используют дополнительную аппаратуру (осциллограф, самопишущий прибор).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОДЕЛИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ СЭПП

Цели работы – изучение конструкции лабораторной установки, принципа ее работы и параметров моделируемых элементов СЭПП; исследование режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени и определение параметров режимов.

Краткие теоретические сведения

Основные номинальные параметры моделируемых элементов СЭПП приведены в [табл. В3](#). Для трехфазных силовых трансформаторов в практических расчетах используют следующие параметры при замещении трансформатора Г-образной однолинейной эквивалентной схемой ([рис. 1.1](#)):

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

I_1, I_2 – токи первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$\dot{I}_{xx} = I_a + jI_p$ – ток холостого хода трансформатора;

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

$r_a = \frac{3U_1^2}{Q_{xx}}$ – активная составляющая сопротивления ветви намагничивания;

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

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

$\Delta \dot{S} = 3I_{2H}^2 R - j3I_{кз}^2 X = \Delta P K_{кз}^2 - j\Delta Q K^2$ – нагрузочные потери в трансформаторе ($K_3 = \frac{I_2}{I_H}$ – коэффициент загрузки), кВт;

$\Delta \dot{U} = I_2 R + jI_2 X$ – потери напряжения в трансформаторе, В.

Основная особенность режимов работы СЭПП на длительных циклах времени (сутки, неделя, год) – их изменчивость, что обусловлено изменчивостью электрических нагрузок. Режимы СЭПП характеризуются параметрами двух типов: текущие и интегральные за время T . К текущим параметрам от-

носятся значения токов, напряжений, мощностей в узлах сети, изменяющиеся во времени. К интегральным за время T – средние значения токов, напряжений, мощностей, их дисперсии, потери электроэнергии и др.

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

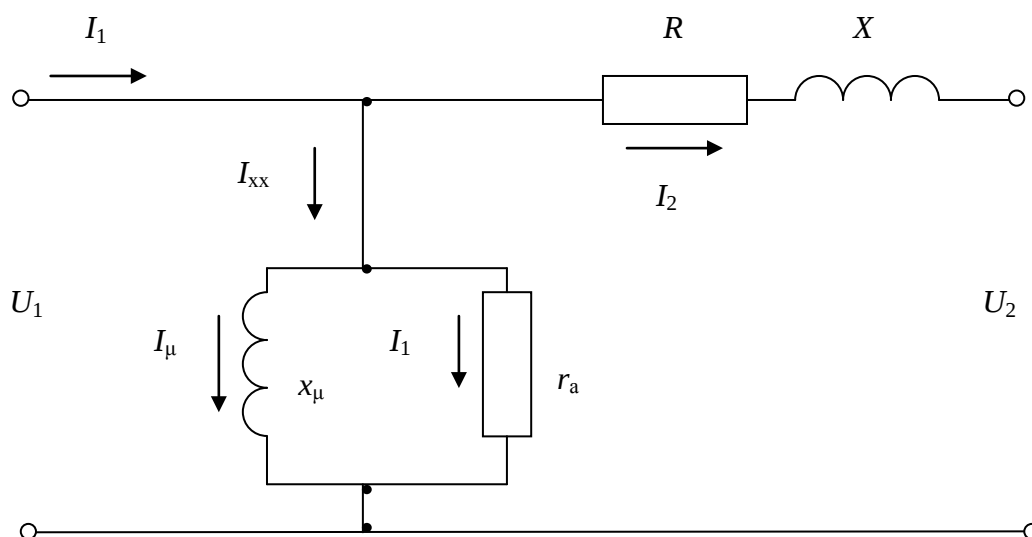


Рис. 1.1

Интегральные параметры, например для графика тока:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i; \quad (1.1)$$

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

где n – число интервалов θ в суточном графике тока; $I_{\text{э}}$ – среднеквадратическое значение графика тока.

Потери электроэнергии в линии с сопротивлением R за время T :

$$\Delta W = 3I_{\text{cp}}^2 RT + 3\sigma_I^2 RT = \theta \sum_{i=1}^n 3I_i^2 R. \quad (1.2)$$

Потери электроэнергии в трансформаторе за время T :

$$\Delta W = \Delta P_{\text{xx}} T + \left(\frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}} T + \frac{\sigma_I^2}{I_{\text{н}}^2} \Delta P_{\text{кз}} T = \Delta P_{\text{xx}} T + \theta \sum_1^n \left(\frac{I_i}{I_{\text{н}}} \right)^2 \Delta P_{\text{кз}}. \quad (1.3)$$

Подготовка к работе

При самостоятельной подготовке к лабораторной работе необходимо изучить теоретический материал курса ЭСПП по разделу «Режимы электропотребления промышленных предприятий».

Порядок выполнения работы

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

2. Подготовиться к регистрации графиков активных и реактивных нагрузок, заготовить [табл. 1.1](#) в двух экземплярах (для трансформаторов Т2 и Т4).

3. Включить компьютер и запустить на нем программу SCADASES; подготовить установку для регистрации текущих параметров режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени; включить трансформатор Т4, обобщенную нагрузку S_1 на шинах 10,5 кВ ГПП, синхронный двигатель; отключить трансформатор Т3, конденсаторные батареи БК1, БК2 и БК3, БК4, а также силовой фильтр ФКУ; установить РПН трансформатора Т2 и ПБВ трансформатора Т4 в нулевое положение.

4. Выставить тумблеры установки в положения «Программирование» и «Ручное», нажать кнопку «Сброс» для обнуления счетчика получасов; запрограммировать установку на 48 получасах путем нажатия на кнопку «Программирование» до появления на индикаторе получасов цифры 49.

5. Выставить тумблеры в положения «Работа» и «Автоматическое», нажать кнопку «Сброс» для обнуления счетчика получасов; запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков активной и реактивной мощностей нагрузок трансформаторов Т2 и Т4, тока трансформатора Т4 путем считывания из файла записи на компьютере и записи в [табл. 1.1](#) (графы 2, 4 и 10) показаний соответствующих счетчиков.

6. Рассчитать графики активной, реактивной и полной мощностей путем умножения разности показаний счетчиков на соответствующий масштабный коэффициент ([табл. В3](#)). Вычислить средние значения и среднеквадратические отклонения графиков нагрузки по [формуле \(1.1\)](#).

7. Рассчитать потери электроэнергии за сутки в трансформаторах Т2, Т4 и в кабельной линии (в киловатт-часах и в процентах) по [формулам \(1.2\)](#) и [\(1.3\)](#). В величине потерь выделить составляющую, обусловленную неравномерностью графиков нагрузок.

Таблица 1.1

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

Номер получаса суток	Показания счетчика				Графики нагрузок				
	активного		реактивного		Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВар	Полная мощность, кВА	tg φ	Ток, А
	пока- зания	раз- ность	пока- зания	раз- ность					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0									
1									
2									
·									
·									
48									
Среднее значение									
Среднеквадратическое отклонение									

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) мнемосхему установки, краткое описание и параметры моделируемых элементов типовой СЭП11, цель работы;
- 2) расчет сопротивлений эквивалентной схемы трансформаторов Т2 и Т4;
- 3) результаты регистрации и расчета графиков нагрузки и их параметров для трансформаторов Т2 и Т4 ([табл. 1.1](#));
- 4) графики нагрузок Т2 и Т4 (активной, реактивной, полной мощности и тока);
- 5) расчет потерь электроэнергии в трансформаторах Т2, Т4 и в кабельной линии, питающей трансформатор Т4;
- 6) оценку (в процентах к полным потерям) потерь в указанных элементах схемы, обусловленных реактивными нагрузками;
- 7) выводы по полученным результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины изменчивости параметров режимов работы СЭПП во времени?
2. Какие потери имеются в трансформаторах и от чего они зависят?
3. Как определяют потери электроэнергии в промышленных электросетях?
4. Неравномерность режимов электропотребления осложняет и ухудшает работу электроэнергетических систем. Почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Цель работы – исследование процесса нагрева электрического кабеля и трансформатора Т4 при изменяющейся нагрузке и определение их расчетных нагрузок.

Краткие теоретические сведения

Процесс нагрева трехжильного кабеля током I описывается дифференциальным уравнением теплового баланса:

$$3I^2 R_0 dt = cdv + Avdt, \quad (2.1)$$

где R_0 – удельное сопротивление жилы кабеля, Ом/км; c – теплоемкость 1 км кабеля, Вт·с /°С·км; v – температура перегрева кабеля относительно окружающей среды, °С; A – коэффициент теплоотдачи, Вт /°С·км; t – время, с.

[Уравнение \(2.1\)](#) можно преобразовать к более удобному для решения виду:

$$\frac{c}{A} \frac{dv}{dt} + v = \frac{3I^2 R_0}{A}$$

или

$$T_0 \frac{dv}{dt} + v = v_y, \quad (2.2)$$

где $T_0 = \frac{c}{A}$ – постоянная времени нагрева кабеля, °С; $v_y = \frac{3I^2 R_0}{A}$ – установившаяся температура перегрева кабеля при токе I .

Решением [уравнения \(2.2\)](#) является:

$$v(t) = v_y - (v_y - v_0) e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (2.3)$$

где v_0 – начальная температура перегрева кабеля.

Для графика тока, показанного на [рис. 2.1](#), зависимость $v(t)$ можно найти следующим образом:

при $t < 0$, $I(t) = 0$, $v(t) = 0$.

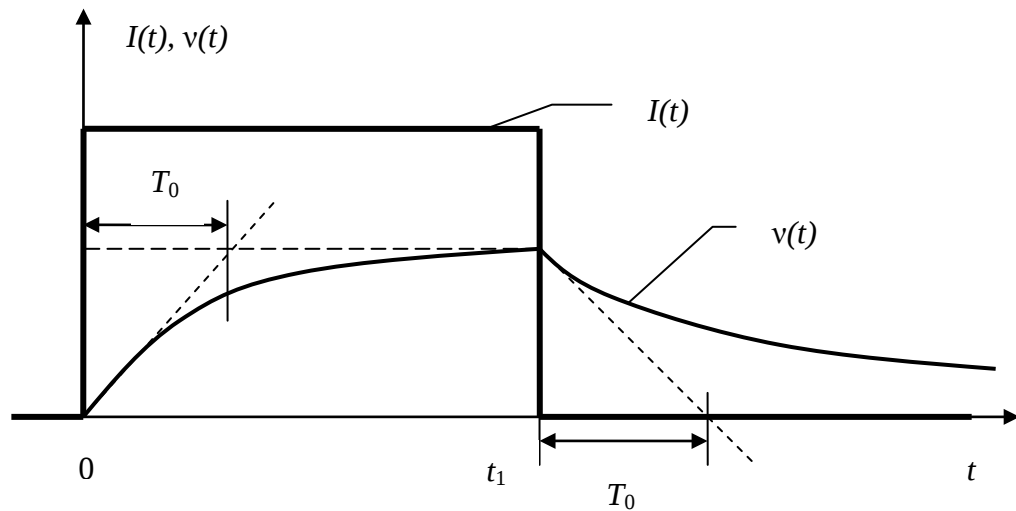


Рис. 2.1

В момент времени $t = 0$ включается ток и начинается нагрев кабеля, процесс изменения которого описывается [экспонентой \(2.3\)](#) при $v_0' = 0$ и $v_y' = \frac{3I^2 R_0}{A}$:

$$v'(t) = v_y' \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right). \quad (2.4)$$

В момент времени $t = t_1$ ток выключается и кабель остывает в соответствии [с \(2.3\)](#), но при $v_y'' = 0$ и $v_0'' = v_m'$:

$$v''(t) = v_{0y}'' e^{-\frac{t}{T_0}} = v_y' e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (2.5)$$

Таким образом, процесс перегрева является инерционным по отношению к процессу изменения нагрузки, что обуславливает некоторую сложность в определении расчетной нагрузки при изменяющемся $I(t)$ [[1, 4, 9](#)].

Если представить, что каким-либо образом получен график $v(t)$ для заданного $I(t)$, то расчетную нагрузку достаточно просто определить из выражения:

$$I_{\delta} = \sqrt{\frac{v_{\max} A}{3R_0}}. \quad (2.6)$$

В данной работе график зависимости $v(t)$ находят экспериментально с помощью датчика температуры перегрева кабеля. Запись графика $v(t)$ на суточном интервале времени производится самопишущим прибором.

Подготовка к работе

При самостоятельной подготовке к работе необходимо:
 повторить теоретический материал по вопросам расчетных электрических нагрузок [1, 4, 9];
 подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку к работе: включить питание и трансформатор Т4, отключить Т3, отключить БКЗ, подключить к выходу датчика температуры перегрева кабеля самопишущий прибор ([рис. В2](#)).
2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графика $v(t)$ с помощью самопишущего прибора.
3. Построить на одном рисунке график тока кабеля, питающего трансформатор Т4 (по регистрограмме тока, записанной в [лабораторной работе № 1](#)), и график перегрева кабеля $v(t)$.
4. По графику $v(t)$ найти $v_{\max} = \max\{v(t)\}$ и определить по [выражению \(2.6\)](#) расчетный ток I_p . Нанести величину I_p на графики $I(t)$ и $v(t)$. Проанализировать результаты и сделать выводы.
5. Для участка графика $I(t)$, заданного преподавателем, рассчитать в соответствии с [выражением \(2.3\)](#) график $v(t)$ для трансформатора Т4 и оценить его расчетную нагрузку по [формуле \(2.6\)](#). Для расчета использовать осредненный на последовательных часовых интервалах времени график $I(t)$, построенный в лабораторной работе № 1 (графа 10, [табл. 1.1](#)).

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) задачи лабораторного исследования;
- 2) графики $I(t)$ и $v(t)$ для кабеля, вычерченные на одном рисунке;
- 3) расчет $v(t)$ для заданного участка графика;
- 4) величину расчетной электрической нагрузки;
- 5) выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое расчетная электрическая нагрузка?
2. Что такое длительно допустимая нагрузка кабеля?
3. Чем определяется величина перегрева кабеля и трансформатора при изменяющемся токе нагрузки $I(t)$?
4. Какими факторами определяется величина максимального перегрева $v_{\max} = \max \{v(t)\}$ при $I = f(t)$?
5. Чем ограничивается максимально допустимый перегрев кабеля и трансформатора?
6. Что такое принцип максимума средней нагрузки?
7. В чем состоит сущность вероятностной модели расчетной нагрузки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО РЕЖИМА ТРАНСФОРМАТОРОВ ЦЕХОВОЙ ТП

Цель работы – изучить метод расчета и способ реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов.

Краткие теоретические сведения

Для двухтрансформаторной подстанции с одинаково загруженными трансформаторами при неизменном напряжении и при переменной нагрузке потери мощности изменяются во времени:

$$\Delta P(t) = 2\Delta P_{xx} + 2\Delta P_{кз} K_3(t)^2, \quad (3.1)$$

где $K_3(t) = \frac{S(t)}{2S_{нт}}$ – коэффициент загрузки трансформаторов; ΔP_{xx} – активные потери холостого хода трансформатора; $\Delta P_{кз}$ – активные потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке (потери короткого замыкания); $S_{нт}$ – номинальная мощность трансформатора; $S(t)$ – нагрузка двухтрансформаторной подстанции.

При работе одного трансформатора потери мощности для нагрузки $S(t)$:

$$\Delta P(t) = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} K_3(t)^2, \quad (3.2)$$

где $K_3(t) = \frac{S(t)}{S_{нт}}$.

Зависимости (3.1) и (3.2) потерь мощности от нагрузки показаны на рис. 3.1. Пересечение кривых 1 и 2 соответствует нагрузке, для которой потери мощности в двух трансформаторах равны потерям при работе одного трансформатора. Таким образом, при $S(t) < S_A$ целесообразно один трансформатор отключать.

Величину S_A можно вычислить, приравняв правые части выражений (3.1) и (3.2):

$$2\Delta P_{xx} + 2\Delta P_{кз} \left(\frac{S_A}{2S_{HT}} \right)^2 = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \left(\frac{S_A}{S_{HT}} \right)^2. \quad (3.3)$$

Опуская промежуточные преобразования, получим

$$S_A = S_{HT} \sqrt{\frac{2\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}} S_A. \quad (3.4)$$

В лабораторной работе экономически целесообразный режим работы трансформаторов реализуется на суточном интервале времени.

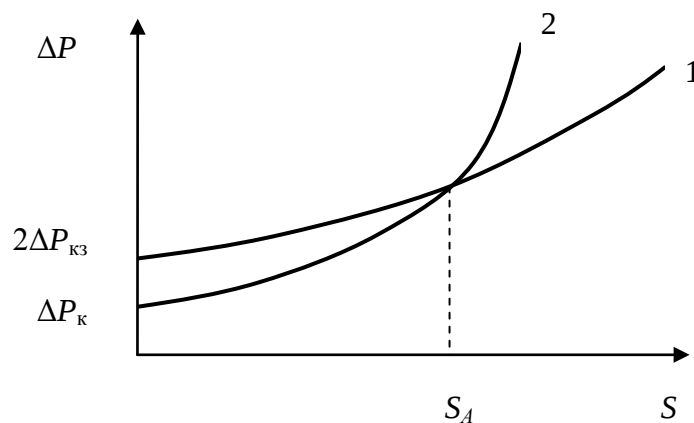


Рис. 3.1

Подготовка к работе

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

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать величину S_A для цеховой ТП (3.3) и нанести ее на график полной мощности подстанции, построенный в предыдущей работе.

2. По графику полной мощности ТП определить моменты времени включения и отключения трансформатора ТЗ и выставить необходимые ус-

тавки на коммутационном поле для реализации автоматического управления трансформатором ТЗ по времени суток.

3. Включить компьютер и запустить программу для регистрации графиков тока трансформаторов ТЗ или Т4.

4. Включить установку. Следить за правильностью реализации намеченного режима работы цеховой ТП.

5. По полученным регистрограммам тока построить графики нагрузки по току для трансформаторов ТЗ и Т4, осредненные на последовательных часовых интервалах времени. Рассчитать потери электроэнергии в трансформаторах ТЗ и Т4 и экономию электроэнергии, полученную за счет реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов по отношению к постоянной работе одного трансформатора (п. 6 предыдущей лабораторной работы).

6. Рассчитать потери электроэнергии в трансформаторах ТЗ и Т4 для такого режима, когда они постоянно включены в течение суток. Сравнить эти потери с потерями при экономически целесообразном режиме работы.

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- расчет и построение зависимостей потерь в трансформаторах от их загрузки ([рис. 3.1](#));
- расчет величины S_A ;
- обоснование выбора уставок времени для реализации экономически целесообразного режима работы трансформаторов;
- графики тока $I(t)$ трансформаторов ТЗ и Т4 для реализованного на модели экономически целесообразного режима и расчет потерь;
- расчет потерь для режима постоянной работы в течение суток двух трансформаторов ТЗ и Т4;
- оценку экономии электроэнергии, полученной за счет реализации экономически целесообразного режима трансформаторов, по отношению к режимам постоянной работы только одного и двух трансформаторов;
- выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как можно рассчитать экономически целесообразный режим работы для трех трансформаторов?
2. Как отразится на реактивных потерях в трансформаторе реализация их экономически целесообразного режима?
3. Как определяются потери электроэнергии в трансформаторах на длительных интервалах времени?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ

УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В

ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Цель работы – изучить методику оценки уровней напряжения в сети и способов их улучшения на суточном интервале времени.

Краткие теоретические сведения

Имеются две основные причины, вызывающие изменения напряжения в электрических сетях: изменения нагрузок, вызывающее изменения потерь напряжения, и регулирование напряжения с целью поддержания его в заданных пределах.

Уровни напряжения принято оценивать отклонениями напряжения от номинального V [1, 3, 4, 9], которые также изменчивы во времени по указанным выше причинам.

Наилучшим напряжением на зажимах электроприемников, с точки зрения технико-экономической эффективности их работы, является $U(t) = U_n = \text{const}$, т. е. $V = 0$. Обеспечить такой режим напряжения для всей массы электроприемников в сети практически невозможно, поэтому всегда $V \neq 0$. Причем, чем больше величина V , тем хуже напряжение. Из этого правила есть ряд исключений, например: для слабо загруженного асинхронного электродвигателя наилучшее напряжение меньше номинального. Величина допустимых значений V нормируется ГОСТ [2, 3] в целом для электрических сетей в зависимости от их напряжения. Наиболее жесткие требования к величине V в ГОСТ предъявляются к тем сетям, которые питают основную массу электроприемников (сети до 1000 В).

Таблица 4.1

Допустимые значения отклонений напряжения по ГОСТ 13109–97

Напряжение сети	Допустимые значения	
	Нормальные	Максимальные
До 1 кВ	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$
6–20 кВ	—	$\pm 10 \%$
35 кВ и выше	—	—

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

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

Для моделируемой сети расчетная схема и диаграмма V показаны на [рис. 4.1](#). На этом рисунке:

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

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

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

V_1 – отклонение напряжения на шинах РУ 10 кВ ГПП;

ΔU_2 – потеря напряжения в трансформаторе ГПП;

E_1 – добавка напряжения трансформатора ГПП;

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

E_2 – добавка напряжения трансформатора цеховой ТП;

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

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

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

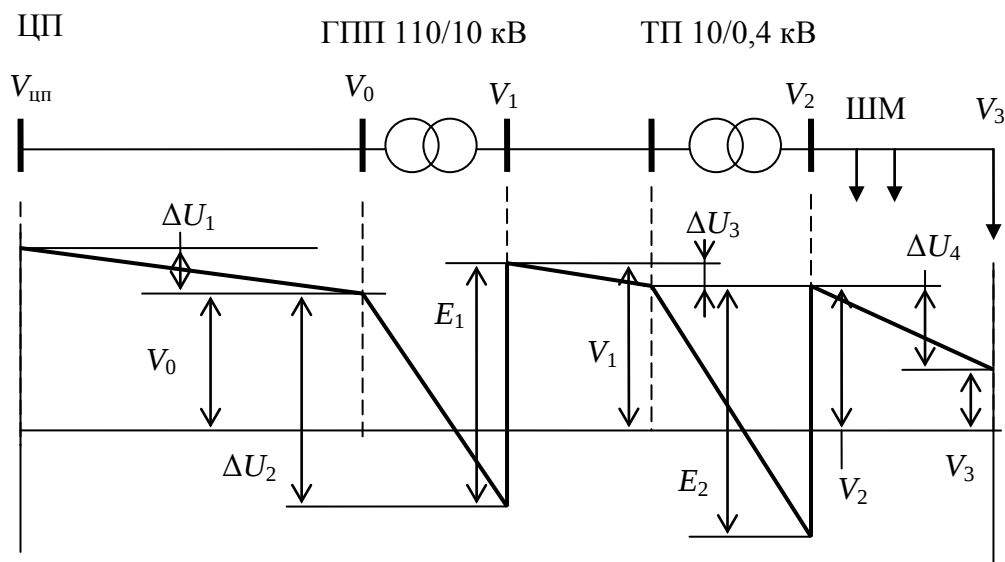


Рис. 4.1

В условиях эксплуатации все потребители рассчитывают требуемые значения V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок с учетом своих средств регулирования напряжения. Если энергоснабжающая организация не выдерживает эти значения, то к ней применяют экономические санкции. Поэтому выполнение данной лабораторной работы ориентировано на расчет требуемых значений V_0 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

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

$$\Delta U = \frac{I' R + I'' X}{U_n} \cdot 100 \% . \quad (4.1)$$

Все необходимые параметры элементов моделируемой сети приведены в [табл. В1](#), а параметры трансформатора Т2 рассчитаны в п. 1 [лабораторной работы № 1](#).

Подготовка к работе

При самостоятельной подготовке к работе необходимо:

- 1) повторить теоретический материал [\[1, 4, 9\]](#);
- 2) подготовиться к ответам на контрольные вопросы;
- 3) рассчитать потери напряжения в трансформаторе Т2 для режимов максимальных и минимальных нагрузок.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку к работе:
 - а) для измерения напряжения на шинах 10 кВ ГПП и 380/220 В цеховой ТП в суточном цикле времени включить компьютер и запустить программу;
 - б) включить питание установки и трансформатор Т4, отключить Т3, включить обобщенную нагрузку на шинах 10 кВ S1, включить СД, отключить конденсаторные батареи БК1, БК2, БК3, БК4 и фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ;
 - в) переключатель анцапф трансформатора Т2 и переключатель ПБВ трансформатора Т4 установить в нулевое положение;
 - г) переключатель задания уровня напряжения в сети 110 кВ установить в положение, указанное преподавателем.
2. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков $U(t)$ на шинах 10 кВ ГПП и на шинах 380/220 В цеховой ТП на суточном цикле времени с помощью компьютера. При невозможности использовать компьютер провести регистрацию графиков $U(t)$ по щитовым приборам.
3. Обработать результаты измерений:
 - а) построить графики $V(t)$ для шин 10 кВ ГПП и для шин 380/220 В цеховой ТП;
 - б) построить гистограммы отклонений напряжения и вычислить их средние значения и дисперсии.
4. Проанализировать полученные результаты. Определить оптимальную ступень ПБВ трансформатора Т4 и разработать график переключения анцапф РПН трансформатора Т2. При этом возможность регулирования напряжения с помощью батарей конденсаторов (БК) в данной работе не учитывать.

5. Установить переключателем, расположенным на лицевой панели, необходимую ступень ПБВ трансформатора Т4 и на наборном поле в режиме «Программирование» программу переключения анцапф РПН трансформатора Т2.

6. Запустить установку и провести регистрацию напряжений на суточном цикле аналогично [п. 2.](#)

7. Обработать результаты измерений в соответствии с [п. 3](#) и оценить соответствие напряжения в моделируемой сети требованиям [ГОСТ \[2\].](#)

8. По полученным в [п. 7](#) результатам построить для режимов максимальных и минимальных нагрузок диаграммы отклонений напряжения для моделируемой сети (аналогично [рис. 4.1](#)). Отклонения V_1 и V_2 определяются при этом экспериментально, V_0 – расчетным путем по [формуле \(4.1\)](#). Так как на модели не представлена цеховая сеть 380/220 В (ШМ на [рис. 3.1](#)), то потери в этой сети (ΔU_4) не учитываются и V_3 не оценивается.

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

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

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе, должен содержать:

- 1) задачи исследований;
- 2) результаты оценки отклонений напряжений в моделируемой сети;
- 3) суточный график переключения анцапф трансформатора Т2;
- 4) результаты измерений, полученные после реализации мероприятий;
- 5) напряжения по [пп. 8, 9](#) порядка выполнения работы;
- 6) выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие допускаются отклонения напряжения в промышленных электросетях по ГОСТ 13109–97 и почему?
2. Как зависит работа различных электроприемников от величины напряжения в сети?
3. Какие способы улучшения напряжения используются в промышленных электросетях и в сетях энергосистем?
4. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для простейшей сети с сопротивлением $R + jX$ и током $I' - jI''$.
5. Какие имеются оценки отклонений напряжения и как они вычисляются?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХ ПО ЭЛЕКТРОПИТАНИЮ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Цель работы – исследовать провалы напряжения в промышленных электросетях, являющиеся помехами по электропитанию для цифровых технических средств.

Краткие теоретические сведения

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

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

Δt – длительность провала напряжения, с;

ΔU – глубина провала напряжения, %.

Причины возникновения провалов напряжения в электрических сетях предприятий рассмотрены в работе [\[1, 4, 6, 9\]](#). Все множество этих причин можно разделить на два вида. Первый – провалы напряжения, «приходящие» из сетей энергосистемы, второй – провалы, вызываемые явлениями в электросетях предприятия (пиковые нагрузки, аварийные переключения и др).

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

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

Подготовка к работе

Самостоятельная подготовка к работе состоит в изучении теоретического материала по [1, 4, 9].

Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и запустить программу, включить питание лабораторного стенда, включить нагрузку S_1 , отключить трансформатор ТЗ. Остальные элементы мнемосхемы могут быть в любом состоянии (включено или выключено). Подключить электронный осциллограф для контроля напряжения на шинах 0,4 кВ цеховой ТП (рис. В2). Настроить осциллограф таким образом, чтобы можно было оценить глубину и длительность провала наблюдаемого на экране напряжения.

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

3. Включить трансформатор ТЗ на параллельную работу с трансформатором Т4 и повторить эксперимент в соответствии с п. 2. Оценить степень уменьшения глубины провалов напряжения, обусловленных пиковой нагрузкой в сети 0,4 кВ.

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:
задачи лабораторного исследования;
результаты наблюдений по пп. 2 и 3 порядка выполнения работы в форме таблицы с указанием времени посадки, ее длительности и глубины, а также вида (первый и второй);
выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины провалов напряжения в промышленных электросетях?
2. Опишите механизм воздействия провалов напряжения на ЦТС.
3. Какими путями можно обеспечить устойчивость ЦТС к провалам напряжения?
4. Какие нормы на провалы напряжения установлены в ГОСТ 13109–97 [2]?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ

НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель работы – изучить основные принципы компенсации реактивных нагрузок (КРН) в промышленных электрических сетях (ПЭС).

С этой целью в работе предусмотрено: вычисление общей мощности компенсирующих устройств (КУ) для потребителя, реализация расчетного режима реактивной мощности на лабораторной модели, оценка влияния КРН на режим напряжения и расчет экономического эффекта.

Краткие теоретические сведения

Обмен реактивной мощностью между системой электроснабжения предприятия и электроэнергетической системой (ЭЭС) регламентирован Правилами пользования электрической и тепловой энергией. Конкретные требования к режиму реактивной мощности каждого из предприятий устанавливаются при ежегодном заключении договора на поставку электроэнергии от электроснабжающей организации. Экономически обоснованные входные реактивные мощности $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ [1, 4, 9] предприятия задают дифференцированно, в зависимости от потребляемой мощности и электрической удаленности его от основных источников энергии (электростанций). Числовые значения $Q_{Э1}$ и $Q_{Э2}$ определяют в результате расчетов оптимальных режимов работы энергосистемы в периоды ее максимальных $Q_{Э1}$ и минимальных $Q_{Э2}$ нагрузок.

В работе исследуется узел нагрузки, схема замещения которого показана на [рис. 6.1](#).

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

В лабораторной модели источниками реактивной мощности являются: электроэнергетическая система ($Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$), синхронный электродвигатель (Q_d), конденсаторные установки БК1, БК2 напряжением 10 кВ ($Q_{кв}$) и БК3, БК4 напряжением 0,4 кВ ($Q_{кн}$); потребителями – нагрузка на шинах 10,5 кВ

(Q_1)
и нагрузка ТП (Q_2).

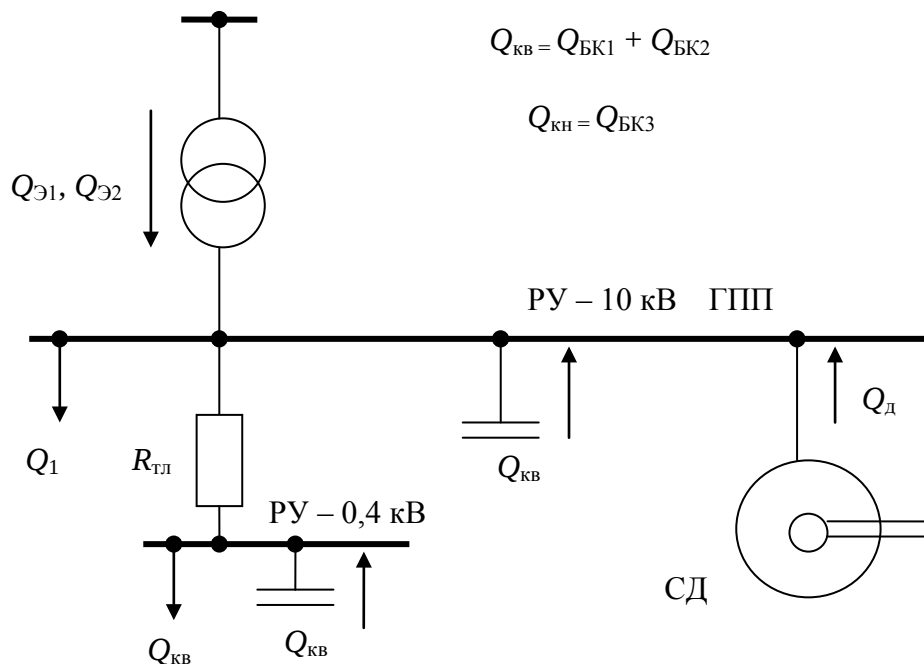


Рис. 6.1

Наилучшим (оптимальным) режимом компенсации реактивных нагрузок будет режим, соответствующий минимальной величине годовых расчетных затрат и удовлетворяющий требованиям электроэнергетической системы [1, 4, 9]. Для нахождения этого режима составляют функцию расчетных затрат (целевая функция) и записывают ограничения [1]. Оптимальными считаются такие мощности компенсирующих устройств, при которых целевая функция принимает минимальное значение в области допустимых решений. Область допустимых решений определяется ограничениями, накладываемыми на мощности КУ. Оптимальные мощности КУ в описанной выше постановке задачи рассчитывают с помощью методов математического программирования.

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

Этап первый. Рассматриваем ТП (рис. 6.2) и определяем $Q_{КН}$.

Для определения $Q_{КН}$ записывается функция годовых расчетных затрат:

$$3(Q_{\text{кн}}) = E \cdot \Delta K_{\text{н}} Q_{\text{кн}} + C_0 \left[\Delta P_{\text{н}} Q_{\text{кн}} + \frac{R_{\text{тл}}}{U^2 \cdot 10^3} (Q_2^m - Q_{\text{кн}})^2 \right], \quad (6.1)$$

где E – коэффициент отчислений от капиталовложений (нормативные отчисления, отчисления на эксплуатацию и восстановление оборудования). Численные значения E следует принять по указанию преподавателя в пределах (0,2 – 0,4); $\Delta K_{\text{н}}$ – удельная стоимость конденсаторных установок низкого напряжения (150 руб/квар); C_0 – удельная стоимость потерь активной мощности (задается преподавателем в пределах от 800 до 1200 руб/кВт); $\Delta P_{\text{н}}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках низкого напряжения (0,003 кВт/квар); $R_{\text{тл}}$ – приведенное к напряжению 10 кВ сопротивление трансформатора цеховой ТП и питающей его линии электропередачи, Ом. Величину этого сопротивления определяем по данным [табл. В3](#) описания лабораторной установки; U – среднее напряжение на шинах ГПП (10 кВ); Q_2^m – наибольшая реактивная мощность нагрузки трансформатора Т4 период максимальной активной мощности нагрузки энергосистемы (для упрощения работы считаем, что трансформатор Т3 отключен и в расчетах не учитывается), определяется по графику нагрузки Т4, полученному в [лабораторной работе № 1](#). Период максимума задается преподавателем.

Сопротивление трансформатора цеховой ТП и питающей его линии электропередачи:

$$R_{\text{тл}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} U^2}{S_{\text{нт}}} \cdot 10^3 + R_0 \cdot l, \quad (6.2)$$

где $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт ([табл. В3](#)); $S_{\text{нт}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; R_0 – удельное активное сопротивление линии электропередачи, Ом/км; l – длина линии электропередачи, км.

Мощность конденсаторной батареи определяется из уравнения:

$$\frac{\partial P(Q_{\text{кн}})}{\partial Q_{\text{кн}}} = 0. \quad (6.3)$$

Расчетное выражение имеет вид

$$Q_{\text{кн}} = Q_2^m - \frac{EK\Delta_{\text{н}} G + {}_0P\Delta_{\text{н}}}{2C_{0\text{тл}} R} U^2 \cdot 10^3. \quad (6.4)$$

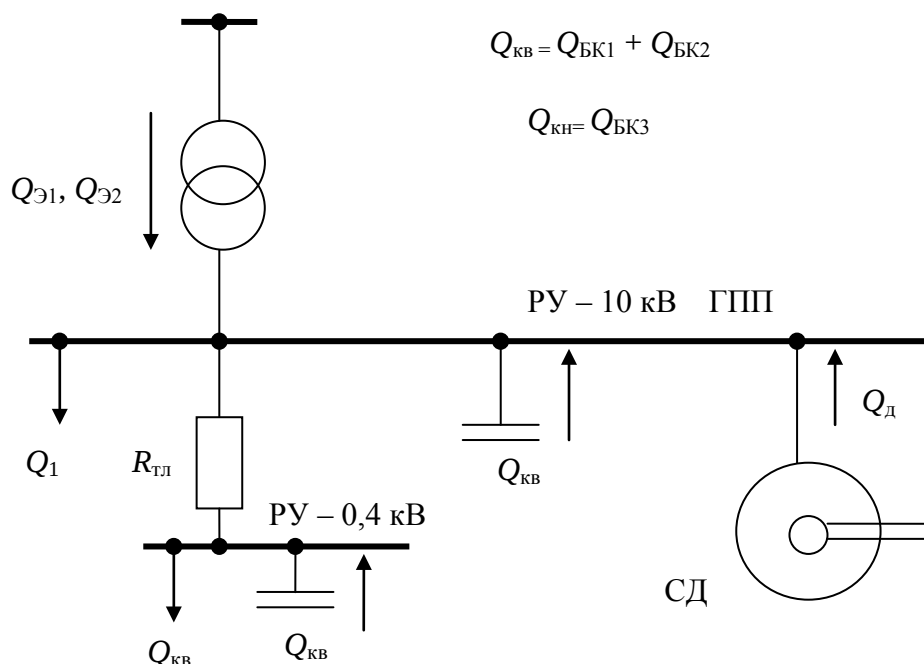


Рис. 6.2

Этап второй. На этом этапе рассматриваем задачу нахождения оптимальных значений $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ (рис. 6.3). Величина некомпенсированной мощности, передаваемой через трансформатор Т4, показана на схеме как $Q_{\text{т}}$.

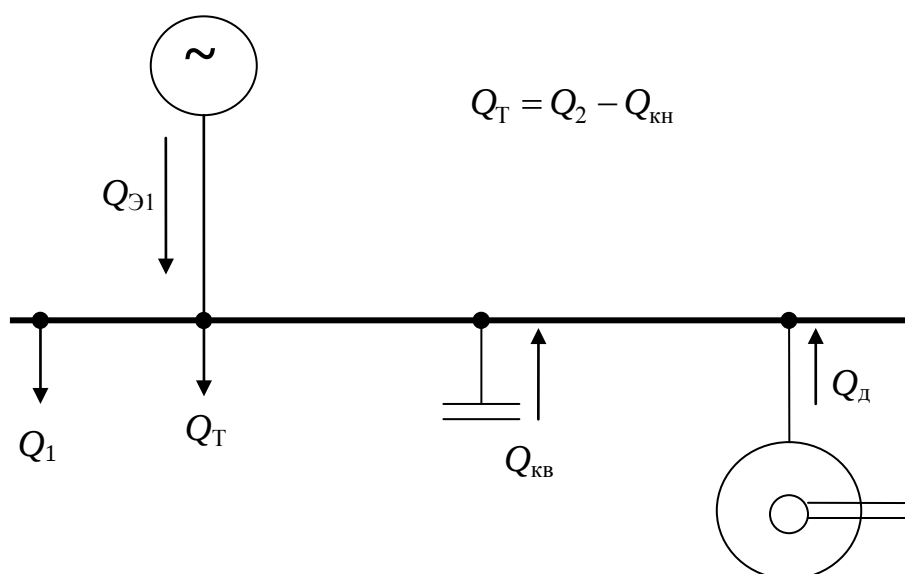


Рис. 6.3

Функция годовых расчетных затрат для этого этапа расчетов ($3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}})$, руб/год) имеет вид

$$3(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) = E \cdot \Delta K_{\text{в}} Q_{\text{кв}} + C_0 [\Delta P_{\text{кв}} Q_{\text{кв}} + K_1 Q_{\text{д}} + K_2 Q_{\text{д}}^2], \quad (6.5)$$

где E, C_0 – см. [выражение \(6.1\)](#); $\Delta K_{\text{в}}$ – удельная стоимость конденсаторных батарей высокого напряжения (120 руб/квар); $\Delta P_{\text{кв}}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках высокого напряжения (0,002 кВт/квар); K_1, K_2 – коэффициенты, характеризующие потери активной мощности в СД, зависящие от $Q_{\text{д}}$ ($K_1 = 0,011$ кВт/квар, $K_2 = 0.00019$ кВт/квар²).

Функция Лагранжа

$$L(Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}, \lambda) = (Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}) \lambda (Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{эл}} - Q_{\text{кв}} - Q_{\text{д}}), \quad (6.6)$$

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

Мощности $Q_{\text{кв}}$ и $Q_{\text{д}}$ определяем решением системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial Q_{\text{кв}}} &= 0, \\ \frac{\partial L}{\partial Q_{\text{д}}} &= 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= 0. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Из [\(6.7\)](#) можно получить выражения для расчета $Q_{\text{кв}}, Q_{\text{д}}$, квар, в общем виде:

$$Q_{\text{д}} = \frac{1}{K_2} \left(\frac{E K \Delta}{C_0} + \Delta P_{\text{кв}} - 1 \right), \quad (6.8)$$

$$Q_{\text{кв}} = Q_1^m + Q_{\text{т}} - Q_{\text{эл}} - Q_{\text{д}}. \quad (6.9)$$

С помощью (6.4), (6.8), (6.9) вычисляем необходимые установленные мощности конденсаторных батарей и наибольшую реактивную мощность СД. Отрицательные значения расчетных мощностей свидетельствуют об отсутствии экономической целесообразности использования соответствующего источника реактивной мощности. Его значение принимается равным нулю. Величина Q_d не должна превышать допустимых значений по условиям нагрева статора и ротора СД с учетом его загрузки по активной мощности. Проверка СД по условиям нагрева в лабораторной работе не предусмотрена.

Полное использование всех компенсирующих устройств (КУ) экономически обосновано только в период максимальной нагрузки ЭЭС. При существенно изменяющемся графике реактивной мощности нагрузки необходимо регулирование КУ. В лабораторной установке предусмотрено ручное дискретное регулирование Q_d и автоматическое регулирование конденсаторных батарей. Графики регулирования КУ строятся на основании оптимизационных расчетов с учетом требований ЭЭС ($Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$). Регулирование КУ должно обеспечить минимальные потери электроэнергии и требуемый уровень качества напряжения.

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

- 1) в период максимальной активной мощности нагрузки ЭЭС потребление реактивной мощности не должно превосходить величину $Q_{Э1}$.
- 2) в период минимальной нагрузки потребляемая реактивная мощность должна быть меньше, чем $Q_{Э1}$.

Подготовка к работе

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

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя следующую исходную информацию:
 - а) $Q_{Э1}$, $Q_{Э2}$;
 - б) интервалы времени, соответствующие периодам максимума и минимума активной мощности нагрузки ЭЭС;
 - в) удельную стоимость потерь активной мощности C_0 .

2. По формулам [\(6.4\)](#), [\(6.8\)](#), [\(6.9\)](#) определить мощности КУ (два этапа). Полученные значения округлить до ближайших возможных величин, указанных на мнемосхеме лабораторной установки.

Мощность нагрузки взять по графику, полученному в лабораторной работе № 1, прочую необходимую информацию следует взять из [табл. В3](#).

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

4. Построить графики регулирования мощностей конденсаторных батарей ($Q_{кн}$, $Q_{кв}$) и синхронного двигателя ($Q_{д}$). При построении графиков рекомендуется обратить внимание на технико-экономические характеристики и эффективность располагаемых КУ. Кроме того, надо учесть, что на весь период регулирования КУ могут быть автоматически запрограммированы только на включение/отключение в режиме «Программирование». Значения реактивных мощностей КУ задаются только в начале цикла – суток.

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

6. Включить компьютер и запустить программу. Запрограммировать лабораторную установку для автоматического управления анцапфами Т2 ([лабораторная работа № 3](#)) и мощностями конденсаторных батарей в соответствии с построенными графиками их регулирования. Привести лабораторную модель в исходное рабочее состояние (включить S_1 , Т4, СД; отключить Т3, БК1, БК2, БК3, БК4).

7. Включить лабораторный стенд и затем выполнить следующее:

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

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

8. Построить графики нагрузки (P и Q) с учетом КУ и сравнить их с графиками, полученными в [лабораторной работе № 1](#).

9. Построить гистограммы, вычислить математические ожидания и дисперсии напряжений на шинах 10 и 0,4 кВ с учетом КРН. Оценить влияние КУ на режим напряжения, сравнив полученные результаты с соответствующими данными [лабораторной работы № 4](#).

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

Требования к отчету

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- 1) таблицу исходных данных для выполнения работы, включая параметры, полученные у преподавателя;
- 2) расчет мощностей КУ;
- 3) графики регулирования КУ;
- 4) графики активной и реактивной мощностей нагрузки Т2 и Т4 с учетом КУ;
- 5) графики изменения напряжений на шинах 0,4 кВ ТП, полученные с помощью компьютера;
- 6) гистограммы напряжений на шинах 0,4 кВ ТП;
- 7) расчет экономического эффекта;
- 8) выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Дать понятие реактивной мощности, пояснить ее физический смысл и особенности в сравнении с активной.
2. Чем определяются предельные значения реактивной мощности, которую может выдать в сеть синхронная машина?
3. Дать сравнительную характеристику источников реактивной мощности, используемых в СЭПП.
4. Каким образом реактивная мощность влияет на режим напряжения электрической сети?
5. Требования, предъявляемые ЭЭС к режиму реактивной мощности СЭПП.
6. Как оценивается экономический эффект внедрения расчетного оптимального режима компенсации нагрузок предприятия?
7. С какой целью выполняется регулирование мощностей компенсирующих устройств?
8. Перечислить и пояснить принципы построения графиков регулирования КУ.
9. Почему входные реактивные мощности задаются предприятиям индивидуально?
10. Что понимается под оптимизацией режима компенсации реактивных мощностей нагрузок?
11. Пояснить преимущества и недостатки индивидуальной компенсации реактивной мощности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Цель работы – изучить методики исследования высших гармоник тока и напряжения в промышленных электросетях и работу фильтрокомпенсирующего устройства.

Краткие теоретические сведения

Источниками высших гармоник токов и напряжений в распределительных электросетях являются так называемые нелинейные нагрузки. Это потребители электроэнергии, вольт-амперная характеристика которых нелинейна. К ним относятся: вентильные преобразователи, газоразрядные лампы, электродуговые печи и сварочные установки. Нелинейные нагрузки потребляют из сети несинусоидальный ток, что приводит к искажению кривой напряжения в сети.

Высшие гармоники отрицательно влияют на работу электрических сетей и некоторых электроприемников, поэтому в ряде случаев необходима разработка специальных мероприятий для улучшения формы кривой напряжения в сети.

Периодическую несинусоидальную кривую напряжения $U(t)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$U(t) = U_0 + \sum_{v=1}^{\infty} U_{vm} \sin(\omega \cdot t + \psi_v), \quad (7.1)$$

где U_0 – постоянная составляющая. В трехфазных промышленных электросетях постоянная составляющая напряжения, как правило, отсутствует, поэтому $U_0 = 0$; U_{vm} – амплитудное значение v -й гармоники напряжения; ψ_v – фаза v -й гармоники напряжения.

В некоторых случаях ряд Фурье удобно записывать в другом виде:

$$U(t) = U_0 + \sum_{v=1}^{\infty} U'_{vm} \cos v \omega t + U_{vm} \sin v \omega t. \quad (7.2)$$

При этом $\psi_v = \arctg\left(\frac{U''_{vm}}{U'_{vm}}\right)$, а коэффициенты ряда определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} U'_{vm} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \sin \theta_i; \\ U''_{vm} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (7.3)$$

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

В соответствии с ГОСТ 13109–97 уровень высших гармоник напряжения в сети оценивается коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{\text{н}}}, \quad (7.4)$$

где $U(t)$ – номинальное напряжение сети; U_v – действующее значение напряжения v -й гармоники ($v=2, 3, 4, \dots, 13$).

Уровень высших гармоник напряжения или тока в действующих электроустановках можно оценить двумя способами: расчетным (вычисление коэффициентов ряда по снятой с помощью осциллографа исходной нелинейной кривой) и аппаратным (измерение действующих значений напряжений гармоник с помощью специального измерительного прибора).

Уровень высших гармоник напряжения в распределительных сетях уменьшаем с помощью подключения нелинейных нагрузок на отдельный трансформатор, увеличения числа фаз выпрямления в схемах вентилей, уменьшения сопротивления системы, а также установкой специальных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). ФКУ рассчитывается и устанавливается для фильтрации конкретной высшей гармоники, преобладающей в дискретном спектре. Оно представляет собой последовательно соединенные реактор и конденсаторную батарею [1].

В моделируемой системе электроснабжения источником высших гармоник является нелинейная нагрузка, подключенная к силовому пункту СП (см. [рис. В1](#)). Эта нагрузка представляет собой мощный однофазный не-

управляемый выпрямитель, который потребляет из сети 220 В ток, содержащий высшие гармоники [\[1\]](#):

$$\begin{aligned} v &= nm \pm 1 = 3, 5, 7, 9, \dots; \\ I_v &= \frac{I_1}{v}. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Силовой пункт (СП) имеет значительную электрическую удаленность от ТП, т. е. питается линией 380 В с большим сопротивлением, и поэтому в напряжении на шинах СП имеется довольно существенный уровень высших гармоник напряжения. Для снижения этого уровня установлен силовой фильтр третьей гармоники (ФКУ). Лабораторная работа включает два этапа исследований. Первый – оценка уровня высших гармоник и коэффициента несинусоидальности напряжения на шинах СП при отключенном ФКУ. Второй – оценка эффективности снижения уровня высших гармоник напряжения с помощью ФКУ третьей гармоники.

Определить высшие гармоники в несинусоидальной кривой тока или напряжения можно двумя путями: с помощью специальных приборов – измерителей нелинейных искажений (несинусоидальности) или с помощью графоаналитического расчета по [формуле \(7.2\)](#). В лабораторной работе используем второй путь. Исследуемую несинусоидальную кривую с экрана осциллографа переносим на кальку. Время развертки осциллографа для удобства расчетов должно составлять один период промышленной частоты (0,02 с). На кальке период разбиваем на m равных частей ($m = 24$) и с помощью линейки измеряем координаты исследуемой кривой в $m+1$ точках (по краям всех m интервалов). Расчет высших гармоник производим на ПК.

Погрешность расчетов определяется точностью осциллографирования исследуемой кривой. Осциллографирование с помощью «срисовывания» кривой с экрана осциллографа, конечно, не может дать точных результатов, но их все же можно использовать для приближенных оценок (при отсутствии измерительных приборов).

Фильтрокомпенсирующее устройство ФКУ или силовой фильтр k -й гармоники представляет собой последовательно соединенные конденсаторную батарею, реактор и активное сопротивление [\[1\]](#), параметры которых определяются следующим:

$$\frac{1}{k\omega \cdot C_{\text{КВ}}} = k\omega \cdot L_p; \quad (7.6)$$

$$R = 0,1 \dots 0,2 \text{ Ом.}$$

Для k -й гармоники ФКУ представляет собой нулевое сопротивление (т. е. короткое замыкание) в сети ($X_{\text{ФКУ}}(k) = 0$), для первой основной гармоники – компенсирующее устройство с эквивалентным емкостным сопротивлением $X_{\text{ФКУ}}(1)$, рис. 7.1.

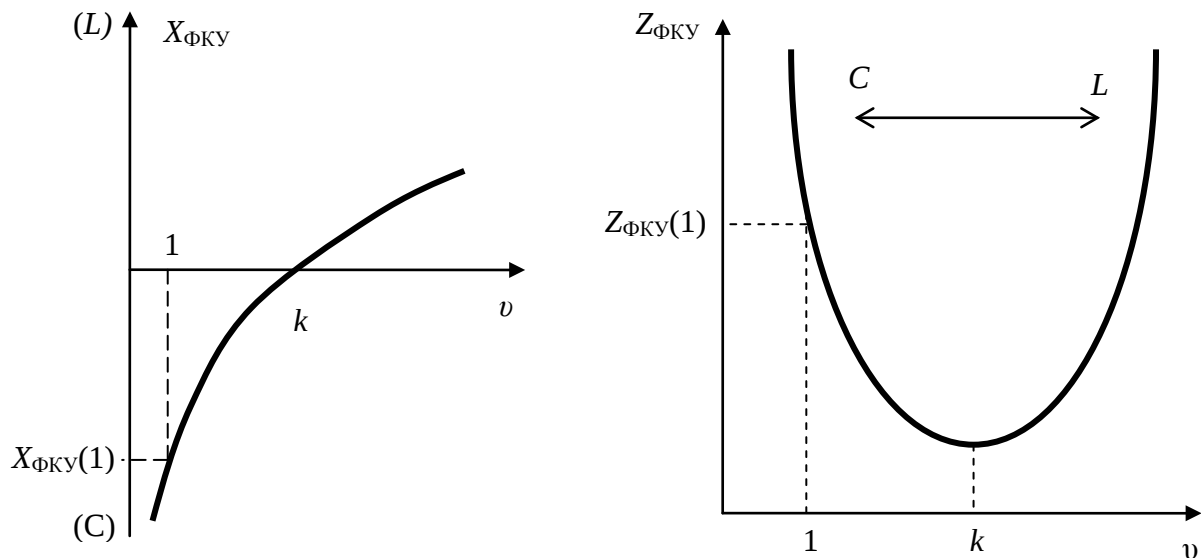


Рис. 7.1

Подготовка к работе

При самостоятельной подготовке к работе необходимо:

- 1) изучить теоретический материал [[1](#), [4](#), [5](#), [9](#), [10](#)];
- 2) подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить установку к осциллографированию напряжения на шинах СП и тока нелинейной нагрузки: включить компьютер и запустить программу SCADASES, включить установку; включить нагрузку S_1 , трансформатор Т4 (остальные элементы мнемосхемы могут быть в любом состоянии); запрограммировать установку; выключить ФКУ; включить осциллограф и подключить его к соответствующим клеммам «Измерительная аппаратура» и клеммам трансформатора тока ТА1 (клеммы i_{1t}) низковольтной нагрузки (НН) на мнемосхеме; настроить осциллограф так, чтобы период исследуемой кривой занимал весь его экран; подготовить кальку и запустить установку нажатием кнопки «Пуск». Следить за формой исследуемой кривой напряжения на экране осциллографа.

2. В момент времени, заданный преподавателем, остановить моделирование суточного графика кнопкой «Останов», чем обеспечивается стабиль-

ность исследуемой кривой на экране осциллографа. Приложить к экрану кальку и зарисовать исследуемые кривые (сначала кривую напряжения на шинах СП, а затем кривую тока нелинейной нагрузки).

3. Обработать осциллограммы для расчета высших гармоник. Рассчитать высшие гармоники в кривых тока и напряжения на ЭВМ. Для кривой напряжения рассчитать коэффициент несинусоидальности по [формуле \(7.4\)](#), вычертить на графике несинусоидальную кривую напряжения, а также первую, третью и пятую гармоники. Вычислить коэффициенты третьей и пятой гармоник. Оценить полученные результаты на допустимость по ГОСТ 13109–97.

4. Включить ФКУ и произвести осциллографирование тока ФКУ и напряжения на шинах СП. Выключить установку и осциллограф, затем сохранить файл результатов измерений и выключить компьютер.

5. Аналогично [п. 3](#) обработать осциллограммы и вычислить гармоники для исследуемых кривых $U(t)$, $i_{\text{ФКУ}}(t)$. Для напряжения на шинах СП рассчитать коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и сравнить его значение со значением, вычисленным ранее. Вычертить на отдельных графиках осциллограммы, первую, третью и пятую гармоники для напряжения и тока ФКУ соответственно. Провести их анализ.

Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- задачи лабораторного исследования;
- графики $U(t)$, $i_{\text{Л}}(t)$ и их первой, третьей и пятой гармоник для режима без ФКУ;
- графики $U(t)$, $i_{\text{ФКУ}}(t)$ для режима с подключенным ФКУ;
- расчет соответствующих коэффициентов;
- выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие допустимые значения коэффициента несинусоидальности [\(7.4\)](#) установлены [ГОСТ \[2\]](#) для электрических сетей и почему?
2. Каковы причины появления высших гармоник напряжения в электрических сетях предприятий?
3. Почему вентильный преобразователь потребляет из сети несинусоидальный ток?
4. Какие существуют способы уменьшения уровня высших гармоник напряжения в промышленных электросетях?
5. Начертите векторную диаграмму токов и напряжений ФКУ (для первой гармоники).
6. Для чего в схеме ФКУ используется активное сопротивление?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Б. И. Кудрин. – 2-е изд. – М. : Интернет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
2. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М. : Изд-во стандартов, 1998.
3. Библия электрика: ПУЭ. – Новосибирск : Сиб. ун-т, 2007. – 606 с.
4. Попов, Ю. П. Электроснабжение: конспект лекций / Ю. П. Попов, Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 211 с. – (Электроснабжение : УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов).
5. Электроснабжение: метод. указания к выполнению лаб. работ / сост. А. С. Амузаде. – Красноярск, 2007.
6. Синенко, Л. С. Электроснабжение: учеб. пособие к практ. занятиям / Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова, Ю. П. Попов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 147 с. – (Электроснабжение : УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов).
7. СТО 4.2—07—2008. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности [текст] / разработ. Т. В. Сильченко, Л. В. Белошапко, В. К. Младенцева, М. И. Губанова. – Введ. впервые 09.12.2008. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 47 с.
8. Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс / Ю. П. Попов, Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова и др. – Электрон. дан. (180 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение: УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 98 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).
9. Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций / сост. Ю. П. Попов, Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова и др. – Электрон. дан. (180 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение: УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 98 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

10. Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания по лабораторным работам / А. С. Амузаде, Н. П. Гужов – Электрон. дан. (180 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение: УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю. П. Попов). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 98 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

11. Электроснабжение. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. указания по самостоятельной работе / Ю. П. Попов, Л. С. Синенко, Е. Ю. Сизганова – Электрон. дан. (180 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроснабжение: УМКД № 176-2007 / рук. творч. коллектива Ю.П.Попов). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 98 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).