

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)
Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

_____ О.Г.Локтионова

«_____» _____ 2021 г.

**ЭЛЕКТРОПИТАЮЩИЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ.
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**
Методические указания к лабораторным работам
для студентов направления подготовки 13.04.02

Курск 2021

УДК 621.311

Составитель: О.М. Ларин

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение»

А.Н. Горлов

Электропитающие системы: методические указания к лабораторным работам / Юго-Зап.. гос. ун-т; сост.: О.М. Ларин. Курск, 2021. .63 с.: ил. 20, табл. 12, Библиогр.:с.63.

Содержат указания по проведению лабораторных и теоретических исследований моделей работы электропитающих систем с задачами изучения распределения в сетях различной конфигурации потоков мощности и напряжения в узлах в зависимости от изменения режима источника питания и распределения нагрузок.

Соответствуют программе курса по дисциплине «Электропитающие сети и системы. Эксплуатация электрических сетей» для студентов направления подготовки 13.03.02 всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84/16.

Усл.печ.л. . Уч.–изд.л . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

Лабораторная работа № 1

Моделирование электрических сетей

Введение

Электрические сети и системы – очень сложная техника, сложная по физическим основам функционирования, по преобразованиям в них электроэнергии, по особенностям реализации, эксплуатации и обслуживания, по масштабам – многокилометровая протяженность и сложная конфигурация.

Возникают некоторые вопросы. В каком соотношении должны находиться действительная электрическая сеть и ее малая модель, занимающая два – три лабораторных стола? Что должно быть общего между реальной электрической сетью и ее физической моделью?

Очевидно, модель адекватна, если, несмотря на многократно меньшие масштабы, в ней воспроизводятся такие же электромагнитные процессы, что и в реальности, таким образом выполняется натурное моделирование.

В цикле лабораторных работ по курсу «Электропитающие системы» на базе комплекта учебного оборудования «Электроэнергетика» выполняется натурное моделирование установившихся синусоидальных режимов электрических сетей. При этом становится возможным изучение в эксперименте широкого круга вопросов связанных с электрическими режимами сетей.

В ходе экспериментов, в расчетах и в анализах результатов для изучения дисциплины «Электропитающие системы» важен следующий момент: модели сетей и каждый их компонент – блок и даже элементы блоков (резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы и т.д.), а также все режимные величины (токи, напряжения и мощности) надлежит воспринимать и учитывать в терминах и понятиях данной дисциплины.

1. Цели и содержание работы.

Целью работы является получение необходимого для последующих лабораторных занятий минимума сведений о сущности, задачах и способах натурального моделирования электрических сетей.

Ведется изучение блочного (модульного) принципа выполнения и использования аппаратной части комплекта типового лабораторного оборудования.

Рассматриваются характеристики и возможности отдельных компонентов комплекта – натуральных аналогов элементов реальных электрических сетей.

Проводится начальная учебная практика составления электрической цепи моделей установившихся режимов сетей.

2. Структура лабораторных стендов.

Лабораторный стенд одной натурной модели электрической сети занимает два, реже – три лабораторных стола, располагаемых рядом.

В комплектовании стенда для каждой очередной лабораторной работы по курсу «Электропитающие системы» используется блочный (модульный) принцип. Это значит, что комплект стенда составляется компонентами в виде функциональных блоков-модулей, каждый из которых можно рассматривать как аналог (модель) соответствующего элемента оборудования или части реальной сети.

Основные модули (блоки трансформаторов, модели линий, модули нагрузок) снабжены встроенными средствами регулировки.

Каждый блок имеет собственную переднюю панель с гнездами для электрических соединений, органами регулировок и с изображением мнемосхемы внутренних соединений.

Все внешние соединения выполняются гибкими изолированными проводами со специальными наконечниками, исключающими непреднамеренное касание неизолированных токоведущих частей.

Ряд блоков имеют гнезда для обязательного подключения к общему контуру защиты от коротких замыканий.

Индивидуального питания, т.е. отдельного подключения к сети лаборатории, кроме основного блока питания, требуют также два измерительных модуля и блок автоматического выключателя.

Все блоки устанавливаются на специальной раме, при оперативной необходимости их легко переместить или заменить.

3. Аппаратура моделей электрических сетей.

3.1. Перечень и количество компонентов одного стенда.

Таблица 3.1. Перечень и количество компонентов одного стенда.

Тип	Название	Номер лабораторной работы			
		2	3	4	5
201.2	Трехфазный источник питания	1	1	1	1
347.1	Трехфазная трансформаторная группа	-	1	1	-
338	Регулировочный трансформатор	1	-	-	1
301.1	Трехполюсный выключатель	-	-	1	1
313.2	Модель линии электропередачи	1	3	3	1
306.1	Активная нагрузка	1	1	1	1

324.2	Индуктивная нагрузка	1	1	1	1
317.2	Емкостная нагрузка	-	-	-	1
314.2	Линейный реактор	-	-	-	-
315.2	Устройство продольной емкостной компенсации	-	-	-	1
508.2	Блок мультиметров	1	1	1	1
507.2	Измеритель мощностей	1	1	1	1
349	Коммутатор измерителя мощностей	1	1	1	1

Примечание: в перечне компонентов могут быть изменения в связи с возможными заменами, обновлением, совершенствованием или расширением цикла лабораторных работ по курсу «Электропитающие системы».

3.2. Характеристика основных блоков-модулей.

3.2.1. Трехфазный источник питания (201.2)

Блок трехфазного источника питания используется как основной, так как:

1. Необходим в каждой лабораторной работе;
2. Осуществляет связь учебной модели электрической сети с трехфазным и однофазным контурами электропроводки лаборатории;
3. Обеспечивает питание током промышленной частоты функциональных блоков всех возможных однофазных и трехфазных лабораторных комплексов;
4. Содержит элементы защиты: ключ-выключатель – для предотвращения несанкционированного включения, автоматические фазные выключатели и устройства защитного заземления;
5. Ручные органы управления включением или выключением питания модели сети размещены на передней панели этого блока;
6. Блок и всю трехфазную совокупность напряжений на его выходе следует в лабораторной работе рассматривать как модель питающей энергосистемы.

Подключение блока к сети лаборатории выполняется с помощью специального трехфазного кабеля.

Изображение панели блока источника питания с необходимыми пояснениями дано на рис. 1.1.

Подготовительные действия на панели для включения блока в работу выполняются в следующем порядке:

1. Поворачивается ключ-выключатель до упора в положение «I»;

2. Соединяются гнезда «ТК» термодатчика;
3. Включаются автоматические выключатели в фазах;
4. Включается устройство защитного заземления.

Включение в работу выполняется кнопкой «ВКЛ».

В ходе работы необходимо постоянно иметь ввиду красную кнопку-«грибок» для выключения источника питания, в особенности – в случае экстренной необходимости. Блок выключается также для существенных изменений в схеме цепи модели и сразу же по окончании работы.

Входные электрические характеристики блока трехфазного источника питания:

линейное напряжение – 380 ± 38 В;

ток – не более 16 А.

Выходные характеристики:

линейное напряжение – 380 ± 38 В;

фазное напряжение – 220 ± 22 В;

ток – не более 10 А.

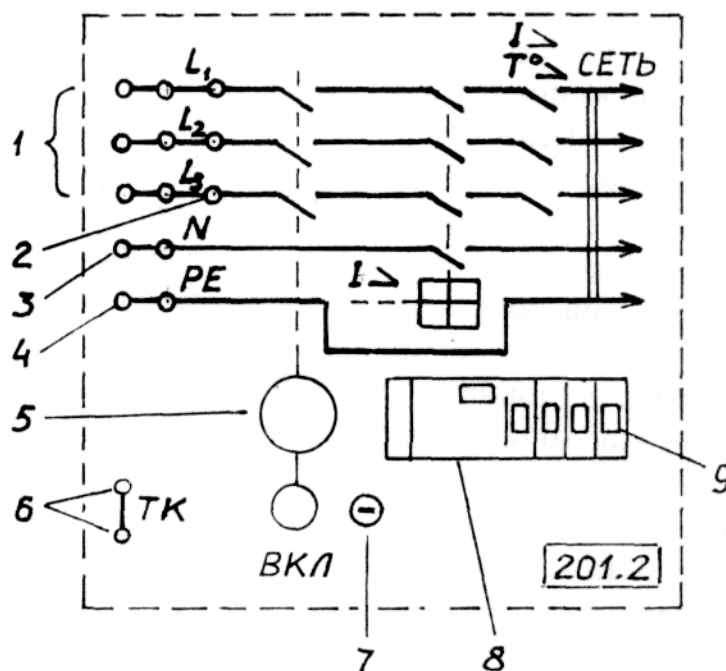


Рис. 1.1. Трехфазный источник питания.

1 – фазы питающей сети; 2 – светодиоды; 3 – нулевой провод; 4 – гнезда защитного заземления; 5 – кнопка отключения; 6 – гнезда термодатчика; 7 – ключ-выключатель; 8 – устройство защитного отключения; 9 – автоматические выключатели.

3.2.2. Трехфазная трансформаторная группа (347.1) и регулировочный трансформатор (338).

В моделировании каждый из этих трансформаторных блоков может использоваться как аналог силового трансформатора подстанции.

Рабочими элементами блоков являются три классических однофазных двухобмоточных трансформатора с отпайками.

Обмотки первичной стороны трансформаторов в блоках каждого типа связаны по схеме звезды с нейтралью. При этом возможно и трехфазное питание блоков и однофазное. При трехфазном питании вторичные обмотки соединяются звездой или треугольником, согласно задачам каждой лабораторной работы. В случае однофазного питания трансформаторы блоков могут использоваться по отдельности или соединенные параллельно.

Наличие отпаяк трансформаторных обмоток отвечает необходимости в лабораторных работах изменять напряжение.

Характеристики блока трехфазной трансформаторной группы:

номинальная мощность – 3х80 ВА;

номинальное первичное фазное напряжение – 230 В;

номинальное вторичное фазное напряжение – 127, 133, 220, 226, 230, 235, 242 В.

Характеристики регулировочного трансформатора:

номинальная мощность – 250 ВА;

номинальное первичное напряжение – 380 В;

номинальное вторичное напряжение – $90 + 2,5x(1 \div 20)$ В.

3.2.3. Модель линии электропередачи (313.2)

Блок модели линии электропередачи (ЛЭП) – единственный, в котором натурное моделирование (в смысле воспроизведения характера процесса) не выполняется. Действительная ЛЭП, как известно из курса ТОЭ, - это устройство с распределенными по длине линии параметрами, и в установившемся режиме напряжение и ток являются результатом наложения непрерывно распространяющихся прямой и обратной электромагнитных волн. В модели линии синусоидальный режим – это процесс в цепи с сосредоточенными параметрами, где возникновение волн не возможно.

Линия конечной длины (однофазная или трехфазная) представляет собой симметричный четырехполюсник, а для любого такого четырехполюсника можно определить расчетный эквивалент – П-образный или Т-образный четырехполюсник, который в теории электрических сетей принимается как схема замещения ЛЭП. Этот переход к схеме замещения уже есть моделирование, но теоретическое.

«Натурным» моделированием будет составление электрической цепи по схеме замещения.

Электрические цепи в блоке модели линии содержат три четырехполюсника (рис. 1.2), их резисторы и катушки индуктивности представляют сопротивление и индуктивность фазных проводов ЛЭП, а конденсаторы, располагающиеся по концам четырехполюсников, - рабочую емкость фаз.

Весь блок представляет собой одну линию, если в модели создается трехфазный режим. Если блок используется в однофазной модели, можно считать, что в нем содержатся три линии, которые могут включаться по любой схеме.

Для всех элементов, изображенных в мнемосхеме на передней панели блока, предусмотрена ступенчатая регулировка параметров.

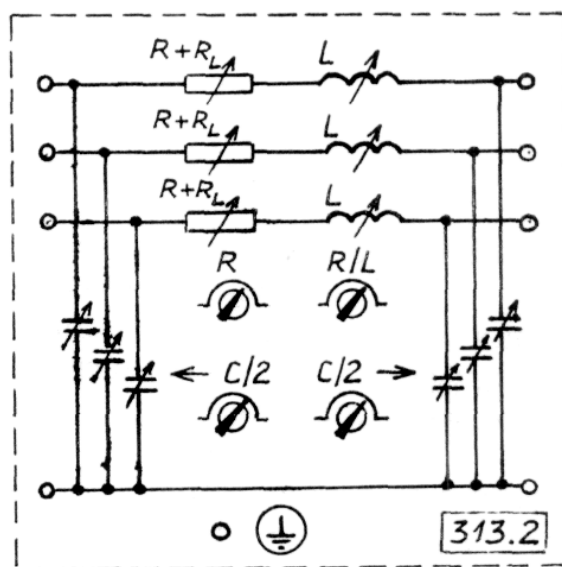


Рис. 1.2. Лицевая панель блока модели ЛЭП.

3.2.4. Блоки – модули нагрузок: «активная нагрузка 3 x 0...50 Вт» (306.1); «индуктивная нагрузка 3 x 0...40 Вар» (324.2); «емкостная нагрузка 3 x 0...40 Вар» (317.2)

Элементы блоков нагрузок в моделях электрических сетей используются в трехфазном или в однофазном режиме в качестве потребителей энергии активного или активно-реактивного характера.

Регулирование параметров элементов блоков ступенчатое, выполняется переключателями. На шкалах переключателей обозначены не сопротивления, индуктивности или емкости, а проценты от допустимой потребляемой элементами активной или реактивной мощности. Это связано с тем, что нагрузки в электрических сетях обычно задаются своей мощностью. Сопротивления нагрузок легко определить по мощности и напряжению.

Ступени регулирования (дискретность) параметров элементов одной фазы блоков:

в блоке активной нагрузки – 10 %;

в блоке индуктивной нагрузки – 25 %;

в блоке емкостной нагрузки – 25 %.

Заметим, что проценты, считываемые по шкалам переключателей на панелях блоков нагрузок, ни в какие формулы не входят, так как действительная потребляемая блоками мощность зависит и от установленных параметров элементов, и от их напряжения, и определяется она в результате измерений. Если же в ходе лабораторной работы должны задаваться изменения нагрузок, то фиксируемые проценты являются обозначениями ступеней изменений, составляя первую строку таблицы опытных данных. В однофазном режиме три элемента каждого из блоков нагрузок могут включаться последовательно или параллельно, и условная сумма их процентов будет не более, чем обозначение ступени регулирования.

Все блоки нагрузок должны подключаться к контуру защитного заземления.

3.2.5. Измеритель мощности (507.2.)

Блок измерителя мощности в соединении с блоком коммутатора измерителя мощностей (349) позволяет проводить одновременную регистрацию активных и реактивных мощностей (до 600 Вт и до 600 ВАр) в нескольких точках модели сети.

Значения мощностей снимаются по показаниям аналоговых («стрелочных») щитовых приборов – ваттметра и варметра. Это приборы магнитоэлектрической системы, т.е. – с равномерной шкалой, и отклонение их указателя пропорционально току, протекающему через прибор. Встроенные в блок преобразователи обеспечивают пропорциональность тока измеряемой активной или реактивной мощности.

Так как мощность пропорциональна току и напряжению, для измерения мощности, потребляемой каким-нибудь объектом, к измерителю мощности необходимо подключить источники тока и напряжения. Поэтому любой измеритель мощности имеет две внутренних цепи: токовую, включаемую как амперметр (последовательно) и цепь напряжения, подключаемую как вольтметр (параллельно). Из четырех выводов этих цепей одна пара выводов, обращаемых на схемах моделей к источнику (генераторные выводы) образует узел внутри блока измерителя. Поэтому на панели блока измерителя имеются, связанные мнемосхемой, только три вывода приборов. Эти выводы можно подключить к интересующему объекту непосредственно или через коммутатор, позволяющий, не меняя режима

и без изменения цепи, провести регистрацию мощностей сразу в пяти различных точках модели сети.

Пример включения измерителя мощностей показан на рис. 1.3.

Необходимо учитывать, что нулевое положение указателей приборов находится посередине шкалы. Значит, приборы учитывают не только характер (индуктивный или емкостный) реактивной составляющей мощности, но также регистрируют изменение направления потока мощности.

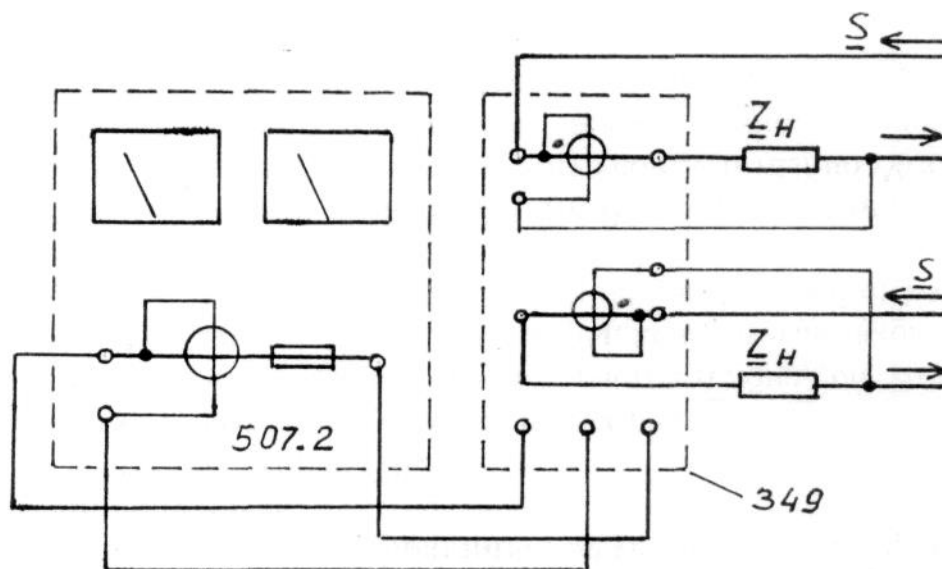


Рис. 1.3. Пример включения измерителя мощностей.

Число делений шкалы приборов – 15. Цена деления определяется отношением к этому числу величины произведения установленных пределов по напряжению и току. приборная погрешность измерений – порядка 2,5 %.

На панели блока в ходе экспериментов требуют также внимания выключатель сетевого питания, переключатель чувствительности измерителя (положения «x 10» и «x 1»), переключатели пределов измерения по напряжению и току и переключатель режима измерений – его положения «P», «P,Q» и «Q». для работы удобен режим «P,Q», остальные позиции необходимы в случаях, когда один из приборов «зашкаливает» (при $P \gg Q$ или наоборот).

Светодиоды на панели сигнализируют о выходе получаемого прибором напряжения или тока за предел, установленный переключателем пределов, и о необходимости перехода на иной предел.

3.2.6. Блок мультиметров

Блок мультиметров включается в работу только после включения сетевого питания (220 В).

В лаборатории мультиметры используются, в основном, для измерения и контроля действующего значения напряжений.

До включения блока для каждого мультиметра необходимо провести следующие операции:

установка рода напряжения – на шкале переключателя выбирается диапазон переменного напряжения;

установка наибольшего предела измерений – 750 В;

проверка правильности присоединения к исследуемой цепи гнезд-выводов «СОМ» и «V».

При наличии питания блока, мультиметр начинает давать показания после двукратного нажатия кнопки «Power».

На пределе измерений «750 В» разрешение прибора – 1 В, точность – $1,2 \% \pm 3$ ед. счета.

4. Задание

А. Изучить содержание настоящих методических указаний.

Б. Определить согласно п.5 «Указания к лабораторному моделированию» соответствия предлагаемых в работе схем электрических сетей и схем их натуральных моделей.

В. Составить на лабораторном стенде модель электрической сети по одной из предлагаемых схем. Правильность сборки цепи проверяется преподавателем.

Г. Составить отчет, в котором:

1) изложить цель и содержание работы;

2) изобразить все рассматриваемые в работе варианты однолинейных схем электрических сетей с пояснениями их сущности и указанием рисунков схем соответствующих натуральных моделей;

3) привести электрическую схему составленной в работе модели сети с обозначениями типов и названий включаемых блоков-модулей;

4) дать письменные ответы на контрольные вопросы п.6.

5. Указания к лабораторному моделированию

Несколько схем электрических сетей и схем их натуральных моделей, предлагаемых здесь для получения начального опыта моделирования, приведены на рис. 1.4. и 1.6. – 1.9.

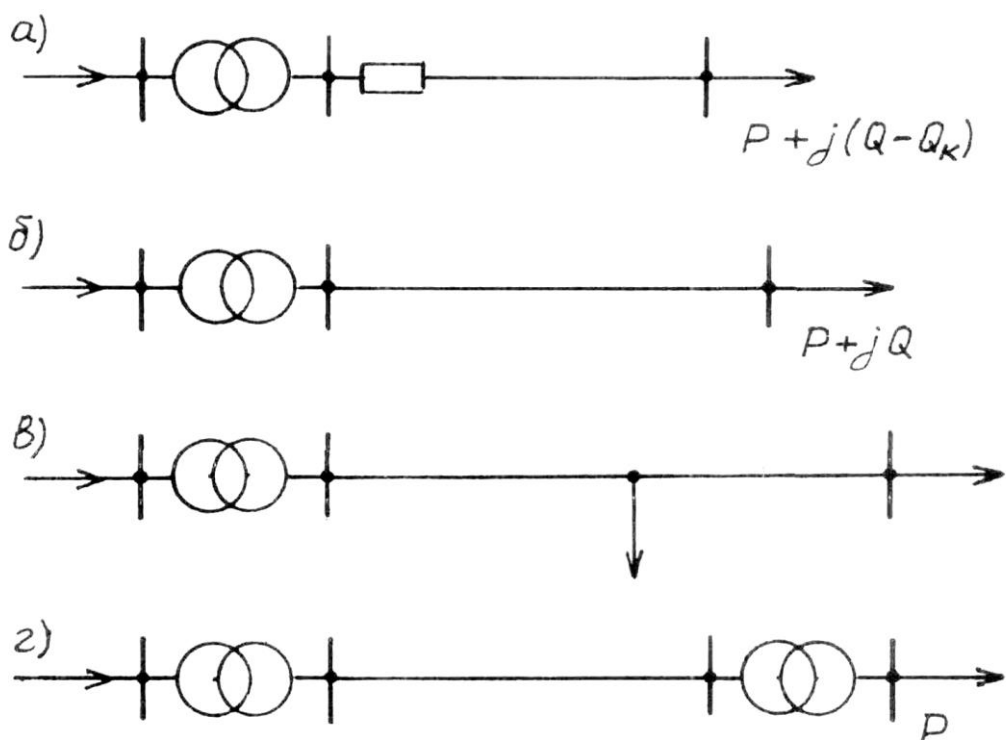


Рис. 1.4. Схемы электрических сетей.

Согласно заданию требуется, обращаясь вначале к рис. 1.4., определить схему сети, соответствующую каждому из следующих понятий:

- ЛЭП радиальной сети;
- передача с компенсацией реактивной мощности;
- ЛЭП сети районного значения;
- магистральная сеть.

Затем необходимо установить взаимные соответствия схем сети и электрических схем натуральных моделей.

Рекомендуемый порядок действий:

- 1) изучить на лабораторном стенде состав его комплекта оборудования, подготовленного к началу занятия;
- 2) определить схему модели, электрическую цепь которой можно реализовать на компонентах установленного комплекта;
- 3) составить электрическую цепь определившегося варианта модели сети.

Составляя модель, вначале следует соединить гнезда защитного заземления тех блоков, которые включаются в электрические цепи модели, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания.

Чтобы избежать ошибок и потерь времени, при составлении цепей модели необходимо четко определить, какие цепи токовые и какие надо отнести к цепям напряжения. Токовые цепи образуют контуры, в которые входят обмотки питающих трансформаторов, контакты

выключателей, участки линий, сопротивления нагрузок, амперметры и последовательные элементы измерителей мощности.

Сборку и проверку цепей рекомендуется проводить именно по контурам: начинать от источника, затем, обходя последовательно все элементы каждого из контуров, вернуться к источнику.

Цепи напряжения – это цепи присоединяемых вольтметров и элементов цепей напряжения измерителей мощности. Соединения этих цепей выполняются в последнюю очередь.

Необходимо понимать, что все компоненты – блоки модели сети сами являются моделями элементов или частей реальной сети – силовых трансформаторов, линий, нагрузок и т.д. Это позволяет с самого начала и в последующем в учебных целях воспринимать все элементы модели в терминах и понятиях курса электрических сетей. С этим связаны и некоторые правила составления моделей.

Например, в реальной линии, а значит и в ее модели есть передающий и приемный концы, и если необходимо измерять напряжение приемного конца, то в модели линии вольтметр следует подключить к выводам-гнездам именно выходной стороны блока. Это поясняет также рис. 1.5.: приемлемое присоединение выполняется согласно рис. 1.5, б, несмотря на то, что в этом случае могут потребоваться более длинные соединительные провода.

Данная лабораторная работа выполняется без подключения модели к сети лаборатории. Во всех последующих работах лабораторного цикла начальным пунктом техники безопасности является следующее обязательное положение: после проверки правильности собранной схемы первое ее включение делает преподаватель.

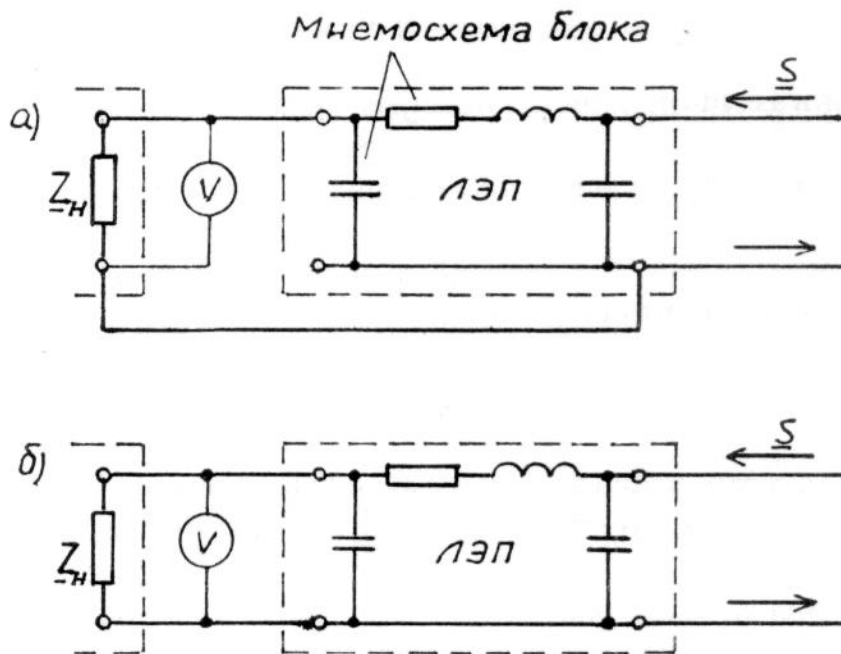


Рис. 1.5. Присоединение вольтметра
а) некорректное; б) правильное присоединение

6. Вопросы для самопроверки

1. Что принято понимать под натурным моделированием электрической сети?
2. Объясните сравнительные преимущества модульного принципа составления моделей сети?
3. Если составляемая электрическая цепь является моделью распределительной сети, то что из комплекта лабораторного стенда должно представлять модель питающей сети? Какие блоки служат аналогом подстанции связи с питающей сетью?
4. Что представляет собой блок модели ЛЭП? Как используется этот блок в качестве модели одной фазы ЛЭП и в трехфазном режиме? Можно ли использовать один блок для моделирования двух или трех линий?
5. Какова очередность действий при составлении модели сети, подготавливаемой к включению под напряжение?
6. Укажите органы управления включением и отключением питания всей модели. Где находится кнопка для экстренного отключения напряжения?
7. как выполняется подготовка блока источника питания к включению в сеть лаборатории? Какие еще модули требуют индивидуального питания?
8. Как регулируется напряжение питания работающей модели?

9. Поясните схему корректного включения зажимов измерителя мощности.
10. Объясните содержание лабораторной работы в соответствии с заданием.
11. Укажите взаимно соответствующие определения электрических сетей (по п.5), номера рисунков однолинейных схем сетей и схем их натуральных моделей.

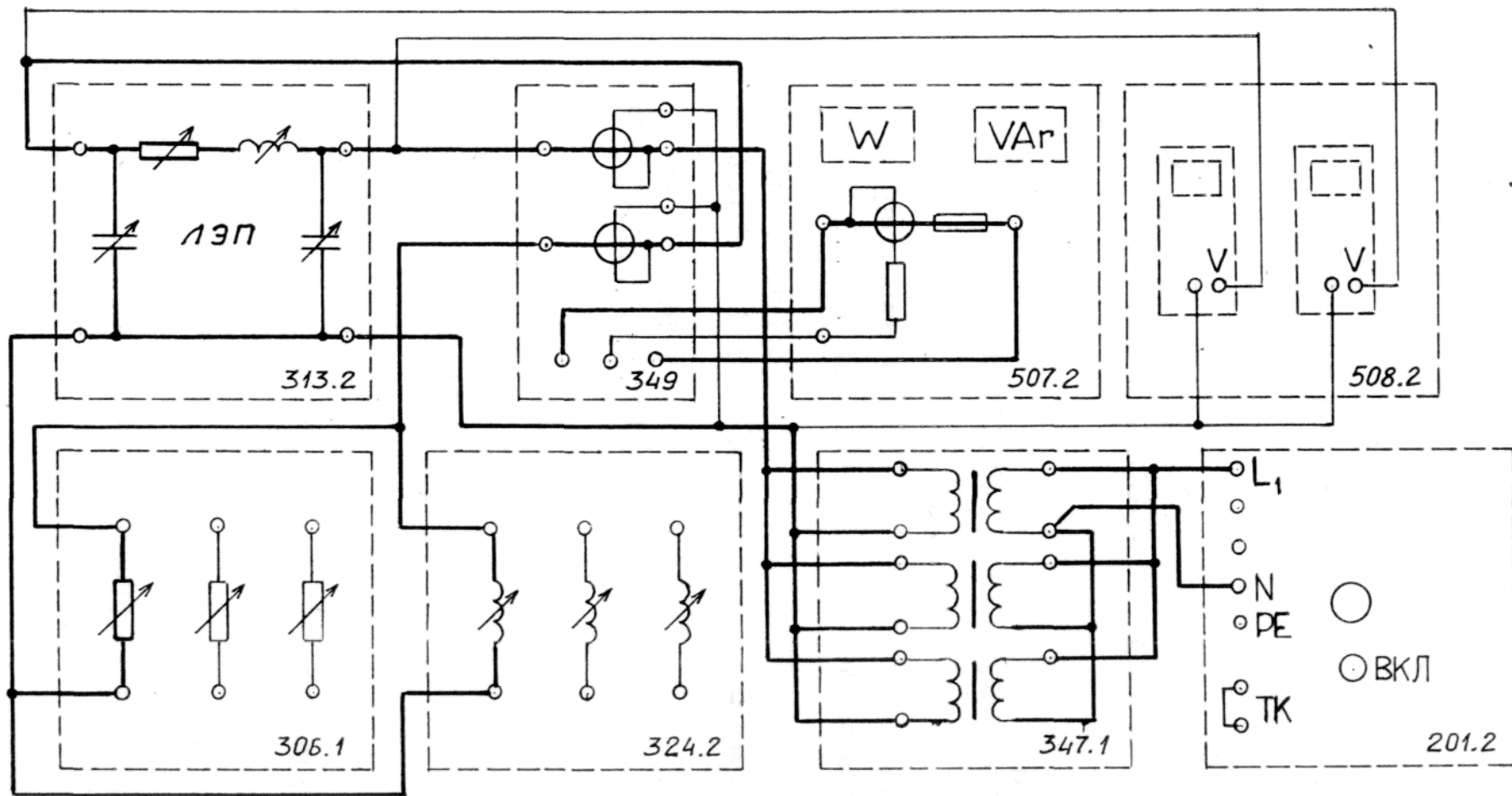


Рис. 1.6. Схема модели электрической сети

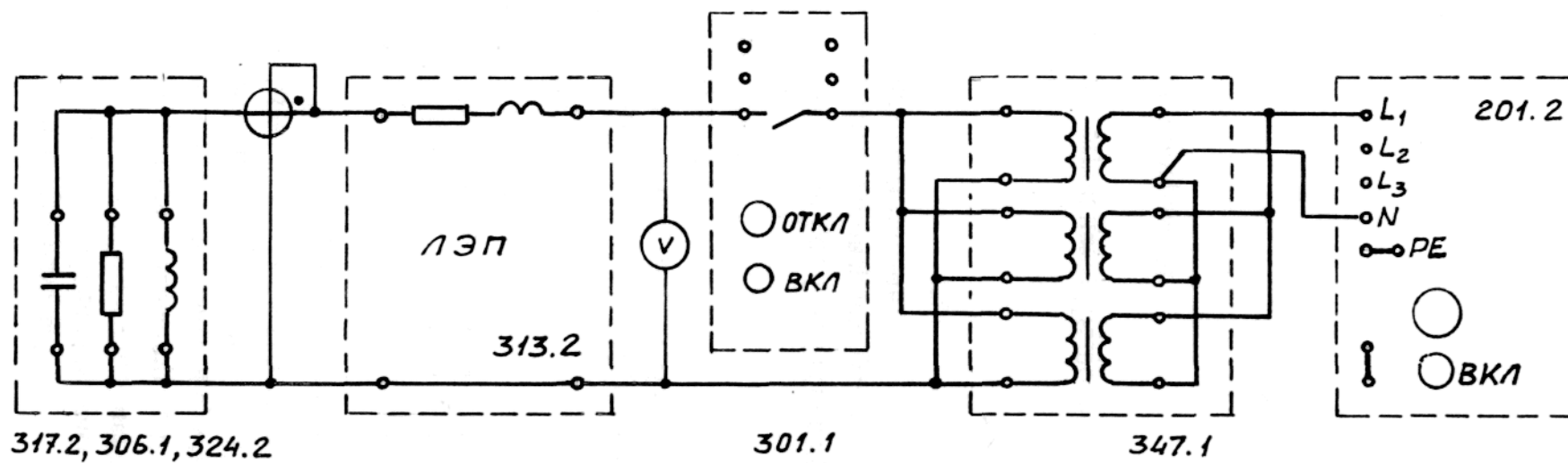


Рис. 1.7. Схема модели электрической сети

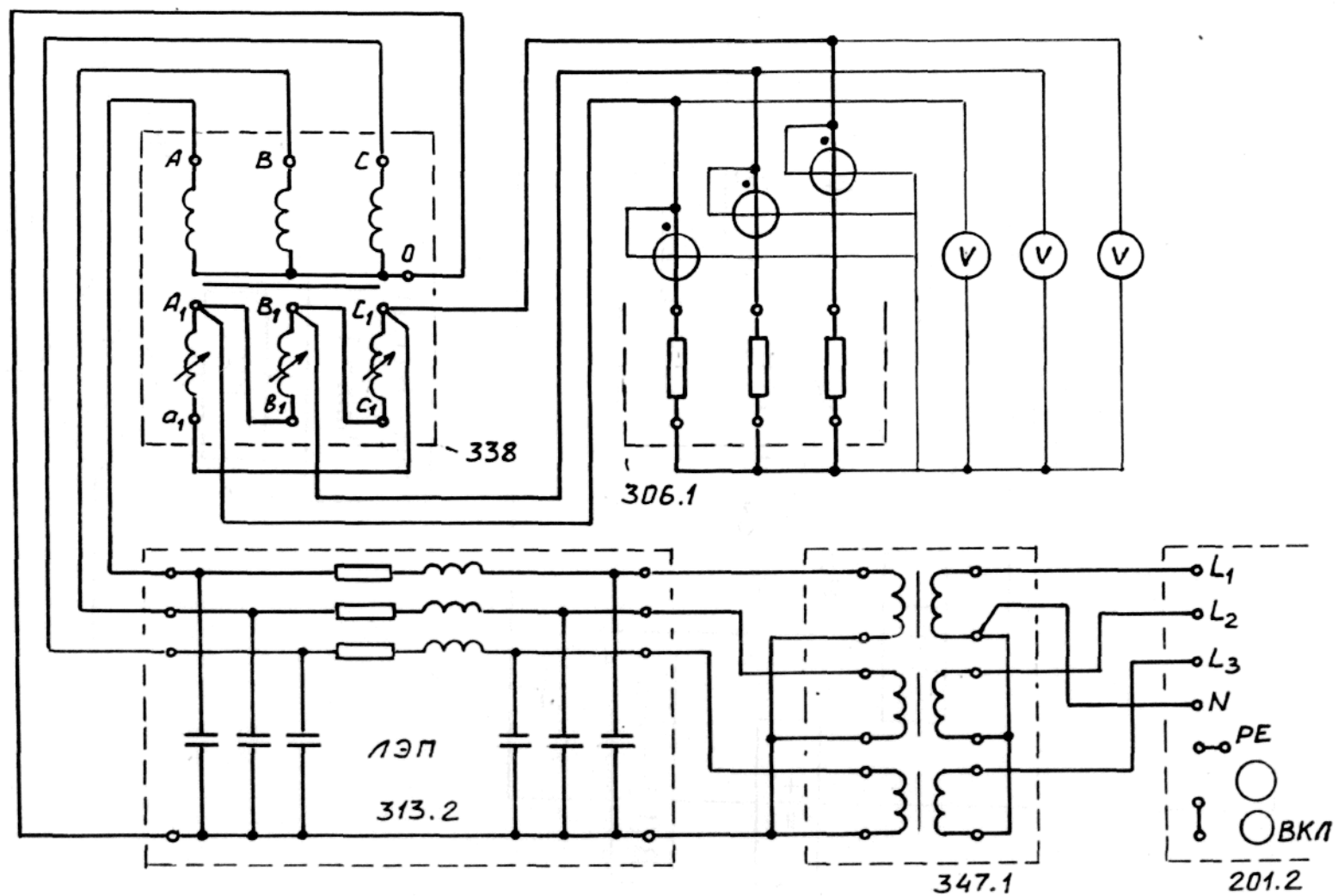


Рис. 1.8. Схема модели электрической сети

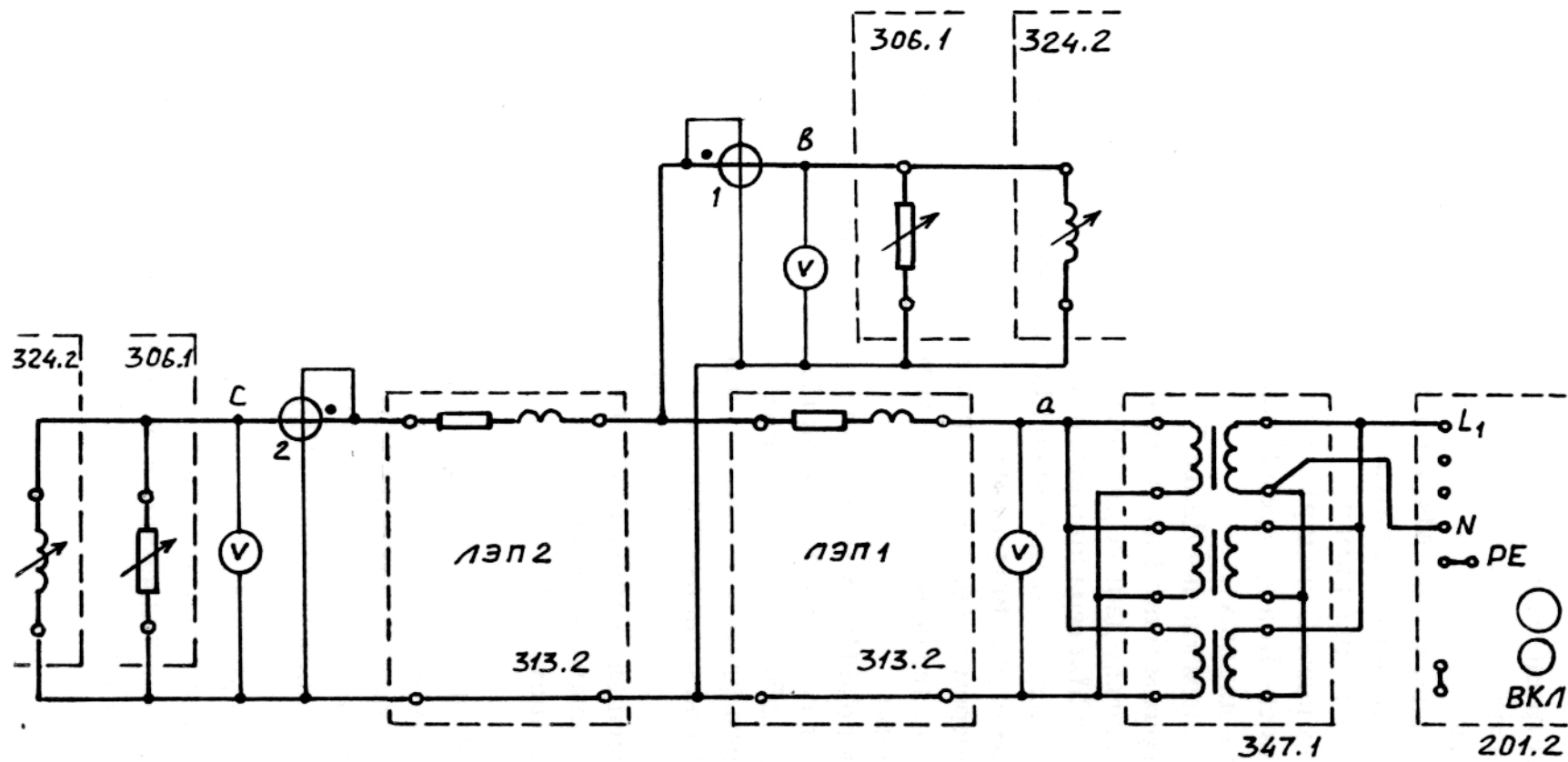


Рис. 1.9. Схема модели электрической сети

Лабораторная работа № 2.

Зависимость режима электрической сети от коэффициента мощности нагрузок.

Введение

Основную электрическую нагрузку большинства промышленных предприятий составляют трехфазные асинхронные двигатели. По характеру – это активно-индуктивная нагрузка. Схему замещения такой нагрузки можно привести к простому последовательному или параллельному соединению активного и индуктивного элементов, сопротивления или проводимости которых можно определить, например, по данным измерений режима. Важно то, что значения сопротивлений или проводимостей обоих элементов не только всегда отличны от нуля, но часто оказываются одного порядка. Значит, естественно, что двигатель и вся нагрузка (цеха, предприятия) получает номинальную активную мощность при неизбежном потреблении так же реактивной мощности, причем реактивная мощность нередко превышает потребляемую активную мощность.

Когда возникает вопрос об эффективности использования электроэнергии, потребляемую активную и реактивную мощности необходимо сопоставить. Например, взять отношение $(Q/P) = \operatorname{tg} \varphi$. Гораздо чаще используется отношение $(P/\sqrt{P^2 + Q^2}) = \cos \varphi$ – «коэффициент мощности». Величина $\cos \varphi$ – универсальная, она входит в набор номинальных параметров единичных приемников энергии и генераторов и так же характеризует режим потребления, как отдельной единицы нагрузки, так и объединенной (суммарной) нагрузки целого предприятия.

Общее требование – повышение коэффициента мощности. По причине низкого $\cos \varphi$ нагрузок:

- увеличиваются потери мощности и напряжения в электрической сети;
- понижается коэффициент мощности работающего генератора, т. е. при неизменной полной мощности он может отдавать в сеть меньшую активную мощность;
- для передачи необходимой потребителям активной мощности требуется сооружение линий и применение трансформаторов с большей пропускной способностью, что связано так же с усложнением и удорожанием эксплуатации.

В настоящей работе лабораторный эксперимент проводится на модели фазы простой сети. В качестве нагрузки ВЛ для удобства регулирования ее коэффициента мощности с возможностью быстрого восстановления

зарядного значения активной мощности выбран вариант параллельного соединения активного и индуктивного элементов.

В итоге выполнения работы, анализируя данные опытов и связанных с ними расчетов, следует определить выводы о результатах последовательной «замены» в ряду приемников энергии, различающихся при одинаковой величине потребляемой полезной мощности значениями реактивной мощности, необходимой им в «естественном» режиме потребления.

1. Цель и содержание работы

Целью работы является определение посредством эксперимента и сопутствующих расчетов характера зависимостей параметров режима электрической сети от коэффициента мощности и нагрузок.

В эксперименте проводится регистрация совокупности параметров ряда режимов сети с условием, что должны задаваться изменения только реактивной потребляемой мощности. Выполняется так же сравнительный расчет режима ЛЭП по данным начала или конца передачи, взятыми по выбору из данных измерений.

2. Задание

2.1. Изучить п. 3 «Указания по работе в лаборатории».

2.2. Составить натуральную модель одной фазы ВЛ.

2.3. Установить параметры линии и элементов нагрузки, указанные в п.

3.3.

2.4. Включить питание модели. Провести эксперимент согласно указаниям п. 3.3.

Условимся считать, что установление в опытах очередного нового значения реактивной потребляемой мощности $Q_{2\phi}$ означает замену прежнего потребителя другими – с отличающимся значением коэффициента мощности.

Показания приборов рекомендуется включать сразу в таблицу, подготовленную по форме табл. 3.2.

По данным измерений определить все величины, указанные в табл. 2.

2.5. Построить совмещенный график зависимостей от $\cos \varphi_2$ реактивной и полной мощности нагрузок, величины потерь в ЛЭП, к.п.д. передачи, а так же – напряжения, полной мощности и $\cos \varphi_1$ источника питания.

2.7. Дать оценку характера полученных зависимостей и определить связанные с ними выводы в отношении практических требований к нагрузке.

2.8. Построить векторную диаграмму мощностей – начала передачи, соответствующих максимальному и минимальному значениям $\cos \varphi_1$.

2.9. Провести сравнительный расчет передачи мощности по П-образной схеме замещения ВЛ. Исходными данными – начала или конца передачи – являются при известных характеристиках модели ВЛ параметры такого режима опытов, который выбирается для сравнений.

3. Указания по работе в лаборатории

3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Табл. 3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Наименование	Тип	Кол-во	Параметры
1	2	3	4
1. Трехфазный источник питания	201.2	1	400В~; 10А
2. Регулировочный трансформатор	338	1	3х220/3х90...140В
3. Модель линии электропередачи	313.2	1	
4. Активная нагрузка	306.1	1	220/380В~ 3х0...50 Вт
5. Индуктивная нагрузка	324.2	1	220/380В~ 3х0...40 Вар
6. Коммутатор измерителя мощностей	349	1	5 положений
7. Измеритель мощностей	507.2	1	15;60;150;300В 0,05;0,1;0,2 А
8. Блок мультиметров	508.2	1	0...700 В

3.2. Описание электрической схемы модели

Электрическая схема натуральной модели к лабораторной работе «Зависимость режима электрической сети от коэффициента мощности нагрузок» дана на рис. 2.1.

Объектом исследования является простая сеть, включающая ЛЭП с нагрузкой, потребляющей активную и реактивную мощность. Модель одной фазы линии представляет один четырехполюсник модуля 313.2. Нагрузка линии составляет параллельным соединением одного резистора и пары катушек индуктивности модулей 306.1 и 324.2.

Узел питания линии составляют трехфазный источник питания (201.2) и регулировочный трехфазный трансформатор (338), подключаемый к блоку

источника питания по схеме $Y0/\Delta$. Для питания ЛЭП используется одна фаза вторичной обмотки трансформатора.

Измерение напряжений выполняется мультиметрами (508.2).

Измеритель мощностей подключается к началу или к концу передачи через свой коммутатор. Номера положений ручки коммутатора должны соответствовать номерам «ваттметров», обозначенным на схеме рис. 2.1.

Связь натурной модели с сетью питания лаборатории 380 В осуществляется через блок трехфазного источника питания. Для работы блоков мультиметров и измерителя мощностей подводится индивидуальное питание напряжением 220В.

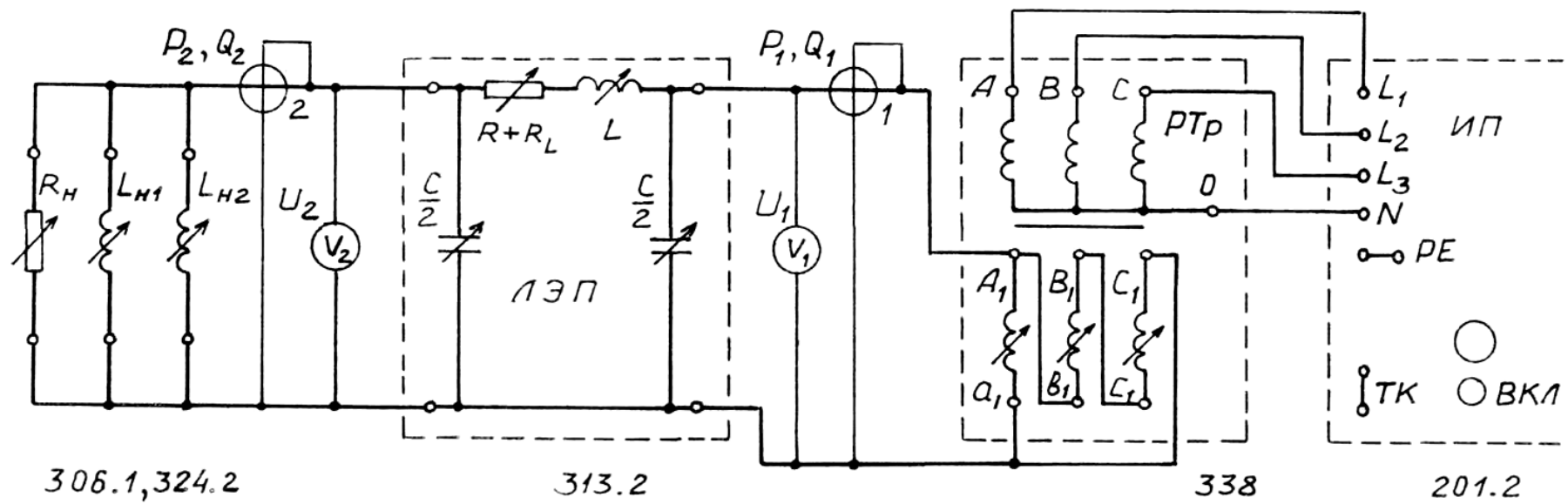


Рис. 2.1. Схема соединений модели установившегося режима одной фазы ЛЭП

3.3. Проведение экспериментов

Все используемые блоки-модули должны располагаться на соседних стендах.

Убедиться, что основной (трехфазный) источник питания и все блоки, требующие индивидуального питания, отключены от сети лаборатории.

Соединить гнезда защитного заземления используемых модулей с гнездами «РЕ» трехфазного источника питания.

Выполнить соединение натуральной модели по схеме рис. 2.1.

Установить (по указанию преподавателя) вариант следующих параметров частей модели:

Линия: а) $R+R_L=58$ Ом; $L=0,3$ Гн; $C/2=0,18$ мкФ

б) $R+R_L=66$ Ом; $L=0,6$ Гн; $C/2=0,18$ мкФ

Нагрузка: $R_n=100\%$; $L_n=50\%$.

Включить питание модели. Меняя напряжение трансформатора в пределах 125-145 В, установить значение активной потребляемой мощности $P_{2\phi}$ в пределах 15 – 20 Вт в варианте а) или в пределах 13 – 18 Вт – в варианте б). Установленное значение $P_{2\phi}$ фиксируется в первой графе табл. 3.2, и в последующей работе оно должно быть величиной постоянной.

Далее путем изменения L_n выполняется в диапазоне 50% - 150% ступенчатое наращивание реактивной потребляемой мощности $Q_{2\phi}$.

Замечаем: задающим изменением в опытах является изменением индуктивности L_n . Но режим, который вызван только изменением L_n , не подлежит измерениям. Каждый раз, чтобы окончательно установить очередной регистрируемый режим, после переключений на новое значение L_n регулированием напряжения трансформатора следует добиться наибольшего приближения мощности $P_{2\phi}$ к ранее фиксированному значению. Затем снимаются показания приборов.

При использовании только двух параллельных катушек блока 324.2 возможен следующий ряд значений реактивной мощности – в процентах, указанных на панели блока: 0; 25; 50; 70; 100; 125; 150; 175; 200. Чтобы получить удовлетворительные кривые на графике зависимостей от $\cos^2 \varphi_2$, достаточно взять 4-6 значений в диапазоне 50% - 150%.

В ходе считывания показаний стрелочных измерителей мощности для минимизации «персональной» погрешности следует смотреть на шкалу прибора прямо, а не слева или справа. Необходимо внимательно следить за сигнальными лампочками измерителя мощностей. Недопустимы измерения при засвечивании красных лампочек. При красном сигнале следует переходить на другой приборный диапазон – по току или напряжению, учитывая изменение цепи деления шкалы мощностей.

По окончании экспериментов отключить питание модели и индивидуальное питание измерительных модулей.

Табл. 3.2 Результаты измерений

Линия: $R+RL = \text{Ом}; L = \text{Гн}; C/2 = 0,18 \text{ мкФ}$

$L_H, \%$						Примечание
$P_2, \text{Вт}$						Постоянная
$Q_2, \text{ВАр}$						Задается
$U_2, \text{В}$						
$\dot{S}_2, \text{ВА}$						$P_2 + jQ_2$
$\cos \varphi_2$						P_2 / S_2
$P_1, \text{Вт}$						
$Q_1, \text{ВАр}$						
$U_1, \text{В}$						
$\dot{S}_1, \text{ВА}$						$P_1 + jQ_1$
$S_1, \text{ВА}$						
$\cos \varphi_1$						P_1 / S_1
$\Delta P_n, \text{Вт}$						
$\Delta Q_n, \text{ВАр}$						
к.п.д., %						P_2 / P_1

4. Методические указания

4.1. График зависимостей от коэффициента мощности нагрузок

Замечаем, что поскольку $\cos \varphi_2 = 0$ практически не бывает, а минимальное значение $\cos \varphi_2$ в опытах получается не ниже 0,5 – 0,6, равномерный ряд значений $\cos \varphi_2$, отмечаемых от начала координат на горизонтальной оси, лучше начинать со значения, близкого к минимальному, например, так: 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.

Следует изобразить три оси ординат – так же с равномерными рядами значений вольт, Вт (ВА) и $\cos \varphi_1$.

4.2. Векторная диаграмма мощностей

Диаграмма мощностей начала передачи должна быть изображением векторов $\dot{S}'_1 = P'_1 + jQ'_1$ и $S''_2 = P''_2 + jQ''_2$, соответствующих максимальному и минимальному значениям $\cos \varphi_1$. Надо учесть, что активная компонента векторов совпадает с осью действительных, а реактивная имеет индуктивный характер.

Рекомендуемый масштаб векторов – 0,2 Вт/мм.

Наглядность векторной диаграммы сразу подводит к выводам об условиях, в которые попадает генератор, когда нагрузка «принуждает» его работать с низким $\cos\varphi_1$.

4.3. Расчёт потерь мощности по П-образной схеме замещения ЛЭП.

Расчёты передачи по П-образной схеме замещения выполняются для сетей районного значения – с напряжениями 110-220 кВ и выше.

Рассмотрим, обращаясь к обозначениям схемы замещения ЛЭП на рис. 2.2, краткое обоснование ряда расчётных формул.

А. Известны данные $\dot{S}_{1\phi}$ и $U_{1\phi}$ начала передачи.

Потери активной и реактивной мощности в одной фазе линии

$$\Delta P_{\phi} = RI_{зв}^2, \quad \Delta Q_{\phi} = XI_{зв}^2,$$

где $I_{зв}$ – ток звена линии. Так как $I_{зв} = (S_{1зв}/U_{1\phi})$, то

$$\Delta P_{\phi} = \left(\frac{S_{1зв}}{U_{1\phi}} \right)^2 R \quad (1)$$

$$\Delta Q_{\phi} = \left(\frac{S_{1зв}}{U_{1\phi}} \right)^2 X$$

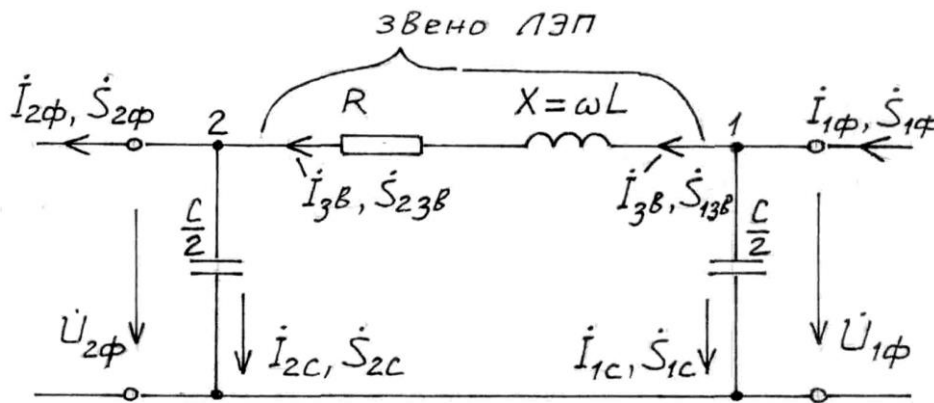


Рис. 2.2. П-образная схема замещения ЛЭП

В этих формулах $S_{1зв}$ – полная мощность, поступающая на вход звена линии. Её выражение находим, по закону Кирхгофа. Для узла 1:

$$\dot{I}_{1\phi} = \dot{I}_{зв} + \dot{I}_{1c}$$

Умножая это уравнение на напряжение $\dot{U}_{1\phi}$ того же узла 1, имеем:

$$\dot{U}_{1\phi}^* \dot{I}_{1\phi} = \dot{U}_{1\phi}^* \dot{I}_{зв} + \dot{U}_{1\phi}^* \dot{I}_{1c}$$

т.е.

$$\dot{S}_{1\phi} = \dot{S}_{1зв} + \dot{S}_{1c} \quad (2)$$

Зарядная мощность \dot{S}_{1c} пропорциональна проводимости $\omega C/2$:

$$\dot{S}_{1c} = -j\omega \frac{C}{2} U_{1\phi}^2$$

Следовательно,

$$\dot{S}_{13\phi} = \dot{S}_{1\phi} - \dot{S}_{1c} = P_{1\phi} + j(Q_{1\phi} + \omega \frac{C}{2} U_{1\phi}^2),$$

и полная мощность в (1)

$$S_{13\phi} = \sqrt{P_{1\phi}^2 + (Q_{1\phi} + \omega \frac{C}{2} U_{1\phi}^2)^2}$$

Замечаем: уравнение (2) по структуре не отличается от уравнения Кирхгофа для токов. Следовательно направление токов на схеме рис. 2 является также положительными направлениями потока мощности. Тогда уравнения для мощностей можно записывать сразу, - так, как будто существует узловой закон Кирхгофа для потоков мощностей.

Для перехода к трёхфазным мощностям и линейному напряжению достаточно выражение (1) умножить на три:

$$\Delta P = 3\Delta P_{\phi} = 3 \left(\frac{S_{13\phi}}{U_{1\phi}} \right)^2 R = 3 \left(\frac{S_{13\phi}}{U_1 / \sqrt{3}} \right)^2 R,$$

т.е.

$$\Delta P = \frac{(3S_{13\phi})}{U_1^2} R \quad \text{и} \quad \Delta Q = \frac{(3S_{13\phi})}{U_1^2} X$$

В этих формулах

$$3S_{13\phi} = 3 \sqrt{P_{1\phi}^2 + (Q_{1\phi} + \omega \frac{C}{2} U_{1\phi}^2)^2} = \sqrt{P_1^2 + (Q_1 + \omega \frac{C}{2} U_1^2)^2}$$

Б. Известны данные $\dot{S}_{2\phi}$ и $U_{2\phi}$ конца передачи.

Потери в одной фазе линии

$$\Delta P_{\phi} = R I_{3\phi}^2 = \left(\frac{S_{23\phi}}{U_{2\phi}} \right)^2 R \tag{3}$$

$$\Delta Q_{\phi} = X I_{3\phi}^2 = \left(\frac{S_{23\phi}}{U_{2\phi}} \right)^2 X$$

Согласно положительным направлениям мощностей «втекающих» в узел 2 приемного конца схемы замещения

$$\dot{S}_{23\phi} = \dot{S}_{2\phi} + \dot{S}_{2c}$$

Здесь зарядная мощность $\dot{S}_{2c} = -j\omega \frac{C}{2} U_{2\phi}^2$. Поэтому

$$\dot{S}_{23\phi} = P_{2\phi} + jQ_{2\phi} + (-j\omega \frac{C}{2} U_{2\phi}^2) = P_{2\phi} + j(Q_{2\phi} - \omega \frac{C}{2} U_{2\phi}^2)$$

и полная мощность, которую следует подставить в (3)

$$S_{2\text{ф}} = \sqrt{P_{2\text{ф}}^2 + (Q_{2\text{ф}} - \omega \frac{C}{2} U_{2\text{ф}}^2)^2}$$

Формулы трёхфазных потерь мощности для симметричного режима получаем умножением на (3) на три

$$\Delta P = \frac{(3S_{2\text{ф}})^2}{U_2^2} R; \quad \Delta Q = \frac{(3S_{2\text{ф}})^2}{U_2^2} X$$

Здесь $U_2 = \sqrt{3}U_{2\text{ф}}$ - линейное напряжение в конце передачи;

$$3S_{2\text{ф}} = \sqrt{P_2^2 + (Q_2 - \omega \frac{C}{2} U_2^2)^2}$$

5. Вопросы для самопроверки

1. Что включает информация, которую представляет числовое значение коэффициента мощности? В чём состоит смысл понятия «естественный коэффициент мощности»?
2. Поясните различие понятий «коэффициент мощности единицы электрооборудования» и коэффициент мощности места потребления энергии. Как определяется коэффициент мощности ЛЭП с нагрузками?
3. Объясните зависимости потерь мощности и напряжения в ЛЭП от $\cos\varphi$ нагрузок.
4. Положим, источник питания работает с неизменным напряжением, а $\cos\varphi$ нагрузки возрастает.
5. Приведите физическое объяснение изменений в следующей цепи зависимостей: реактивная мощность - ток линии - потери при передаче - напряжение нагрузки - полезная мощность нагрузки.
6. Как выполняется в лабораторной работе «замена» нагрузок с постоянной потребляемой активной мощностью, но с разными значениями $\cos\varphi$?
7. Почему в лабораторной работе с изменением $\cos\varphi$ меняется напряжение и коэффициент мощности источника питания?
8. Работающий генератор регулируется так, чтобы при измененном напряжении полная мощность S , отдаваемая им в сеть, не превосходила допустимого для него значения $S_{\text{ном}}$. Почему следует говорить, что при низком $\cos\varphi$ потребителей даже при $S \approx S_{\text{ном}}$ генератор используется не эффективно?
9. Поясните применение П-образной схемы замещения для обоснования схемы замещения для обоснования формул расчёта потерь мощности в ЛЭП.

Лабораторная работа № 3.

Исследование электрической сети с односторонним питанием.

Введение

Сети с односторонним питанием («разомкнутые сети») в электроэнергетике составляют наиболее многочисленную категорию. Такие сети в большинстве относятся к сетям местного значения, подающим электроэнергию потребителям на расстояния до 20-30 км при напряжении 6, 10 и 35 кВ.

В проектировании и практическом устройстве любой сети во всем множестве решаемых технико-экономических и иных инженерных задач все принципиальные решения сопряжены с электрическими расчетами сети. Электрические расчеты имеют большое значение, так как в реальных сетях из-за неизбежных изменений нагрузок происходит непрерывный процесс перераспределения потоков мощности, изменения напряжений и мощности, потребляемой всеми нагрузками. При этом всегда необходимо определять предельно допустимые значения и соответствующие технические меры.

В теме настоящей лабораторной работы уделяется внимание следующим вопросам анализа режимов:

- распределение в сети потоков мощности;
- потери мощности в линиях;
- потери и падения напряжения на участках сети;
- расчеты режимов по данным начала передачи.

В качестве предмета исследования в работе используется натурная модель фазы сети с односторонним питанием. Моделью каждого участка является упрощенный четырехполюсник схемы замещения линии местной сети, где поперечная проводимость, обусловленная несовершенством изоляции и ёмкостью линий, незначительна и не учитывается.

В экспериментальной части работы студенты получают определенные знания о поведении сети как инженерного объекта. При обработке данных эксперимента студенты применяют, а следовательно углубляют и закрепляют знание методов расчета.

Итогом работы является отчет, выполненный в соответствии с приведенными здесь указаниями.

1. Цели и содержание работы

Целями работы являются:

- экспериментальное изучение поведения сети с односторонним питанием в зависимости от режимов ее передающего и приемных концов;

- углубление знаний о методах анализа и расчета режимов разомкнутых сетей.

В эксперименте составляется натуральная модель работы одной фазы простой разветвленной сети с односторонним питанием. На модели проводится исследование потокораспределения и режима напряжений в узловых точках сети при изменении режима питающего источника и распределения нагрузок.

С исходными данными, взятыми из результатов измерений, проводятся расчеты потерь мощности и напряжения, потокораспределения мощностей и напряжений по методикам электрического расчета разомкнутой сети.

Выполняется графическое представление зависимостей параметров режимов, анализ зависимостей с задачей определения инженерных выводов.

2. Задание

2.1. Изучить п.3 «Указания по работе в лаборатории».

2.2. Составить натурную модель работы одной фазы сети.

2.3. Установить параметры линий и нагрузок, указанные в п. 3.3 «Проведение экспериментов».

2.4. Включить питание модели. Согласно указаниям п. 3.3.

А. Изменяя напряжение питания сети, выполнить измерения распределений в сети мощности и напряжения. Данные измерения внести таблицу по форме табл. 3.2

Б. Провести измерения режимов сети при изменении нагрузки одной из линий. Данные опытов вносятся в таблицу, подготовленную по форме табл. 3.3.

2.5. По опытным данным каждой графы табл. 3.2 рассчитать потокораспределение (т.е. линейные мощности S_1, S_2, S_3 и S_4) без учета потерь. Построить совмещенный график зависимостей полных линейных мощностей от напряжения питания сети U_a . Привести так же опытную кривую $S_1(U_a)$, объяснить ее отличие от соответствующей расчетной кривой.

2.6. По опытным данным индивидуального варианта графы в табл. 3.2 выполнить «уточненный» расчет потокораспределения и расчет напряжений всех узловых точек сети (см. п.4 «Методические указания»). Результаты расчетов объединить в таблице по форме табл. 4.1.

2.7. По опытным данным табл. 3.3. построить в зависимости от мощности изменяемой нагрузки график напряжений и мощностей нагрузок других линий и мощности S_1 , поступающей в сеть. Определить выводы о влиянии в сети колебаний одной из нагрузок.

3. Указания по работе в лаборатории

3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Табл. 3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Наименование	Тип	Кол-во	Параметры
1	2	3	4
1. Трёхфазный источник питания	201.2	1	400В~; 10А
2. Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	1	230В~; 3x80ВА
3. Модель линии электропередачи	313.2	3	-
4. Активная нагрузка	306.1	2	220/380В~; 3x0...50 Вт
5. Индуктивная нагрузка	324.2	1	220/380В~; 3x0...40 Вар
6. Коммутатор измерителя мощностей	349	1	5 положений
7. Измеритель мощностей	507.2	1	15;60;150;300В; 0,05;0,1;0,2 А
8. Блок мультиметров	508.2	1	0...700 В

3.2 Описание электрической схемы модели

Схема соединений натурной модели к лабораторной работе представлена на рис. 3.1, б.

Объектом исследования является одна фаза разветвленной разомкнутой электрической сети, состоящей из нескольких участков с нагрузками.

Моделью каждого участка (линии) служит один из четырёхполюсников модулей 313.2: для линий Л1 и Л3 используются отдельные модули, для участков Л2 и Л4 – общий блок.

Для составления нагрузок Z_c , Z_d и Z_f применяются два блока активных сопротивлений (306.1) и один блок индуктивных сопротивлений (324.2).

Узел питания модели составляют основной – трёхфазный источник питания (201.2) и блок трансформаторной группы (347.1), в котором все три однофазных трансформатора следует соединить параллельно. В блоке группы имеется переключатель секций обмоток, что позволяет регулировать напряжение.

Для измерения напряжений используются мультиметры модуля 508.2.

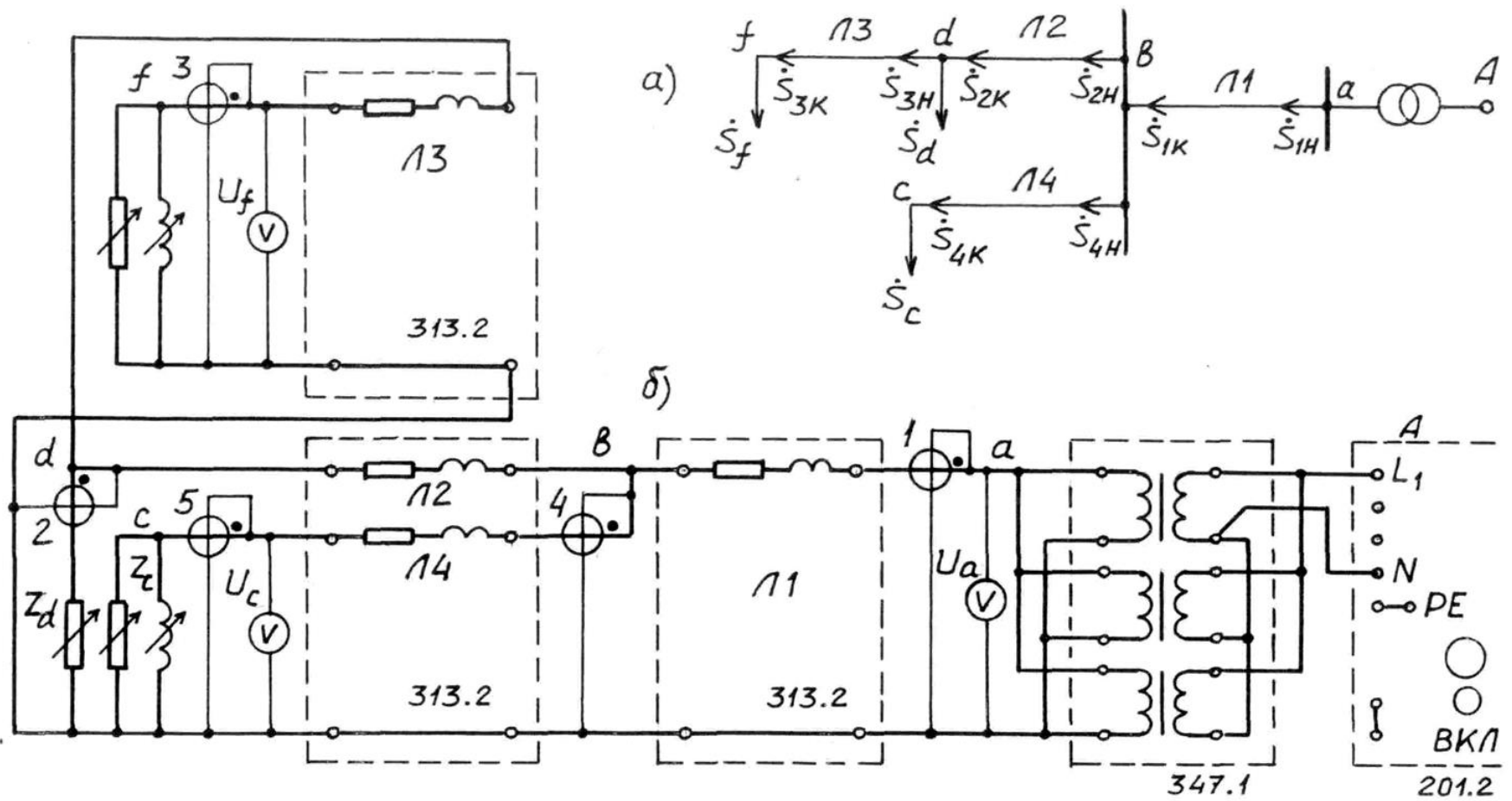


Рис. 3.1. Электрическая сеть с односторонним питанием:
 а) – однолинейная схема; б) – схема соединений на модели сети в однофазном исполнении

Измерители мощности присоединяются к точкам измерений через свой коммутатор (блоки 507.2 и 349). Номер подключаемого «ваттметра» коммутатора должны совпадать с номером, указанным на схеме.

К блокам мультиметров и измерителя мощностей подводится отдельное питание.

3.3. Проведение экспериментов

Все блоки-модули, используемые в работе, следует расположить на двух соседних стендах.

Убедиться, что основной (трёхфазный) источник питания модели (блок 201.2) и блоки измерительных приборов, требующие индивидуального питания, отключены от сети лаборатории.

Соединить гнёзда защитного заземления используемых модулей с гнездом «РЕ» основного источника питания.

Выполнить электрические соединения натурной модели по схеме рис. 3.1, б.

Установить следующие параметры линий:

Л1: $R+R_L=58$ Ом; $L=0,3$ Гн; $C/2=0$;

Л2: $R+R_L=58$ Ом; $L=0,3$ Гн; $C/2=0$;

Л3: $R+R_L=58$ Ом; $L=0,3$ Гн; $C/2=0$;

Л4: $R+R_L=66$ Ом; $L=0,6$ Гн; $C/2=0$.

Параметры нагрузок:

$R_c - 50\%$; $R_d - 100\%$; $R_f - 50\%$; $L_c - 50\%$; $L_f - 50\%$.

Удостовериться в правильности определения соответствия обозначений на электрической схеме модели и однолинейной схеме сети также – соответствия в натурной модели всех позиций коммутатора измерителя мощностей и вольтметров их месту измерений, указанному на схеме модели.

Работать по п. 2.4. «Задания».

Включить питание модели. Установить переключатель трансформаторной группы (347.1) в положение «242», что соответствует максимальному напряжению питания сети U_a .

Провести измерения режимов сети при изменении U_a , меняя позиции переключателя в соответствии с задающей первой строкой табл. 3.2.

Работать по п. 2.5. «Задания».

Установить переключатель трансформаторной группы в положение «220». Изменяя активное сопротивление нагрузки линии Л4 (в точке «С»), при неизменных значениях всех прочих параметров сети – провести измерения режимов в соответствии с задающей первой строкой табл. 3.3.

По окончании экспериментов следует отключить питание модели и индивидуальное питание блоков измерительных приборов.

Табл. 3.2. Измерения распределений мощности и напряжения

Переключатель блока трансформаторов	«242»	«235»	«230»	«226»	«220»
$U_a, В$					
$U_c, В$					
$U_f, В$					
$P_1+jQ_1, (ВА)$					
$P_2+jQ_2, (ВА)$					
$P_3+jQ_3, (ВА)$					
$P_4+jQ_4, (ВА)$					
$P_5+jQ_5, (ВА)$					

Табл. 3.3 Измерения режимов сети при изменении нагрузки одной из линий

$R_c, \%$	0	20	40	60	80	100
$U_a, В$						
$U_c, В$						
$U_f, В$						
$P_1+jQ_1, (ВА)$						
$P_2+jQ_2, (ВА)$						
$P_3+jQ_3, (ВА)$						
$P_4+jQ_4, (ВА)$						
$P_5+jQ_5, (ВА)$						

4. Методические указания

4.1 Расчеты по п.п. 2.5 и 2.6.

Распределение мощностей в разомкнутой сети является «принудительным» - определяется нагрузками разных точек сети. Оценка (по п. 2.5) такого потокораспределения соответствует первому этапу электрических расчётов: выполняется без учета потерь в участках. При этом полная мощность в каждом из участков сети получается суммированием значений мощности всех нагрузок, которые питаются по данному участку.

Задание по п. 2.6 исходит из того положения, что в местных сетях в большинстве случаев заданным является напряжение передающего конца. Поэтому приведённая ниже система расчётных операций уточнённого расчета мощностей и напряжений, который следует выполнить по данным индивидуальной графы табл. 3.2, соответствует расчёту от передающего

конца сети к её приемным концам, т.е. – по данным начала каждого из участков.

Надо иметь ввиду, что все измеренные и рассчитанные величины в работе – фазные. С целью упрощения записей можно рекомендовать приписывать обозначению каждой величины только «индексы места»: первый индекс – номер линии или буквенное обозначение узловой точки сети; второй индекс «н» или «к» - обозначение начала или конца участка.

Согласно п.2.6 и в соответствии с обозначениями на рис. 3.1, а:

$$\dot{S}_{1н}, \dot{U}_{1н} = U_a \Rightarrow \Delta P_1, \Delta Q_1, \dot{S}_{1к}; \Delta U_1, U_{1к} = U_a;$$

$$\dot{S}_{4н}, \dot{U}_{4н} = U_c \Rightarrow \Delta P_4, \Delta Q_4, \dot{S}_{4к} = \dot{S}_c; \Delta U_4, U_{4к} = U_c;$$

$$\dot{S}_{2н} = \dot{S}_{1к} - \dot{S}_{4н}, \dot{U}_{2н} = U_b \Rightarrow \Delta P_2, \Delta Q_2, \dot{S}_{2к}; \Delta U_2, U_{2к} = U_b;$$

$$\dot{S}_{3н} = \dot{S}_{2к} - \dot{S}_d, \dot{U}_{3н} = U_d \Rightarrow \Delta P_3, \Delta Q_3, \dot{S}_{3к} = \dot{S}_f; \Delta U_3, U_{3к} = U_d;$$

Из результатов измерений в расчёт вводятся значения $\dot{S}_{1н}, U_{1н}, \dot{S}_{4н}$ и S_d .
Результаты расчетов следует объединить в таблице 4.1.

Табл. 4.1. Результаты расчетов

	Л1	Л4	Л2	Л3
$P_H + jQ_H, (ВА)$				
$U_H, В$				
$\Delta P, Вт$				
$\Delta Q, Вар$				
$P_K + jQ_K, (ВА)$				
$\Delta U, В$				
$U_K, В$				
Измеренные значения		$\dot{S}_c = S_{4к} =$ $U_c = U_{4к} =$		$\dot{S}_f = S_{3к} =$ $U_f = U_{3к} =$

4.2. Рабочие формулы

Здесь приводится краткое обоснование необходимых расчетных формул.

Основные допущения:

1. Исследуемая в работе электрическая цепь является моделью одной фазы сетей местных, в которых зарядная мощность и утечка сквозь изоляцию участков незначительны и по этому в схеме замещения участка и в соответствующих формулах не учитываются.

2. В ходе работы необходим строгий порядок в обозначениях. Допускается, как выше отмечено, индекс фазы «ф» опустить, приписывая символам величин только «индекс места».

Потери активной мощности в одной фазе отдельной линии:

$$\Delta P_{\phi} = I^2 R = (I_a^2 + I_p^2) R \quad (1)$$

Где I_a и I_p – активная и реактивная составляющие. Если известны мощность, поступающая в линию и напряжение начала линии, то

$$I_a = \frac{P_{нф}}{U_{нф}}; I_p = \frac{Q_{нф}}{U_{нф}} \quad (2)$$

С подстановками получаем:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{P_{нф}^2 + Q_{нф}^2}{U_{нф}^2} R \quad (3)$$

Потери реактивной мощности находим аналогичным преобразованием формулы $\Delta Q_{\phi} = I^2 X$:

$$\Delta Q_{\phi} = \frac{P_{нф}^2 + Q_{нф}^2}{U_{нф}^2} X \quad (4)$$

Фазная мощность в конце передачи получается с учетом потерь:

$$\dot{S}_{кф} = \dot{S}_{нф} + \Delta \dot{S}_{\phi} = (P_{нф} + \Delta P_{\phi}) + j(Q_{нф} + \Delta Q_{\phi}) \quad (5)$$

Формулы потери напряжения и напряжения в конце линий определяются по схеме замещения линии с помощью векторной диаграммы.

Четырехполюсник схемы замещения и диаграмма его режима при типично активно-индуктивной нагрузке приведена на рис. 3.2.

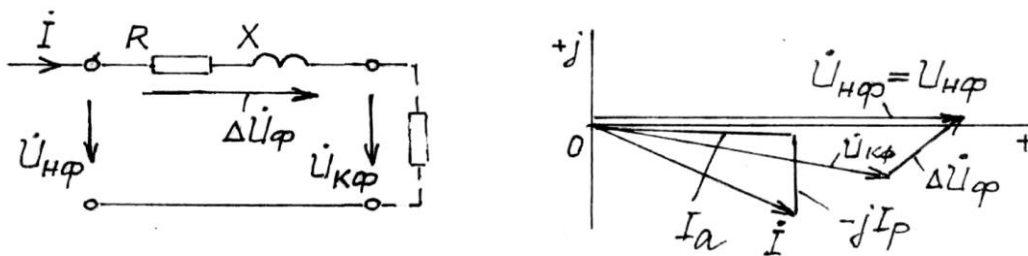


Рис. 3.2. Четырехполюсник схемы замещения и диаграмма его режима при активно-индуктивной нагрузке.

Согласно указанным обозначениям:

$$-\dot{U}_{нф} + \Delta \dot{U}_{\phi} + \dot{U}_{кф} = 0$$

Где $\Delta \dot{U}_{\phi} = (R + jX)I$ - падение напряжения на фазе линии.

Отсюда

$$U_{кф} = U_{нф} - (R + jX)I \quad (6)$$

Если вектор $\dot{U}_{нф}$ направить вдоль от действительных (т.е. будет $\dot{U}_{нф} = U_{нф} e^{j0} = U_{нф} 1$ - (рис. 3.2, б), то при нагрузке с индуктивностью отстающий по фазе ток $\dot{I} = I_a - jI_p$, а напряжение конца линии

$$\dot{U}_{кф} = U_{нф} - (R + jX)(I_a - jI_p)$$

Перемножив здесь комплексы в скобках и выразив составляющие I_a и I_p через мощности и напряжения начала линии, приходим к формуле:

$$\dot{U}_{кф} = U_{нф} - \frac{P_{нф} R + Q_{нф} X}{U_{нф}} - j \frac{P_{нф} X - Q_{нф} R}{U_{нф}} \quad (7)$$

Используются обозначения:

$$\frac{P_{нф} R + Q_{нф} X}{U_{нф}} = \Delta U_{нр}; \quad \frac{P_{нф} X - Q_{нф} R}{U_{нф}} = \delta U_{нн}$$

Имеем

$$\dot{U}_{кф} = U_{нф} - (\Delta U_{нр} + j\delta U_{нн}), \quad (8)$$

Где $\Delta U_{нр} + j\delta U_{нн} = \Delta \dot{U}_{ф}$ - сравниваем с (6). Из сравнения видно, что $\Delta U_{нр}$ и $j\delta U_{нн}$ не совпадают по фазе с RI и jXI , т.е. $\Delta U_{нр} \neq RI$, $\delta U_{нн} \neq XI$. Значит, $\Delta U_{нр}$ и $j\delta U_{нн}$ - особые составляющие вектора падения напряжения $\Delta \dot{U}_{ф}$: вектор $\Delta U_{нр}$ располагается вдоль вектора $\dot{U}_{нф}$, называется продольной составляющей; вектор $j\delta U_{нн}$ нормален к вектору $\dot{U}_{нф}$ - поперечная составляющая. Не следует путать их с активной и реактивной составляющими вектора $\Delta \dot{U}_{ф}$ - см. векторную диаграмму на рис. 3.3.

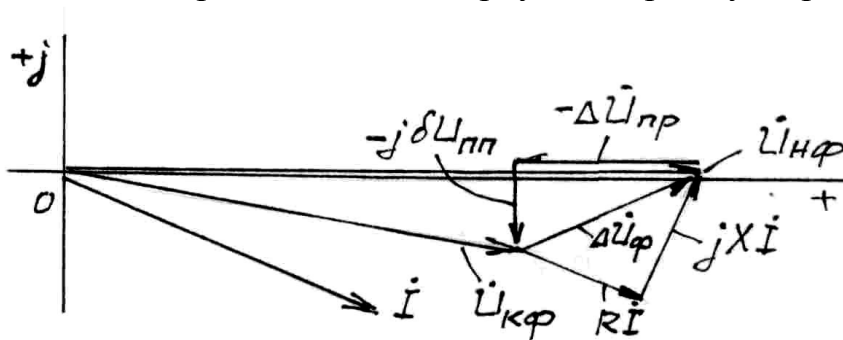


Рис. 3.3. Векторная диаграмма.

Известно, что в линиях местных сетей величина поперечной составляющей существенно меньше, чем продольная составляющая, и ею обычно пренебрегают. При этом формула (8) упрощается к виду простой разности:

$$U_{кф} = U_{нф} - \Delta U_{нр} \quad (9)$$

Отсюда $U_{нф} - U_{кф} = \Delta U_{нр}$. Но разность напряжений начала и конца линии есть потеря напряжения. Значит, в линиях местной сети потерю напряжения можно приравнять продольной составляющей падения напряжения: $\Delta U_{ф} \approx \Delta U_{нр}$. Тогда согласно (7)

$$\Delta U_{ф} = \frac{P_{нф} R + Q_{нф} X}{U_{нф}} \quad (10)$$

$$U_{кф} = U_{нф} - \Delta U_{ф}$$

Потерю напряжения по пути от источника питания через несколько участков сети определяется как

$$\Delta U_{ф} = \sum \frac{P_{нф}^{(i)} R_i + Q_{нф}^{(i)} X_i}{U_{нф}^{(i)}} \quad (11)$$

где «i» - номер участка.

Важно отметить, что в формулах (3), (4), (10) и (11) и мощности, и напряжения относятся к началу участка, т.е. формулы отвечают требованию точного расчёта: мощность и напряжение должны быть взяты в одной и той же точке сети.

В случаях, когда напряжение на концах участка неизвестны, расчёты можно проводить с достаточной для практики точностью по номинальному напряжению.

Формулы потерь ΔP и ΔQ трёхфазной мощности и линейная трёхфазная мощность в конце участка получаются умножением (3), (4) и (5) на три:

$$\Delta P = 3 \cdot \Delta P_{ф} = 3 \cdot \frac{P_{нф}^2 + Q_{нф}^2}{U_{нф}^2} \cdot R \cdot \frac{3}{3} = \frac{(3P_{нф})^2 + (3Q_{нф})^2}{(\sqrt{3}U_{нф})^2} \cdot R = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \cdot R ;$$

$$\Delta Q = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \cdot X ; \dot{S}_к = (P_n + \Delta P) + j(Q_n + \Delta Q) ;$$

Потеря напряжения ΔU и величина линейного напряжения U_k конца участка получается умножением (10) на $\sqrt{3}$:

$$\Delta U = \sqrt{3} \frac{P_{нф} R + Q_{нф} X}{U_{нф}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \frac{(3P_{нф})R + (3Q_{нф})X}{\sqrt{3}U_{нф}} = \frac{P_n R + Q_n X}{U_n} ;$$

$$U_k = \sqrt{3}U_{кф} = \sqrt{3}U_{нф} - \sqrt{3}\Delta U_{ф} = U_n - \Delta U ;$$

5. Вопросы для самопроверки

1. Сеть с односторонним питанием называется так же разомкнутой сетью. В чем заключается смысл понятия «разомкнутая»?

2. Объясните смысловые взаимосвязи следующих понятий: нагрузка участка сети, мощность участка, линейные мощности, потокораспределение.
3. От чего зависит в сети с односторонним питанием распределение потоков мощности?
4. Как выполняется начальный этап электрического расчета разомкнутой сети?
5. В какие рабочие формулы включаются результаты предварительного расчета потокораспределения?
6. Поясните условия, допускающие применение в расчетах номинального напряжения вместо действительных?
7. Какова лабораторная модель схемы замещения участка сети? Какой реальной сети она соответствует?
8. Что составляет содержание «точного» электрического расчета сети с односторонним питанием?
9. Почему при точных расчетах режимов ВЛ напряжения и мощности для подстановок следует взять в одной и той же точке сети?
10. В анализе и расчетах напряжения рассматривается пара активной и реактивной составляющих падения напряжения в ВЛ и пара продольной и поперечной составляющих того же падения напряжения. Объяснить различие между ними по векторной диаграмме ВЛ.
11. Как зависит режим нагрузок сети при увеличении или уменьшении потребляемой мощности одной из них?
12. Дайте объяснение порядка расчета режима мощностей и напряжений заданной схемы сети.

Лабораторная работа № 4.

Исследование распределения мощностей в кольцевой сети.

Введение

Содержание настоящей работы относится к вопросам, связанным в курсе «Электропитающие системы» с изучением замкнутых сетей.

Термин «замкнутая» не обязательно предполагает какую-то петлеобразную фигуру в плане, он относится, в первую очередь, к общему признаку: сеть – замкнутая, если каждый ее потребитель может получать электроэнергию не менее, чем с двух сторон.

Широкое применение замкнутых сетей, в особенности при устройстве сетей местного значения, объясняется следующими их преимуществами:

Надежность электроснабжения. При выходе из строя одного из источников сети или при повреждении участка линии вся нагрузка продолжает получать энергию от других источников.

Гибкость. Любые - медленные или быстрые – изменения нагрузок вызывают меньшие, чем в разомкнутой сети, колебания напряжения.

Меньше потери мощности. В отличие от разомкнутой сети с ее принудительным распределением мощностей при непрерывных изменениях нагрузок происходит свободное перераспределение мощностей, благодаря чему потери мощности получаются минимальными.

Простейший тип замкнутой сети представляет собой сеть с двухсторонним питанием. В общем случае – это неоднородная линия, и напряжения ее источников неравнозначны. Этот тип выделяют из-за особенности практического расчета: его начальный этап сводится к отысканию, так называемой, точки токораздела.

При наличии только одного источника замкнутая сеть получается в виде простой кольцевой сети. Легко видеть, что если совершать обход кольцевой линии, начиная от источника, то при любом направлении обхода начальное напряжение будет одно и то же – напряжение источника. Отсюда – идея преобразования: кольцо «разрезается» по источнику, «выпрямляется», и получается сеть с двухсторонним питанием, методика расчета которой разработана. Таким образом, сеть с двухсторонним питанием является также расчетной моделью для кольцевой сети.

В настоящей работе изучение преимущественных свойств и методики расчета простой замкнутой сети проводится с помощью натурной модели работы фазы кольцевой сети, в которой предусмотрены несколько линий и не менее двух точек присоединения нагрузок.

1. Цель и содержание работы

Целью работы является применение эксперимента для изучения особенностей передачи мощности и методики практического расчета режимов в простой замкнутой сети.

Рассматривается поведение натурной модели замкнутой сети в нормальном и аварийном режимах.

Проводится опытная проверка метода расчета кольцевой сети, основанного на расчетном эквиваленте сети с двухсторонним питанием.

2. Задание

2.1. Изучить п.3 «Указания по работе в лаборатории».

2.2. Составить натурную модель работы одной фазы кольцевой сети.

2.3. Установить параметры линий и нагрузок, задаваемые по п.3.3. Установить также (по указанию преподавателя) приемлемую позицию переключателя группы трансформаторов – источника питания сети.

2.4. Включить напряжение питания. Выполнить измерения режима в следующих случаях:

а) кольцевая сеть (в модели – соединение «КС»);

б) отключение (или «обрыв») линии Aa;

в) отключение (или «обрыв») линии Ab;

г) сеть с двухсторонним питанием при равных напряжениях источников на концах – «разрезанное кольцо» (в модели – соединение «СДП»).

Замечаем следующее. В цепи моделей все измерители мощностей включены так, что отклонения их указателей по шкале вправо соответствуют положительным направлениям, указанным на схеме сети. Отклонение влево при отсутствии емкостей означает противоположное направление потока мощности, т.е. соответствующие значения активной и реактивной мощности следует записать как отрицательные.

Данные измерений рекомендуется вносить сразу в таблицу, подготовленную по форме табл. 3.2.

2.5. Объяснить для случаев обрыва одной из линий причины отличия всех измеренных величин режима от таких же величин замкнутой сети.

2.6. Сравнить линейные и нагрузочные мощности кольцевой сети и сети с двухсторонним питанием.

2.7. Считая заданными измеренные в кольцевой сети значения S_a и S_b мощностей нагрузок, провести расчет линейных мощностей участков сети с двухсторонним питанием. По результатам расчета определить точку токораздела.

2.8. Показать разделение расчетной модели сети на две радиальные – с односторонним питанием. Схемы этих сетей привести с числовыми обозначениями рассчитанных мощностей.

2.9. С целью уточнения линейных мощностей данной кольцевой сети рассчитать режим радиальных линий. Сравнить результаты расчетов с данными измерений по п. 2.4,а.

2.10. Рассчитать напряжение в узловой точке сети с двухсторонним питанием, где подключена нагрузка большей мощности. Результат сравнить с опытным значением в п. 2.4,а.

Указания:

а) в п.п. 2.9 и 2.10 в качестве номинального следует принять напряжение точки с большей нагрузкой, измеренное по п. 2.4. в режиме кольцевой сети;

б) в п. 2.10 исходными данными служат напряжение источника питания и уточненные значения мощностей участков сети.

3. Указания по работе в лаборатории

3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Табл. 3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Наименование	Тип	Кол-во	Параметры
1. Трехфазный источник питания	201.2	1	400 В~;10А
2. Трехфазная трансформаторная группа	347.1	1	230 В~; 3×80ВА
3. Трехполюсный выключатель	301.1	1	380 В~/10А
4. Модель линии электропередач	313.2	3	
5. Активная нагрузка	306.1	1	220/380 В~ 3×0...50 Вт
6. Индуктивная нагрузка	324.2	1	220/380 В~ 3×0...40 ВАр
7. Коммутатор измерения мощностей	349	1	5 положений
8. Измеритель мощностей	507.2	1	15;60;150;300В 0,05; 0,1; 0,2 А
9. Блок мультиметров	508.2	1	0...700 В

3.2. Описание электрической схемы модели одной фазы сети

Электрическая схема натурной модели к лабораторной работе «Исследование распределения мощности в кольцевой сети» дана на рис. 4.1.

В модели объектом исследования является простая кольцевая сеть, составленная из трех линий. Моделью линии служит четырехполюсник модуля 313.2. Для наглядности соответствия друг другу схемы сети и схемы соединений модели, каждую линию представляет отдельный блок. В качестве нагрузок z_a и z_b подстанций применяется последовательное соединение одного резистора и одной катушки блоков 306.1 324.2.

Узел питания сети составляют трехфазный источник питания (201.2) и трансформаторная группа (347.1). Используются только два трансформатора группы. Их первичные обмотки, соединенные параллельно, питаются от одной фазы трехфазного источника.

Для удобства работы в схеме используется трехполюсный выключатель – блок 301.1. В момент его включения создается кольцевая сеть. При этом питающие сеть вторичные обмотки трансформаторов группы соединяются параллельно. В момент отключения блока создается сеть с двухсторонним питанием. При этом те же обмотки разобщаются – подключаются к противоположным концам сети, причем соблюдается требование равенства их напряжений и синфазной работы.

Для измерения напряжений используются мультиметры модуля 508.2.

Измерители мощности присоединяются через свой коммутатор (блоки 507.2 и 349). Номер очередного подключаемого «ваттметра» коммутатора должен совпадать с номером, указанным на схеме.

К блокам мультиметров, измерителя мощности и трехполюсного выключателя, подводится отдельное питание.

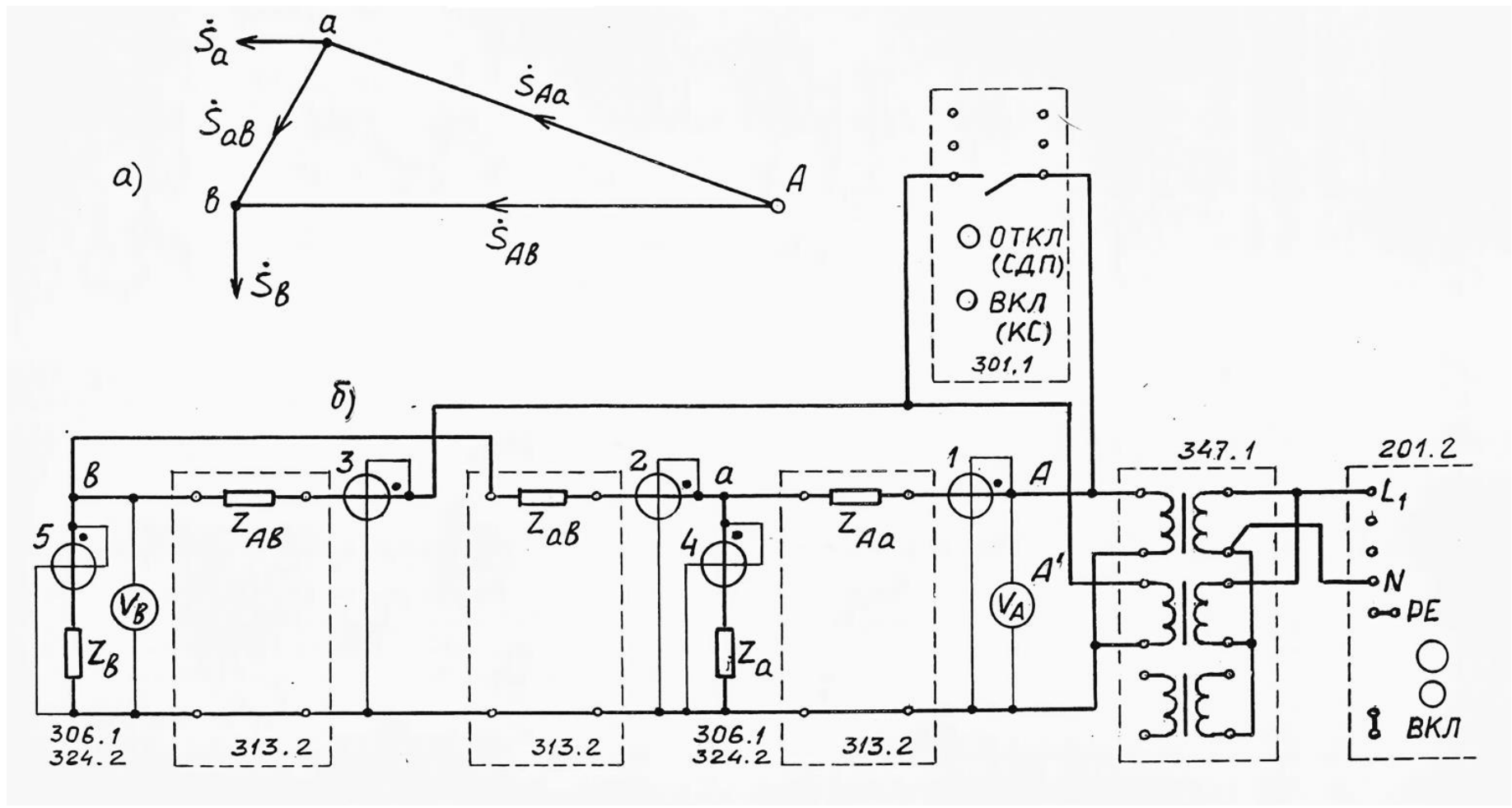


Рис. 4.1. Замкнутые сети: а) кольцевая сеть; б) схема соединений модели работы одной фазы (КС – кольцевая сеть, СДП – сеть с двухсторонним питанием при $U_a=U_{a'}$).

3.3. Проведение экспериментов

Все используемые блоки-модули располагаются на двух соседних стендах.

Убедиться, что основной (трехфазный) источник питания и модули, требующие индивидуального питания, отключены от сети лаборатории.

Соединить гнезда защитного заземления, используемых блоков, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания.

Выполнить соединения по схеме натурной модели, данной на рис. 4.1.

Установить следующие параметры линий модели:

линий «Аа» и «ab»: $R+R_L=58$ Ом; $L=0,3$ Гн; $(C/2)=0$;

линия «Ab»: $R+R_L=66$ Ом; $L=0,6$ Гн; $(C/2)=0$;

нагрузка z_a : $R_a - 50\%$; $L_a - 50\%$;

нагрузка z_b : $R_b - 100\%$; $L_b - 100\%$.

Установить переключатель блока группы трансформаторов в положение «220», «226» или «230» - по указанию преподавателя. Это положение сохраняется на протяжении всей работы. Действительное напряжение, подаваемое в сеть, показывает вольтметр V_a .

Табл. 3.2 Результаты измерений

Параметры режима	Кольцевая сеть: блок 301.1 включен $U_a = \quad, В$			Сеть с двухсторонним питанием: блок 301.1 выключен. $U_a = U_a' = \quad, В$	Примечание
	замкнутая сеть	обрыв линии «Аа»	обрыв линии «Ab»		
$P_1/Q_1,$ Вт/ВАр					$\dot{S}_{Aa} = P_1 + jQ_1$
$P_2/Q_2,$ Вт/ВАр					$\dot{S}_{a6} = P_2 + jQ_2$
$P_3/Q_3,$ Вт/ВАр					$\dot{S}_{A6} = P_3 + jQ_3$
$P_4/Q_4,$ Вт/ВАр					$\dot{S}_a = P_4 + jQ_4$
$P_5/Q_5,$ Вт/ВАр					$\dot{S}_6 = P_5 + jQ_5$
$U_B, В$					номинальное в реж. кольц. сети

После подключения модели к сети лаборатории работа проводится согласно «Заданию» в следующем порядке:

Режим кольцевой сети. Включить трехполюсный выключатель. Включить питание модели. Записать параметры режима.

Значение напряжения нагрузки в этом режиме на подстанции «в» далее принимается как номинальное.

Аварийный режим – «обрыв» линии «Аа». Разъединить наконечник соединительного провода и входное гнездо линии «Аа». Записать параметры режима и вернуть наконечник в прежнее положение.

Следует обратить внимание на изменение направления потока мощности в линии «ab».

Аварийный режим – «обрыв» линии «Ab». Отсоединить наконечник соединительного провода от входного гнезда линии «Ab». Записав показания приборов, вернуть наконечник на прежнее место.

Режим сети с двухсторонним питанием. Отключить трехполюсный выключатель. При этом кольцевая сеть преобразуется в линию с двухсторонним питанием. Записать параметры режима.

По окончании экспериментов отключить питание модели и индивидуальное питание модулей.

4. Методические указания

Кольцевая сеть представляет тип замкнутых сетей, где энергия может подводиться к каждому потребителю не менее, чем с двух сторон. А на вопрос, с какой стороны (слева, справа или с обеих сторон) приходит мощность к интересующей нагрузке, позволяет ответить расчет режима.

Используется метод последовательных приближений:

1) «разрезанием» по источнику питания, кольцевую сеть превращает в сеть с двухсторонним питанием при одинаковых источниках на концах (рис. 4.2);

2) в сети с двухсторонним питанием определяется предварительное (без учета потерь мощности и потерь напряжения на участках) распределение линейных мощностей;

3) по результатам предварительного расчета находят точку раздела мощностей;

4) в точке раздела сеть разбивается на две самостоятельные разомкнутые («радиальные») линии;

5) по найденным приближенным значениям мощностей при номинальном напряжении определяют, начиная от точки раздела, потери мощности и уточненные значения линейных мощностей;

6) по уточненным значениям мощностей рассчитываются потери напряжения до узловых точек сети и значения напряжений в этих точках.

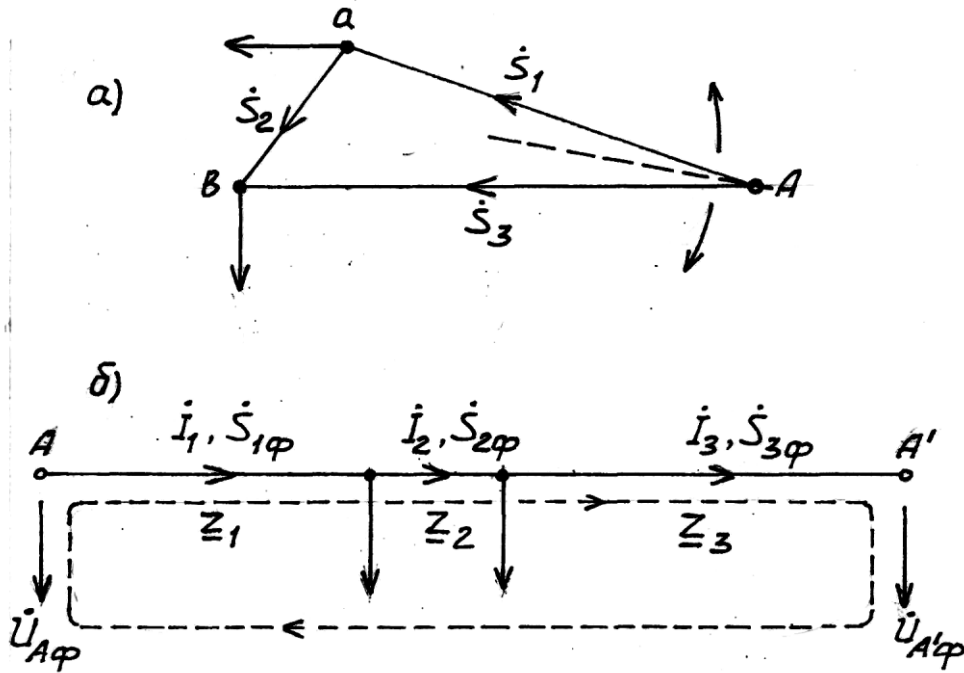


Рис. 4.2. Преобразование кольцевой сети.

Рассмотрим рабочие формулы предварительного расчета мощности участков одной фазы сети.

Согласно контурному закону Кирхгофа для контура, обозначенного на рис. 4.2,б пунктиром, при указанных положительных направлениях можно записать:

$$-\dot{U}_{A\delta} + z_1 \dot{I}_1 + z_2 \dot{I}_2 + z_3 \dot{I}_3 + \dot{U}_{A'\delta} = 0$$

Так как $\dot{U}_{A'\delta} = \dot{U}_{A\phi}$, то:
$$z_1 \dot{I}_1 + z_2 \dot{I}_2 + z_3 \dot{I}_3 = 0 \quad (1)$$

Введем в это уравнение мощности участков одной фазы сети.

Принимается допущение: фазное напряжение \dot{U}_ϕ вдоль всей сети одно и то же, т.е. нет потерь мощности и, значит, нет потерь напряжения. Тогда мощность любого «к»-го участка:

$$\dot{S}_{к\phi} = \dot{U}_\phi \dot{I}_{к\phi}$$

Чтобы выразить в (1) токи участков, обращаемся к сопряженному комплексу

$$S_{к\phi}^* = U_\phi^* \dot{I}_{к\phi}$$

Подставляем в (1) $\dot{I}_{к\phi} = \left(\frac{S_{к\phi}^*}{U_\phi^*} \right)$, имеем:
$$z_1 \frac{S_{1\phi}^*}{U_\phi^*} + z_2 \frac{S_{2\phi}^*}{U_\phi^*} + z_3 \frac{S_{3\phi}^*}{U_\phi^*} = 0$$

Отсюда
$$z_1 S_{1\phi}^* + z_2 S_{2\phi}^* + z_3 S_{3\phi}^* = 0 \quad (2)$$

Выразим мощности S и S через мощности нагрузок и мощность S головного участка. Здесь замечаем:

уравнение любых величин, записанное в «нормальных» комплексах, не меняет вида при переходе к сопряженным комплексам;

уравнение сопряженных токов, записанное по узловому закону Кирхгофа, сразу переходит в уравнение мощностей, если каждый ток умножить на \dot{U}_ϕ .

Значит, согласно положительным направлениям на рис. 4.2,б по закону

Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{2\phi} &= \dot{S}_{1\phi} - \dot{S}_{a\phi} \\ \dot{S}_{3\phi} &= \dot{S}_{1\phi} - \dot{S}_{a\phi} - \dot{S}_{в\phi} \end{aligned} \quad (3)$$

В сопряженных комплексах:

$$S_{2\phi}^* = S_{1\phi}^* - S_{a\phi}^*$$

$$S_{3\phi}^* = S_{1\phi}^* - S_{a\phi}^* - S_{в\phi}^*$$

Подставим эти выражения в (2):

$$\underline{z}_1 S_{1\phi}^* + \underline{z}_2 (S_{1\phi}^* - S_{a\phi}^*) + \underline{z}_3 (S_{1\phi}^* - S_{a\phi}^* - S_{в\phi}^*) = 0$$

Отсюда:

$$S_{1\phi}^* = \frac{S_{a\phi}^* (\underline{z}_2 + \underline{z}_3) + S_{в\phi}^* \underline{z}_3}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2 + \underline{z}_3} \quad (4)$$

Таким образом, для предварительного расчета линейных мощностей достаточно согласно (4) знать сопротивления линий и задать мощности нагрузок. В начале по (4) определяем сопряженный и действительный комплексы мощности головного участка, затем по (3) – мощности остальных участков.

Замечаем, что поскольку формулы (3) и (4) получены при одинаковых (на рис. 4.2, б) положительных направлениях потоков мощности, в расчете могут получаться отрицательные значения. Это должно указывать, что действительные направления таких потоков обратны выбранным положительным. Поэтому для продолжения расчетов следует сначала изобразить схему сети с указанием действительных направлений.

По результатам предварительного расчета определяется точка раздела (токораздела или потокораздела) – та узловая точка, где подтекающая с разных сторон мощность полностью потребляется нагрузкой. Надо учитывать, что вообще точек раздела должно быть две: по активным мощностям и по реактивным мощностям. В простых сетях они обычно совпадают. Также имеют ввиду, что при изменениях нагрузок точка раздела может вдоль сети перемещаться или «раздваиваться».

Пример определения точки раздела дан на рис. 4.3. На рис. 4.3,а показано распределение мощностей после предварительного расчета. Видно, что точкой раздела является узловая точка «а», так как $\dot{S}_a = \dot{S}_1 + \dot{S}_2$.

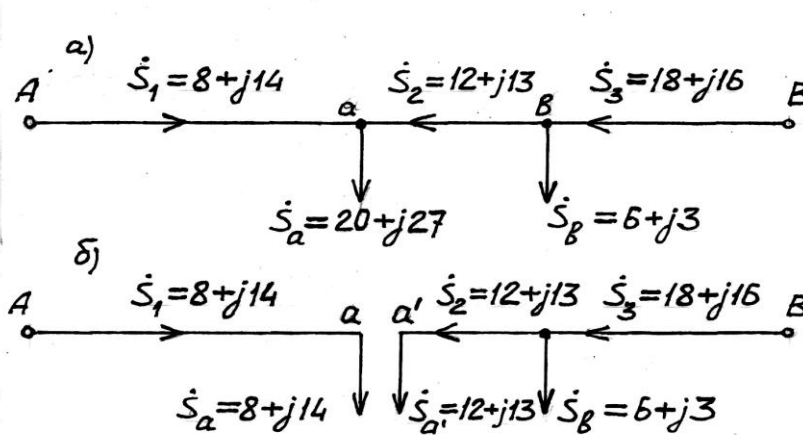


Рис. 4.3. Определение точки потоко раздела.

Рис. 4.3,б показывает «разрез» сети в точке раздела на две самостоятельные разомкнутые линии. Для расчета потерь мощности и уточнения значений линейных мощностей исходными данными конца этих линий служат значения \dot{S}_1 и \dot{S}_2 и номинальное напряжение.

Для определения напряжений узловых точек сети вначале рассчитываются составляющие падений напряжения на участках. При этом очевиден закон: вводимые в расчет мощность и напряжение следует взять в одной и той же точке сети. Но поскольку действительные напряжения точек сети неизвестны, - еще подлежат определению, расчет составляющих ведется по номинальному напряжению.

Участки сетей местного значения относительно короткие и поэтому поперечная составляющая падения напряжения в них пренебрежимо мала. Продольная составляющая почти совпадает с потерей напряжения, и расчет потерь напряжения ведется по формулам этой составляющей.

Замечаем, что при наличии только одной точки раздела наибольшая потеря напряжения будет именно до этой точки, а расчет потери напряжения можно выполнить по любой из разомкнутых линий. Например, для точки раздела на рис. 4.3,а

$$\Delta U_{a\phi} = \Delta U_{A-a} = \frac{P_{1\phi} R_1 + Q_{1\phi} x_1}{U_\phi}$$

или

$$\Delta U_{a\phi} = \Delta U_{A'-a} + \Delta U_{a-B} = \frac{P_{3\phi} R_3 + Q_{3\phi} x_3}{U_\phi} + \frac{P_{2\phi} R_2 + Q_{2\phi} x_2}{U_\phi},$$

где $P_{1\phi}$, $P_{2\phi}$ и $P_{3\phi}$, а также $Q_{1\phi}$, $Q_{2\phi}$ и $Q_{3\phi}$ - уточненные значения мощностей одной фазы сети.

Формулы трехфазных мощностей для рассматриваемой сети с двумя нагрузками получаем умножением (3) и (4) на три:

$$\dot{S}_1^* = \frac{\dot{S}_a^* (\underline{z}_a + \underline{z}_e) + \dot{S}_e^* \underline{z}_3}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2 + \underline{z}_3}$$

$$\dot{S}_2 = \dot{S}_1 - \dot{S}_a; \quad \dot{S}_3 = \dot{S}_1 - \dot{S}_a - \dot{S}_e$$

5. Вопросы для самопроверки

1. Определите понятия «замкнутая сеть», «сеть с двухсторонним питанием», «кольцевая сеть».
2. Назовите основные свойства замкнутой сети, составляющие ее преимущества.
3. Покажите на заданной схеме кольцевой сети пути потоков мощности к нагрузкам при обрыве любой из трех линий.
4. Почему для расчета потокораспределения простой кольцевой сети ее следует преобразовывать в сеть с двухсторонним питанием? Как обосновывается преобразование?
5. Объясните структуру и работу натурной модели сети, использованной в лаборатории. Объясните также порядок проведения опытов.
6. Что означают отрицательные показания измерителя мощности в модели одного из аварийных режимов?
7. Что называют точкой раздела мощностей? Определите те данные измерений, совокупность которых указывает место точки раздела.
8. Изложите методику и последовательность расчета потокораспределения мощности и напряжений в простой кольцевой сети.

Лабораторная работа № 5.

Компенсация реактивной мощности.

Введение

Общим свойством большинства электроприемников в промышленности (в основном - это асинхронные двигатели) является их активно-индуктивный характер. Поэтому они могут потреблять полезную – активную мощность только при одновременном потреблении реактивной мощности. Значительное потребление реактивной мощности происходит и в передающей части самих систем – в линиях и, в особенности, при неоднократных трансформациях.

Генераторы же рассчитываются для работы с коэффициентом мощности не ниже 0,8-0,85. Значит, при неизменном предельном значении полной мощности, которую они могут отдавать в сеть, нагрузка генератора реактивной мощностью допускается не выше 60% нагрузки активной мощностью.

Для разгрузки линий и генераторов от избыточной реактивной мощности применяют компенсирующие устройства (КУ). Присоединенные к электрической сети, они тоже потребляют мощность, однако, емкостного характера. Ее вектор находится в противофазе с вектором реактивной мощности. Поэтому в точке присоединения КУ реактивная мощность нагрузки или части сети вместе с КУ является разностью реактивной мощности до компенсации и мощности КУ. При этом в пределах своих зажимов электроприемник получает все ту же требуемую ему реактивную мощность, но часть ее приходит уже не от генератора, а от КУ. Отсюда в ходу выражение: «генерирование реактивной мощности компенсирующим устройством».

Как средство повышения эффективности электроснабжения компенсация реактивной мощности приводит к снижению потерь, разгрузке сетей и электростанций, улучшает качество электроэнергии.

В данной лабораторной работе, назначаемой для помощи в изучении принципов и эффективности компенсации реактивной мощности, в пределах выделяемого времени рассматриваются лишь две из возможного большего числа постановок задач исследования. Этого может быть достаточно, чтобы находить ответы на вопросы, связанные с другими задачами.

При подготовке к работе, изучая настоящее руководство, необходимо уяснить задачи исследования, разобраться в работе электрической схемы натурной модели, а также – в порядке проведения экспериментов; подготовить подсобные материалы – таблицы для записи показаний приборов и др.

В ходе работы и при выполнении отчета можно следовать обозначениям величин, указанным в руководстве, имея ввиду, что поскольку используется однофазная модель, все указанные обозначения – фазные.

1. Цель и содержание работы

Целью настоящей работы является изучение принципов и эффективности компенсации реактивной мощности, передаваемой по ЛЭП.

Выполняется лабораторная проверка выбора мощности компенсации в следующих вариантах задачи исследования:

а) требуется при неизменной потребляемой активной мощности повысить до некоторого заданного значения коэффициент мощности в месте потребления, например, - с целью снижения потерь в линии (поперечная компенсация);

б) требуется при неизменной мощности, поступающей в линию, понизить до некоторого заданного значения напряжение питающего трансформатора, например, - с целью обеспечить нормальную работу его высоковольтной изоляции (продольная компенсация).

2. Задание

2.1. Изучить в п.3 «Указания по работе в лаборатории».

2.2. Составить натурную модель работы одной фазы ЛЭП с присоединением элементов компенсации реактивной мощности.

2.3. Установить параметры линии, нагрузки к КУ2 – батареи конденсаторов продольной компенсации, указанные в п.3.3

2.4. Подготовить модель для включения режима ЛЭП без компенсации реактивной мощности.

2.5. Включить режим без компенсации. Установить напряжение питания линии U_1 в пределах 30-150 В. Измерить параметры режима.

Данные измерений рекомендуется вносить сразу в таблицу, подготовленную по форме табл. 3.2.

Замечание: измеренное значение напряжения нагрузки U_2 далее рассматривается как номинальное.

2.6. Рассчитать естественный коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi$ и мощность поперечной компенсации Q_k при значении $\cos\varphi' > \cos\varphi$, задаваемой в пределах 0,8-0,9.

2.7. Включить режим с поперечной компенсацией. Регулируя попеременно ёмкость батареи конденсаторов КУ1 и напряжение питания, получить наибольшее приближение действительной мощности компенсации Q_{kd} к рассчитанному значению Q_k . Записать параметры режима.

2.8. Восстановить исходный (по п. 2.5) режим – без компенсации. Данные режима внести в таблицу, подготовленную по форме табл. 3.3.

Примечания к таблице: U_1 – напряжение на выходных зажимах КУ2; U_1' – напряжение на входных зажимах КУ2, - равно напряжению питающего трансформатора.

2.9. Отключить питание модели. Рассчитать $\sin\varphi$, $\cos\varphi$ и мощность Q_k продольной компенсации при напряжении U_1' , значение которого следует задать ниже, чем U_1 на 6-8%.

Замечание: здесь величина φ – сдвиг фаз в начале всего, что подключено к трансформатору, т.е. – включая ЛЭП. Следовательно, $\varphi = \arctg(Q_1/P_1)$, где Q_1 и P_1 – данные режима без компенсации

2.10. Включить последовательно батарею конденсаторов КУ2 предназначенную для продольной компенсации. Включить питание сети при напряжении, равном напряжению U_1 режима без компенсации. Снять показания приборов.

Замечаем: эффект продольной компенсации имеется, но при $Q_{k\delta} \neq Q_k$. При этом напряжение нагрузки U_2 отклоняется от номинального.

2.11. Регулируя напряжение питания, добиться наибольшего приближения действительной мощности продольной компенсации $Q_{k\delta}$ к рассчитанному значению Q_k . Записать параметры режима.

Замечаем: если $Q_{k\delta} \approx Q_k$, то практически выполняются условия, с которыми рассчитано Q_k , т.е. мощность, поступающая в линию, сохраняется примерно той же, что в режиме без компенсации, а напряжение нагрузки – вблизи номинального; напряжение трансформатора U_1' оказывается ниже, чем в режиме без компенсации на заданную величину $U_1 - U_1'$.

2.12. Определить все расчетные величины, указанные в табл. 3.2 и табл. 3.3.

2.13. Выполнить сравнительный анализ данных по п.п.2.5 - 2.7. Определить выводы о значении поперечной компенсации для режима ЛЭП и питающего трансформатора.

2.14. Определить выводы из сравнительного анализа результатов п.п. 2.8 и 2.10. Объяснить изменение режима при включении компенсации.

2.15. Сравнить параметры режимов в п.п. 2.8 и 2.11. Дать оценку эффекта включения продольной компенсации, рассчитанной с условием сохранения режима сети, установленного до компенсации.

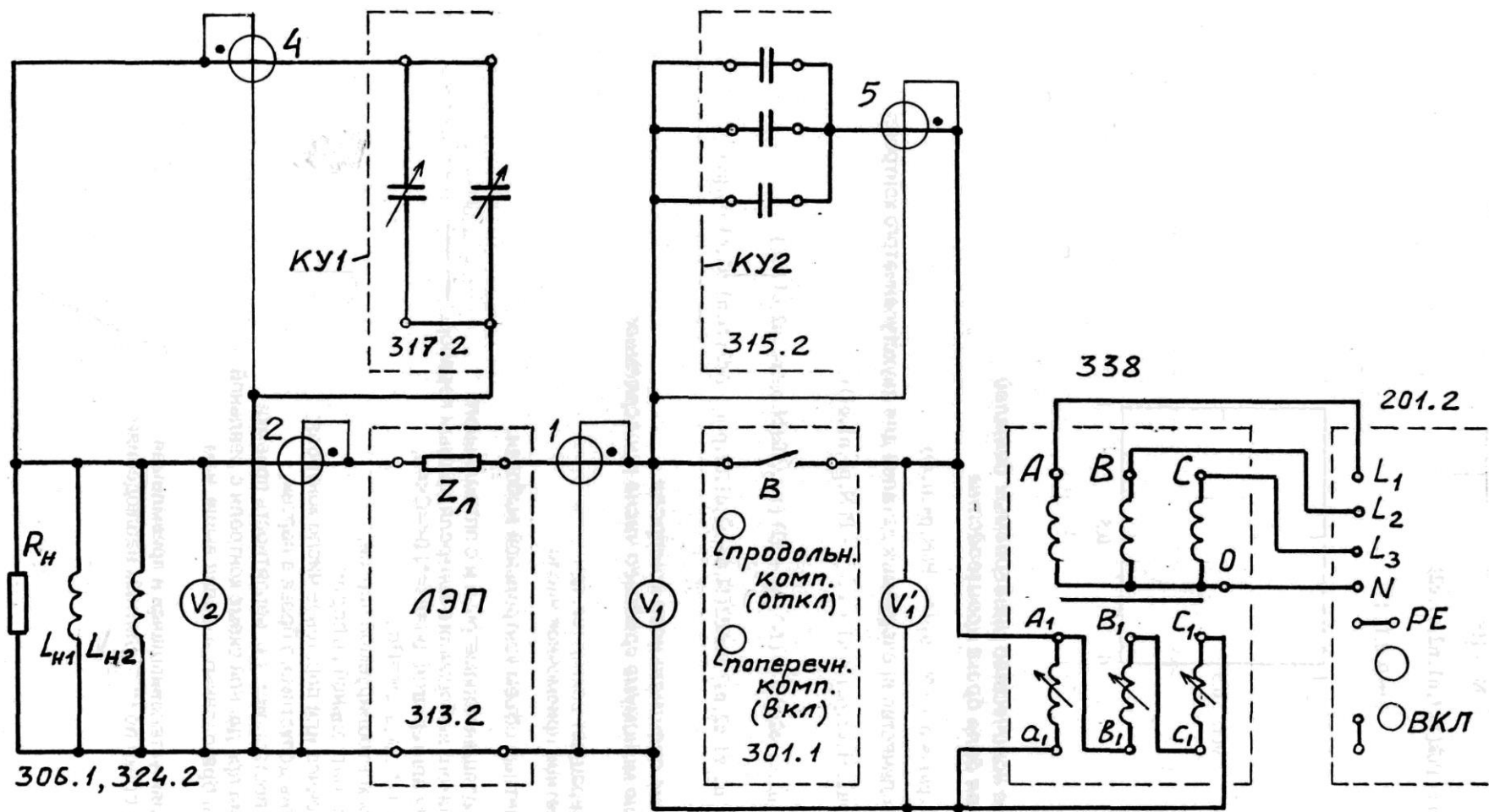


Рис. 5.1. Электрическая схема натурной модели к лабораторной работе «Компенсация реактивной мощности»

3. Указания по работе в лаборатории

3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Табл. 3.1. Перечень используемых блоков-модулей

Наименование	Тип	Кол-во	Параметры
1	2	3	4
1. Трехфазный источник питания	201.2	1	400 В \sim ;10А
2. Регулировочный трансформатор	338	1	3×220/3×90...140В
3. Трехполюсный выключатель	301.1	1	380 В \sim /10А
4. Модель линии электропередач	313.2	3	
5. Активная нагрузка	306.1	1	220/380 В \sim 3×0...50 Вт
6. Индуктивная нагрузка	324.2	1	220/380 В \sim 3×0...40 ВАр
7. Емкостная нагрузка	317.2		220/380 В \sim 3×0...40 ВАр
8. Устройство продольной компенсации	315.2		400 В \sim /0,3 А
9. Коммутатор измерения мощностей	349	1	5 положений
10. Измеритель мощностей	507.2	1	15;60;150;300В 0,05; 0,1; 0,2 А
11. Блок мультиметров	508.2	1	0...700 В

3.2. Описание электрической схемы модели одной фазы сети

Электрическая схема натурной модели к лабораторной работе «Компенсация реактивной мощности» дана на рис. 5.1.

Объектом исследования является ЛЭП с нагрузкой, потребляющей активную и реактивную мощность. Модель одной фазы линии представлена четырехполюсником модуля 313.2. Нагрузкой линии является параллельное соединение резистора и катушек индуктивности – модули 306.1 и 324.2.

Узел питания ЛЭП составляют трехфазный источник питания (201.2) и регулировочный трехфазный трансформатор (338), подключаемый к источнику питания по схеме «звезда с нулем/Δ». Используется одна фаза вторичной обмотки трансформатора.

Питание в ЛЭП подается через контакты трехполюсного выключателя – блок 301.1.

В режиме с поперечной компенсацией используется «батарея» конденсаторов регулируемой емкости КУ-1 – модуль 317.2. Для продольной компенсации применяется «батарея» КУ-2 – специальный блок 315.2.

Для измерений напряжения питания, напряжений в начале и в конце передачи используются мультиметры блока 508.2.

Измеритель мощности работает всегда в паре со своим коммутатором (модули 507.2 и 349). Номера «ваттметров», обозначенные на схеме, должны соответствовать номерам положений ручки коммутатора: 1 и 2 – для измерения мощностей в начале и в конце передачи; 4 и 5 для измерения емкостной мощности поперечной и продольной компенсации. Контур напряжения «ваттметров» 1, 2 и 4 присоединяются к «обратному» проводу всей цепи. Цепь напряжения измерителя 5 должна получить напряжение «батареи» КУ2.

К блокам мультиметров, измерителя мощностей и трехполюсного выключателя подводится индивидуальное питание.

3.3. Проведение экспериментов

Все используемые блоки-модули должны располагаться на двух соседних стендах.

Убедиться, что основной (трехфазный) источник питания и все блоки, получающие индивидуальное питание, отключены от сети лаборатории.

Соединить гнезда защитного заземления, используемых моделей, с гнездом “РЕ” трехфазного источника питания.

Выполнить соединения по схеме натурной модели на рис. 5.1.

Установить следующие параметры элементов модели:

линия: $R+R_L=66$ Ом; $L=0,6$ Гн; $(C/2)=0$;

нагрузка: $R_n=100\%$; $L_{n1}=100\%$; $L_{n2}=100\%$;

батарея конденсаторов КУ2: общая емкость $C=48$ мкФ.

После подключения модели к сети лаборатории работа по ряду п. Задания проводится в следующем порядке:

По п.2.4. Установить переключатели блока КУ1 в положение «0». При этом блок отключается.

Включить трехполюсный выключатель. Его контакты В замкнутся, шунтируя батарею КУ2. В таком состоянии модель готова для исследования режима без компенсации.

По п.2.5. Включив напряжение питания, установить значение U_1 в интервале 130-150 В. Снять показания приборов.

По п.2.7. Режим поперечной компенсации начинается с момента начала регулировки емкости КУ1. Работа выполняется согласно содержанию п.2.7.

По п.2.8. Для возвращения к исходному режиму установить емкость КУ1 в положение «0», а напряжение довести до значения U_1 в п.2.5.

По п.2.10. Для введения продольной компенсации выключить блок трехполюсного выключателя. При этом контакты В разомкнутся и «батарея» КУ2 включится последовательно с линией.

По окончании экспериментов отключить питание модели и индивидуальное питание модулей.

Таблица 3.2. Результаты измерений (поперечная компенсация)

Параметры режима	Без компенсации	Поперечная компенсация	Примечания
U1, В			Измерено
P1, Вт			Измерено
Q1, ВАр			Измерено
U2, В			Измерено
P2, Вт			Измерено
Q2, ВАр			Измерено
Коэфф. мощности	$\cos \varphi =$	$\cos \varphi_k =$	$\cos [\arctg (Q_2/P_2)]$
ΔP , Вт			$P_1 - P_2$
Мощность от трансф. S1, ВА			$\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$
Мощность компенсации	При заданном $\cos \varphi' =$ расчетная мощность $Q_k =$, ВАр	Установлена мощность $Q_{k\delta} =$, ВАр	Q_k рассчитывается по формуле (1) «Методич. указаний»

Таблица 3.3. Результаты измерений (продольная компенсация)

Параметры режима	Без компенсации	Продольная компенсация	Примечания
U1, В			Измерено
U1', В	U1=		Измерено
P1, Вт			Измерено
Q1, ВАр			Измерено
U2, В			Измерено
P2, Вт			Измерено
Q2, ВАр			Измерено
потеря напряжения в линии ΔU , В			$(U_1 - U_2)$ или $(U_1' - U_2)$
Мощность	При заданном	Установлена	Q_k

компенсации	$U_1' = \quad, В$ расчетная мощность $Q_k = \quad, ВАр$	мощность $Q_{к\delta} = \quad, ВАр$	рассчитывается по формуле (2) «Методич. указаний»
-------------	--	--	--

4. Методические указания

Формулы емкостной мощности компенсирующей батареи конденсаторов (КУ) получаем с условием, что потребляемая активная мощность – величина заданная, т.е. поддерживается постоянной. Этому соответствует векторная диаграмма на рис. 5.2. На диаграмме векторы $\dot{S} = P + jQ$ и $\dot{S}' = P + jQ'$ – потребляемые мощности до и после компенсации; $jQ' = jQ - jQ_k$ – реактивная мощность нагрузки (или передачи в целом) при работе с подключенным КУ.

В случае поперечной компенсации задача состоит в том, чтобы определить значение Q_k мощности КУ, обеспечивающее повышение коэффициента мощности на месте потребления от естественного значения $\cos \varphi$ до заданного значения $\cos \varphi' > \cos \varphi$

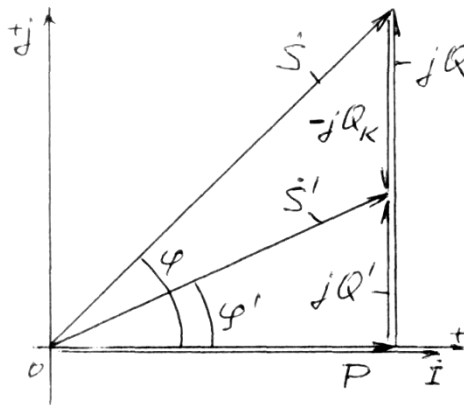


Рис. 5.2. Векторная диаграмма

По диаграмме видно:

$$Q_k = Q - Q';$$

если ввести величину активной мощности P , то:

$$Q_k = P \left(\frac{Q}{P} - \frac{Q'}{P} \right),$$

где $(Q/P) = \operatorname{tg} \varphi$; $(Q'/P) = \operatorname{tg} \varphi'$; следовательно,

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad (1)$$

Замечаем: в соответствии с обозначениями на схеме рис. 5.1 $P=P_2$.

В случае продольной компенсации конденсаторная батарея включается в рассечку линии последовательно. Такое включение применяется не для повышения коэффициента мощности в месте потребления, а для ослабления влияния индуктивного сопротивления влияния линии. Но если активная мощность, проходящая через КУ, поддерживается постоянной, то векторная диаграмма компенсации (по рис. 5.2) не меняет своего вида и, значит, формула (1) остается пригодной и для этого случая.

Обращаемся к рис. 5.3. Положим, что до компенсации (контакты В замкнуты) напряжение на входных и выходных зажимах КУ равно U_1 . Коэффициент мощности всего, что установлено в сторону потребления (линии со всеми нагрузками), равен $\cos \varphi$. Проходящие мощности P и Q .

При включении КУ (контакты В размыкаются) все параметры режима меняются, причем создается превышение напряжения на стороне потребления.

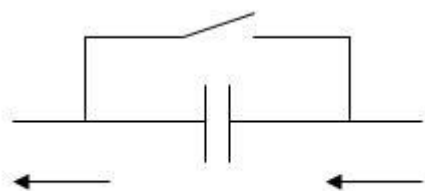


Рис. 5.3. Пояснения к лабораторной работе

С этим можно связать следующие варианты задачи:

1) определить мощность Q_k такого КУ, которое при некотором заданном напряжении питающего трансформатора $U_1' < U_1$ обеспечит на своих выходных зажимах (на стороне потребления) прежние значения U_1 , P и Q ;

2) определить мощность такого КУ, которая при неизменном напряжении питания U_1 обеспечит на стороне потребления некоторое заданное напряжение $U_1'' > U_1$.

Рассмотрим обоснование формулы мощности продольной компенсации по первому варианту – с напряжениями U_1 и U_1' , $U_1' < U_1$.

Используется общая формула компенсации (1)

$$Q_k = P(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')$$

где теперь величина φ – фазовый сдвиг в сети на выходных зажимах КУ (или – до компенсации); φ' – фазовый сдвиг в сети при включении компенсации, т.е. уже на входных зажимах КУ.

Напряжения U_1 и U_1' вводим следующим образом. Поскольку активная мощность P , проходящая через конденсаторы, не меняется, можно написать:

$$U_1 I \cos \varphi = U_1' I \cos \varphi'$$

Следовательно,

$$\cos \varphi' = \frac{U_1}{U_1'} \cos \varphi$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{U_1}{U_1'}\right)^2 \cos^2 \varphi}}{\frac{U_1}{U_1'}}$$

С подстановкой и преобразованиями получаем:

$$Q_k = P \left[\operatorname{tg} \varphi - \frac{\sqrt{(U_1')^2 - (U_1 \cos \varphi)^2}}{U_1 \cos \varphi} \right]$$

или

$$Q_k = \frac{P}{\cos \varphi} \left(\sin \varphi - \sqrt{\left(\frac{U_1'}{U_1}\right)^2 - \cos^2 \varphi} \right) \quad (2)$$

Замечание: в соответствии с обозначениями на схеме рис. 5.1 $P=P_1$.

5. Вопросы для самопроверки

1. Как объясняется понятие «компенсация реактивной мощности»?
2. Поясните принцип компенсации реактивной мощности с помощью векторной диаграммы (мощностей).
3. Конденсаторное устройство (КУ) пассивное, энергию не вырабатывает. Почему его рассматривают как источник или как генератор реактивной мощности?
4. Сравните назначение, принципы включения и следствия поперечной и продольной компенсации.
5. В чем заключается задача выбора мощности КУ в случаях поперечной и продольной компенсации?
6. Какие данные эксперимента показывают правильность расчета мощности КУ?
7. Поясните, почему, устанавливая в эксперименте заданную мощность компенсации, в режиме с поперечной компенсацией приходится регулировать емкость КУ, и напряжение источника питания, тогда как в режиме с продольной компенсацией – только напряжение.
8. Почему целесообразно компенсирующие устройства устанавливать поближе к месту потребления?
9. Как изменятся потери активной и реактивной мощности и потеря напряжения в линии, если увеличить мощность КУ, установленного у потребителя?

10. Как возможно повысить напряжение в сети при неизменных потребляемой мощности и напряжении питающего трансформатора?
11. Положим, поток линейной мощности направлен вправо, а последовательное компенсирующее устройство установлено посередине линии. С какой стороны КУ напряжение будет больше?
12. Падение общей нагрузки в ночные часы приводит в местной сети к опасному для изоляции повышению напряжения. Можно ли в это время понизить напряжение сети только посредством регулирования мощности КУ, установленного вблизи нагрузки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] Учебник для вузов / Л.А. Бессонов. – М.: «Высшая школа», 1978.
2. Блок В.М. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986.
3. Идельчик В.И. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Лыкин А.В. Электрические системы и сети [Текст] Учебное пособие / А.В. Лыкин. – М.: Логос, 2006.
5. Мельников Н.А. Электрические сети и системы [Текст] Учебник для вузов / Н.А. Мельников. – М.: Энергия, 1975.
6. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: НЦ ЭНАС, 2005.