

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ по
теоретической электротехнике
Часть I*

Донецк ДонНТУ - 2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

***Методические указания
к выполнению лабораторных работ по
теоретической электротехнике
Часть I***

Рассмотрено на заседании кафедры
электромеханики и ТОЭ.
Протокол №1 от 29 августа 2003 г.

Утверждено на заседании учебно-
издательского совета ДонНТУ.
Протокол № 9 от 09.10.03 г.

Донецк ДонНТУ - 2003

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ по
теоретической электротехнике
Часть I*

Составители:

Денник Виталий Федотович
Эсауленко Владимир Александрович
Рыбалко Николай Петрович
Фёдоров Михаил Михайлович
Антамонов Валентин Харитонович
Корощенко Александр Владимирович
Мерзликин Эдуард Семенович
Михайлов Владимир Евгеньевич
Черников Виктор Юрьевич
Чорноус Виталий Петрович
Журавель Елена Анатольевна
Малеев Дмитрий Михайлович

УДК 621.3.01 (07)

Методические указания к выполнению лабораторных работ по теоретической электротехнике. Часть I / Под общей редакцией проф. В.Ф. Денника. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – 72 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов электротехнического факультета, факультета ФЭМА и частично для студентов других факультетов, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, теория электромагнитного поля и др.). В указаниях приведены правила внутреннего распорядка в лабораториях секции ТОЭ кафедры «Электромеханика и ТОЭ», правила безопасности при работе с электрооборудованием, инструкции по выполнению одиннадцати лабораторных работ по исследованию установившихся и переходных режимов в линейных электрических цепях постоянного, однофазного и трехфазного токов.

Составители:

В.Ф. Денник, проф.
В.А. Эсауленко, проф.
Н.П. Рыбалко, проф.
М.М. Федоров, проф.
В.Х. Антамонов, доц.
А.В. Корощенко, доц.
Э.С. Мерзликин, доц.
В.Е. Михайлов, доц.
В.Ю. Черников, доц.
В.П. Черноус, доц.
Е.А. Журавель, ст.пр.
Д.М. Малеев, асс.

Отв. за выпуск

В.Ф. Денник, проф.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	4
Лабораторная работа 1	15
Лабораторная работа 2	20
Лабораторная работа 3	24
Лабораторная работа 4	30
Лабораторная работа 5	35
Лабораторная работа 6	39
Лабораторная работа 7	45
Лабораторная работа 8	50
Лабораторная работа 9	55
Лабораторная работа 10	60
Лабораторная работа 11	67
Литература	72

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1. Правила внутреннего распорядка

1. Лабораторные работы выполняются в соответствии с графиком лабораторных занятий, который доводится до сведения студентов в начале каждого семестра.

2. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по правилам безопасности и сдавшие вступительный коллоквиум по основам электрических измерений.

3. Лабораторные работы выполняются бригадами из 2-3-х человек.

4. Каждый студент должен заранее подготовиться к очередному занятию и явиться в лабораторию с тетрадью для ведения протокола исследований (черновиком). Неподготовленные студенты к работе не допускаются.

5. Студент должен бережно обращаться со всем оборудованием лаборатории.

6. Во время занятий в лаборатории должен поддерживаться надлежащий порядок и деловая обстановка. Ответственность за поддержание порядка в лаборатории, кроме преподавателя, несут староста группы и дежурный студент.

7. При выполнении лабораторных работ требуется неукоснительное выполнение правил техники безопасности.

8. По окончании работы каждый студент в черновом протоколе должен получить пометку преподавателя о правильности результатов работы и разрешение на разборку схемы. В случае неправильного выполнения работы студент повторно делает её, добиваясь положительных результатов.

9. К следующему занятию каждый студент должен представить отчет о предыдущей выполненной работе по установленной форме (см. ниже).

10. Пропущенные лабораторные работы отрабатываются во внеурочное время согласно установленному графику.

11. Студентов, нарушающих правила внутреннего распорядка, преподаватель обязан удалить из лаборатории и сообщить об их проступках заведующему кафедрой или декану.

2. Правила безопасности

Практически все напряжения, с которыми приходится иметь дело в лабораториях ТОО, являются опасными для жизни человека, поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности.

1. Электрические цепи должны собираться только при отключенном источнике питания. Собранный схема должна быть проверена преподавателем или лаборантом. Включать схему можно только с их разрешения.

2. При включении рубильника вся аппаратура (реостаты, реактивные катушки и т.д.) должны быть в таком положении, чтобы ток в цепи был минимальным.

3. Все студенты должны быть ознакомлены с системой аварийного отключения источника питания.

4. Запрещается:

4.1. Включать схему без предупреждения членов бригады. При включении следует громко сказать: «Подаю напряжение».

4.2. Прикасаться к неизолированным частям установки, находящейся под напряжением.

4.3. Производить пересоединения в схеме, находящейся под напряжением. Всякие пересоединения выполнять только при выключенном рубильнике, после каждого пересоединения схема должна быть вновь проверена преподавателем или лаборантом.

4.4. Брать приборы или аппараты, не предназначенные для выполнения данной лабораторной работы.

4.5. Загромождать лабораторные столы излишними предметами, в том числе лишними соединительными проводами.

4.6. Оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением.

4.7. После отключения цепи с ёмкостью разбирать схему без предварительного разряда конденсатора.

4.8. Включать схему, если один из концов монтажных проводов остаётся свободным.

4.9. Работать с электроустановками одному.

4.10. Самостоятельно ремонтировать приборы, аппараты и другое электрооборудование.

5. В случае аварии на рабочем месте (повреждение приборов, перегорание предохранителей и т.п.) студент обязан немедленно выключить рубильник и сообщить о случившемся преподавателю.

6. В случае попадания кого-либо под напряжение необходимо быстро выключить рубильник на рабочем столе (или осуществить аварийное отключение всей лаборатории) и оказать первую помощь пострадавшему.

3. Вопросы, подлежащие самостоятельному изучению до начала лабораторных занятий

1. Основные сведения об электрических измерениях:

- Погрешности измерений – абсолютные, относительные и приведенные.
- Классы точности приборов.
- Условные обозначения на шкалах измерительных приборов.

2. Устройство, принцип действия, достоинства, недостатки и область применения приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической и других систем.

3. Измерение тока, напряжения и мощности:

- Схемы включения амперметра, вольтметра и ваттметра.
- Расширение пределов измерения приборов (шунты, добавочные сопротивления).

4. Измерение сопротивлений методом амперметра-вольтметра и мостовым методом.

5. Принцип действия электронного осциллографа и применение его для измерения напряжения и тока.

6. Расчет цепей постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединениях сопротивлений.

4. Сведения и рекомендации, необходимые для выполнения лабораторных работ по ТОЭ

Для успешного выполнения лабораторных работ по курсу ТОЭ студенты должны иметь минимально необходимые представления об электрических измерениях и практической работе в лаборатории:

- порядок сборки схемы;
- системы электроизмерительных приборов: достоинства и недостатки, условные обозначения на шкалах, область применения;
- погрешности приборов и правильное снятие показаний;
- обработка результатов работы: графическое представление, выбор масштабов и построение графиков;
- общие требования к содержанию и оформлению отчёта о выполненной работе.

Порядок сборки схем

При сборке схемы исследуемой цепи в лаборатории, помимо соблюдения правил безопасности, необходимо придерживаться следующих общих принципов. В первую очередь соединяются элементы цепи, по которым замыкается путь тока. Это так называемая главная или «токовая цепь». В неё входят также амперметры и токовые обмотки ваттметров. После этого подключаются «цепи напряжения», т.е. вольтметры и обмотки напряжения ваттметров.

При включении приборов магнитоэлектрической системы должна соблюдаться «полярность» зажимов прибора. Это же относится и к подключению ваттметра.

Расположение катушек, реостатов, магазинов сопротивлений, проводов на рабочем столе должно соответствовать схеме, быть наглядным, по возможности «незапутанным», удобным для работы. На стационарном зажиме не рекомендуется соединять более двух проводов, иначе крепление не будет надёжным.

При сборке схемы и во время выполнения работы необходимо следить за надёжностью контактов в местах соединений и исправным состоянием цепи в целом. Несоблюдение этих условий может исказить результаты измерений или привести к порче приборов.

Сведения об электроизмерительных приборах

В лабораториях ГОЭ используются в основном стрелочные измерительные приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической систем и комбинированные электронные приборы.

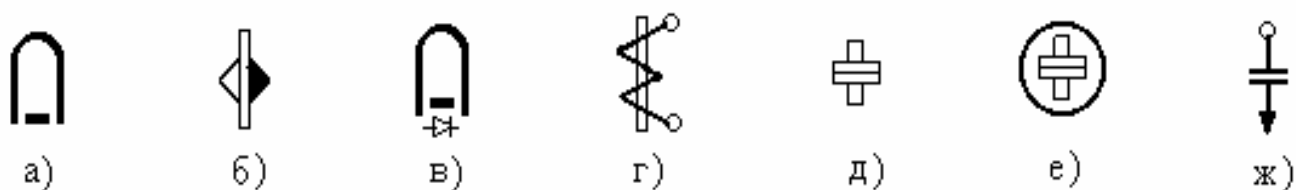


Рис.1. Условные обозначения на шкалах приборов различных систем

Приборы *магнитоэлектрической системы* с подвижной рамкой (а) и с подвижным магнитом (б) без диода измеряют постоянную составляющую тока или напряжения. Приборы с диодом (в) измеряют среднее по модулю значение функции, например тока или напряжения в цепях с выпрямителями. *Это приборы постоянного тока*. Вольтметры такой системы обладают достаточно большим собственным сопротивлением. Чтобы обеспечить высокую чувствительность прибора, токоподводы к подвижной катушке, по которой протекает измеряемый ток, выполняют очень легкими и тонкими. Это оборачивается недостатком такой системы – у приборов малая перегрузочная способность, легко перегорают токоподводы.

В *приборах электромагнитной системы* (г) измерительная катушка неподвижна и может быть выполнена более толстым проводом, поэтому эти приборы могут выдерживать большие перегрузки. Но зато они имеют невысокий класс точности. Вольтметры электромагнитной системы имеют сравнительно меньшее входное сопротивление, при измерении напряжения на высокоомной нагрузке дают большую погрешность, несколько искажая ток в исследуемой нагрузке. Приборы электромагнитной системы измеряют действующее значение величины и применяются как на постоянном, так и на переменном токе.

Приборы электродинамической системы (д) имеют более массивную неподвижную катушку, внутри которой на одной оси с указательной стрелкой расположена лёгкая подвижная катушка. Катушки соединяются либо последовательно, либо параллельно. Работа прибора основана на электродинамическом взаимодействии токов катушек. Приборы электродинамической системы обладают высокой точностью, пригодны для измерений на постоянном и переменном токе. Но они чувствительны к перегрузкам и к влиянию внешних магнитных полей. В *приборах ферродинамической системы* (е) для усиления взаимодействия токов катушек используется магнитопровод. Это делает приборы менее чувствительными к внешним полям, но снижает их точность.

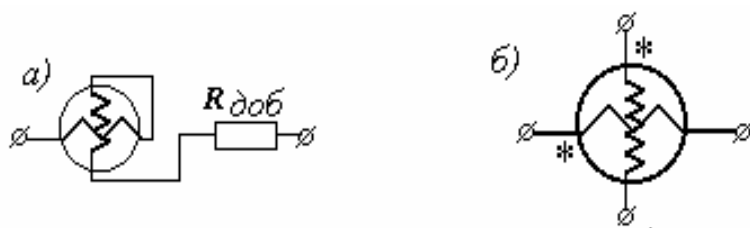


Рис.2. Схема соединения катушек электродинамического вольтметра (а) и ваттметра (б)

На принципе электродинамического взаимодействия токов двух катушек построены и ваттметры - приборы для измерения мощности в цепях постоянного

и переменного тока. Неподвижная катушка выполняется проводом большого сечения, имеет малое сопротивление и включается в цепь последовательно. Это токовая обмотка ваттметра. Подвижная катушка или обмотка напряжения ваттметра выполняется проводом малого сечения, обычно рассчитана на ток 30 мА и соединена с добавочным сопротивлением. Обмотка присоединяется параллельно приёмникам энергии. Изменение направления тока в любой из катушек вызывает изменение направления вращающего момента, действующего на подвижную катушку. Поэтому начала обмоток всегда помечают звёздочками. В лабораториях ТОО используются ваттметры типа АСТ-Д с номинальным током 5 А и номинальным напряжением 150 В. Класс точности такого ваттметра - 0,5. Шкала прибора имеет 150 делений. Цена деления прибора (или как говорят: постоянная ваттметра) определяется перемножением пределов тока и напряжения и делением на число делений шкалы:

$$C_w = \frac{U_w \cdot I_w}{N_{дел}} = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \text{ Вт/дел.}$$

Электростатическая система (ж). Измерительный механизм приборов такой системы /вольтметры/ содержат две неподвижные пластинки и одну подвижную, которая имеет форму сегмента и под действием сил электрического поля входит между неподвижными пластинками. Собственное потребление прибора на постоянном токе практически равно нулю, а на переменном токе определяется величиной ёмкости устройства, которая совсем невелика, порядка 4-10 нФ. Это значит, что прибор обладает очень большим входным сопротивлением. Приборы электростатической системы обычно выполняются со световым отсчётом и пригодны для измерений на постоянном и переменном токах частотой от 20 Гц до 10 МГц.

Комбинированные электронные приборы, например типа Щ-4300, предназначены для измерения постоянных и синусоидальных переменных токов и напряжений, а также для измерения сопротивлений. Об их принципе работы и точности измерений можно прочитать в инструкции к прибору.

Электронный осциллограф – предназначен главным образом для наблюдения формы кривой напряжения, но может быть применён и для измерения различных электрических величин: тока, напряжения, частоты, сдвига фаз и т.д. Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка. Для управления лучом в вертикальной и горизонтальной плоскостях

имеются две пары отклоняющих пластин. На X - пластины от внутреннего генератора подаётся пилообразное напряжение, чем обеспечивается периодическая “развёртка” изображения по горизонтали. Исследуемый сигнал подаётся на Y - пластины. Чтобы не вывести прибор из строя, исследуемые напряжения величиной более $42В$ необходимо подавать через подводящий шнур с делителем напряжения. В лабораториях ТОО используются различные типы осциллографов, поэтому назначение регулирующих рукояток и правильная работа с прибором будут пояснены в лаборатории.




Условные обозначения на шкалах приборов

Согласно ГОСТам на электроизмерительных приборах должны быть указаны наименование и тип прибора и нанесены условные обозначения:



- рода тока, типа измерительной системы и класса точности прибора;
- напряжения, которым испытана изоляция прибора;
- вида и категории защиты от влияния внешних полей,
- рабочего положения, заводского номера и года выпуска прибора.

Классы точности приборов: 0,05 0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,5 4,0




Положение прибора:

-  - горизонтальное
-  - вертикальное
-  - под углом 60°

Защитные экраны:

-  - от электрических полей
-  - от магнитных полей

Род тока:

-  - постоянный ток
-  - переменный ток
-  - трёхфазный ток

Испытательное напряжение:


-  - корпус прибора испытан напряжением 2 кВ

Рис.3. Основные условные обозначения на шкалах приборов

Основные из этих условных обозначений приведены на рис.3. Более полный набор условных обозначений приводится в учебниках по метрологии, например: Основы метрологии и электрические измерения/ Под ред. Е.М.Душина.- Л., Энергоатомиздат, 1987.

Класс точности прибора, погрешности измерений

Любые измерения связаны с погрешностями. Различают абсолютную Δ , относительную γ_0 и приведенную γ_n погрешности, которые определяются по формулам:

$$\Delta = x_u - x; \quad \gamma_0 = \frac{\Delta}{x} \cdot 100\%; \quad \gamma_n = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100\%,$$

где: x_n – измеренное значение искомой величины;

x – её истинное значение;

x_n – нормативное значение искомой величины («вся шкала» прибора).

Указанный на приборе класс точности $/0,05 \div 4,0/$ означает приведенную погрешность прибора, т.е. абсолютную погрешность, выраженную в процентах от предела измерения прибора. Допустим, амперметр на ток $5A$ имеет класс точности $0,5$. Это значит, что токи будут измеряться с абсолютной погрешностью

$$\gamma = 5 \cdot 0,5 / 100 = 0,025 A = 25 mA .$$

При выполнении работы прибор надо выбирать так, чтобы измеряемые величины тока или напряжения приходились на область от 25% до 100% шкалы прибора. Если же, например, амперметром на $5A$ будет измеряться ток $0,4A$, то относительная погрешность измерения уже составит:

$$\frac{0,025}{0,4} \cdot 100\% = 6,25\% .$$

При отсчёте показания по прибору со стрелочным указателем глаз наблюдателя должен располагаться в плоскости перпендикулярной к плоскости шкалы. Если прибор имеет зеркальную шкалу, конец стрелки прибора должен совпадать с её отражением в зеркале.

При измерениях полезно заранее оценить цену деления прибора, чтобы затем хорошо ориентироваться “на глаз”, чему будет равна половина, треть или четверть деления шкалы в амперах, миллиамперах или вольтах.

При измерениях электронными приборами Щ-4300, особенно на малых пределах, их показания зачастую колеблются. В таких случаях следует либо перейти на больший предел измерения, либо записать показание с имеющимся разбросом. Результаты измерений желательно записывать с одинаковым количеством десятичных знаков.

В случаях снятия каких-либо зависимостей или, например, при определении сопротивления элемента методом амперметра-вольтметра, считывать показания с приборов необходимо строго одновременно. Это поможет избежать ошибки от колебания подаваемого напряжения. При получении явно сомнительных результатов измерения следует повторить.

Чтобы получить ясную картину исследуемого явления и выбрать пределы измерения тока или напряжения, рекомендуется вначале выполнить опыт, не производя никаких записей.

Графическое изображение результатов исследования

В большинстве случаев результаты исследования удобно представить в графическом виде, потому что это будет компактнее и нагляднее таблиц, особенно для сравнения нескольких зависимостей. Исследуемые в электротехнике величины, как правило, изменяются непрерывно и плавно, без изломов или скачков. Графические построения, сглаживая разброс в

результатах измерений, помогают ещё и приблизиться к истинной зависимости величин.

При оформлении отчёта графики, если они выполняются не на компьютерной технике, должны быть вычерчены карандашом с помощью чертёжных принадлежностей, с соблюдением требований стандартов и единой системы конструкторской документации / ЕСКД /. Приведём некоторые из этих требований.

Условные обозначения элементов на электрических схемах
ГОСТ 2722-2751- 68, 2730 -73, 2728 -74, 2755 -74.

Графическое изображение рекомендуемые размеры, мм	Название и описание элементов
 <p>The image shows three schematic symbols. The first is a battery symbol with a 24V label. The second is a general energy source symbol with a diameter of 10 and a height of 8. The third is a current source symbol with a diameter of 10, a height of 1.5, and a 90-degree angle.</p>	<p>Аккумулятор, гальваническая батарея. Знаки (+ -) допускается не указывать.</p> <p>Общее обозначение источников энергии. Источник ЭДС E, $e(t)$. Стрелка зачернена. Источник тока J_k, $i_k(t)$. Линии вплотную подходят к стрелкам источника.</p>
 <p>The image shows two symbols for electrical contacts: one for a removable contact and one for a non-removable contact.</p>	<p>Контакты разъёмного и неразъёмного соединений.</p> <p>Обозначения токов и напряжений в схемах: напряжение – стрелка зачернена, ток – стрелка не зачернена.</p>
 <p>The image shows two symbols for a circuit breaker. The first is a simple switch symbol with a 30-degree angle and a width of 6-8. The second is a more detailed symbol with a width of 10 and a height of 4.</p>	<p>Рубильник, ключ, выключатель с плавким предохранителем. Подвижный контакт должен быть со стороны схемы. Направление замыкающей-размыкающей силы не регламентируется, но обычно принято: при горизонтальном расположении – сверху вниз, при вертикальном расположении – слева направо.</p>
 <p>The image shows a schematic symbol for a resistor with a width of 10 and a height of 4.</p>	<p>Резистор. Общее обозначение сопротивления. Толщина линии – обычная.</p>
 <p>The image shows two symbols for a rheostat/potentiometer. The first is a simple symbol with a width of 10 and a height of 4. The second is a more detailed symbol with a width of 10 and a height of 4, labeled 'к схеме'.</p>	<p>Реостат /для регулирования тока в цепи/. Неиспользуемый вывод допускается не изображать. Потенциометр, делитель напряжения. Обычно используется на постоянном токе для регулиро-</p>

	вания напряжения, подаваемого на схему.
	<p>Общее обозначение нелинейного сопротивления.</p> <p>Допускаются буквенные пояснения: например, НЭ, $R(I)$, t°.</p>
	<p>Индуктивность. Автотрансформатор. ГОСТ не регламентирует число полуокружностей, но рекомендуются обычно три. Допускается показ сердечника и буквенное обозначение. Отвод – произвольно.</p> <p>Ёмкость /конденсатор/. У электролитического конденсатора обкладки не зачернены, указывается полярность (+).</p>
	<p>Рисунок катушки с обозначением намотки обмотки.</p> <p>Обозначение катушки с ферромагнитным сердечником.</p>
	<p>Диод полупроводниковый.</p> <p>Размеры изображения 6 x 5 или 5 x 4 мм. Не зачернен. Допускается буквенное обозначение.</p>
	<p>Измерительные приборы: А, V, W.</p> <p>У ваттметра указываются начала обмоток тока и напряжения.</p> <p>Лампа накаливания: это её личное обозначение. Возможно общее обозначение как нелинейного элемента.</p>
	<p>Заземление корпуса.</p> <p>Изображается тремя чертами.</p>

Примечание. При увеличении или уменьшении схемы в целом пропорционально изменяются и размеры всех элементов.

Диаграмма или график на странице должны быть расположены вертикально. Если размер графика требует его альбомного расположения на странице, то он должен быть расположен своими осями таким образом, чтобы смотрелся вертикальным при повороте страницы на 90° по часовой стрелке.

Шкалы по осям графика должны быть равномерными, всегда начинаясь с нуля, даже если нет опытных точек, расположенных вблизи начала координат.

Числовые значения величины на шкале должны быть удобными для пользования и не слишком густыми, например, с интервалом в 1 см.

Для удобства построения графиков и пользования ими важен правильный выбор масштабов. ГОСТ рекомендует следующие масштабы: $1, 2, 5, 10 \cdot 10^{-n}$ В/мм или А/мм. Чтобы правильно выбрать масштабы величин по обеим осям, можно исходить из того, что расстояния от нуля до наибольшего значения x и y должны быть примерно равными.

Наименования откладываемых по осям величин и их размерностей *желательно* располагать *на поле графика*, для чего сами оси должны быть несколько длиннее графиков.

Если кривые представляют собой разнородные функции от одного аргумента, необходимо провести дополнительные ординаты с соответствующим масштабом величин.

Нет необходимости стремиться к большим размерам графиков, так как это не улучшает наглядности изображения результатов, и не повышает точности в определении искомой зависимости. Размер графика должен быть таким, чтобы был ясен характер исследуемой зависимости. В большинстве случаев вполне достаточен размер 10x10 см.

Рекомендации по составлению и оформлению отчёта о выполненной лабораторной работе

Отчёт составляется на основе домашних расчётов, выполненных при подготовке к работе, и данных измерений, полученных в ходе выполнения работы в лаборатории и заверенных подписью преподавателя в черновой тетради.

Отчёт оформляется на отдельных листах формата А4 с полями: слева – 25 мм, сверху и снизу – 20 мм, справа – 10 мм. Допускается оформление отчёта на сдвоенных тетрадных листках в клеточку.

Отчёт должен содержать:

- титульный лист с указанием номера и наименования работы, группы, фамилии и инициалов студента-исполнителя. Образец титульного листа приводится ниже;

- цель работы. Для лучшего восприятия она может быть изложена в виде нескольких пунктов, конкретно соответствующих выполняемым опытам. Такое изложение цели будет способствовать конкретной формулировке выводов или заключения по работе;

- по каждому эксперименту должны быть представлены исследуемая схема, краткое пояснение сути опыта и порядка его выполнения /что и где измерено, как рассчитано, куда внесено/, таблицы измеренных величин, построенные по ним диаграммы или графики;

- заключение или выводы по работе, изложенные в соответствии со сформулированной целью работы.

Отчёт не должен быть громоздким. В отчёт не стоит, например, включать пояснения к работе, изложенные в методических указаниях, полные расчёты,

выполненные в домашней подготовке, схемы, рисунки и графики огромных размеров т.п.

Образец титульного листа отчета

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электромеханики и ТОЭ

О Т Ч Ё Т
о лабораторной работе № 2
«Исследование сложной цепи постоянного тока»

Выполнил: студ. Иванов И.Н.
группа ЭПГ-02а-3
Дата выполнения _____

Донецк – 2003

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: Опытное изучение на модели двухпроводной линии электропередачи падения напряжения и потерь мощности в проводах этой линии; зависимостей полезной мощности и коэффициента полезного действия линии от тока нагрузки.

1. Пояснения к работе

При передаче энергии постоянного тока по двухпроводной линии имеет место потеря (или падение) напряжения в линии, а также потеря мощности.

Потерей напряжения ΔU называется разность между напряжением в начале линии U_1 и напряжением в конце линии U_2 (напряжением на зажимах приёмника энергии - на нагрузке):

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (1.1)$$

С другой стороны, потеря напряжения ΔU пропорциональна току I в линии и сопротивлению проводов линии $r_{л}$:

$$\Delta U = I r_{л}. \quad (1.2)$$

Ток в линии зависит от нагрузки, которая определяется величиной сопротивления r_2 потребителя, а также от сопротивления проводов линии $r_{л}$:

$$I = \frac{U_1}{r_2 + r_{л}} = \frac{U_2}{r_2}. \quad (1.3)$$

Потеря мощности ΔP в проводах линии есть

$$\Delta P = I^2 \cdot r_{л}. \quad (1.4)$$

Мощность P_1 в начале линии (мощность, отдаваемая источником питания в линию)

$$P_1 = U_1 \cdot I = \frac{U_1^2}{r_2 + r_{л}} = I^2 \cdot (r_2 + r_{л}). \quad (1.5)$$

Полезная мощность (мощность приёмника энергии)

$$P_2 = U_2 \cdot I = I^2 \cdot r_2 = \frac{U_1^2 \cdot r_2}{(r_2 + r_{л})^2} \quad (1.6)$$

с изменением сопротивления нагрузки r_2 не остаётся постоянной.

При холостом ходе работы линии, то есть когда $r_2 = \infty$, ток в линии равен нулю. Следовательно, мощность P_2 также будет равна нулю (см. (1.6)). Напряжение U_2 в конце линии в этом режиме равно напряжению U_1 в начале

линии, так как отсутствует падение (потеря) напряжения в линии. С увеличением нагрузки (т.е. **при уменьшении сопротивления r_2 нагрузки!**) будет увеличиваться ток I в линии и потеря напряжения ΔU , а напряжение U_2 в конце линии будет уменьшаться (будет становиться всё меньше и меньше по сравнению с U_1).

Мощность P_2 при этом сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться.

При коротком замыкании в конце линии, когда $r_2=0$, ток в линии достигает максимального значения $I_{кз}$. При этом следует считать, что внутреннее сопротивление генератора, питающего линию, равно нулю

$$I_{кз} = \frac{U_1}{r_l}, \quad (1.7)$$

а напряжение U_2 на зажимах потребителя падает до нуля. Мощность P_2 при коротком замыкании также становится равной нулю.

Чтобы определить, при каком значении сопротивления r_2 потребителя мощность P_2 будет максимальной, необходимо взять первую производную по r_2 от выражения для мощности P_2 и приравнять её к нулю, то есть

$$\frac{dP_2}{dr_2} = \frac{U_1^2 \cdot [(r_2 + r_l)^2 - 2 \cdot r_2 \cdot (r_2 + r_l)]}{(r_2 + r_l)^4} = 0, \quad (1.8)$$

откуда

$$r_2 = r_l. \quad (1.9)$$

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой, будет максимальной тогда, когда сопротивление приёмника будет равным сопротивлению проводов линии.

Коэффициент полезного действия (КПД) η линии передачи энергии есть отношение мощности на конце линии P_2 к мощности P_1 на входных зажимах линии, то есть

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I^2 \cdot r_2}{I^2 \cdot (r_2 + r_l)} = \frac{r_2}{r_2 + r_l}. \quad (1.10)$$

При $P_2 = P_{2\max}$ КПД линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{r_2}{r_2 + r_l} = \frac{r_2}{2 \cdot r_2} = 0.5,$$

то есть в этом случае половина энергии, отдаваемой питающим генератором в линию, расходуется на нагревание линии. Обычно линии передачи работают с КПД порядка $0.9 \div 0.95$.

В данной работе исследование линии передачи энергии производится на модели, изготовленной из нихромовой проволоки, рассчитанной на предельный ток до 3А. В качестве нагрузочных сопротивлений используются проволочные

реостаты. Напряжение постоянного тока в начале линии должно быть не выше 30 В.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Зная напряжение сети, выбрать необходимые приборы для исследования падения напряжения и потери мощности в линии при различных нагрузках (рис.1.1).

2.2. Собрать схему соединений рис.1.1. Реостат в схеме должен быть установлен на максимальное сопротивление.

2.3. Изменяя сопротивление реостата, измерить потерю напряжения в каждом проводе линии передачи ΔU^{\prime} и $\Delta U^{\prime\prime}$ при различных токах нагрузки, например, при токах $I=0.5; 1; 1.5; 2$ и т.д. А.

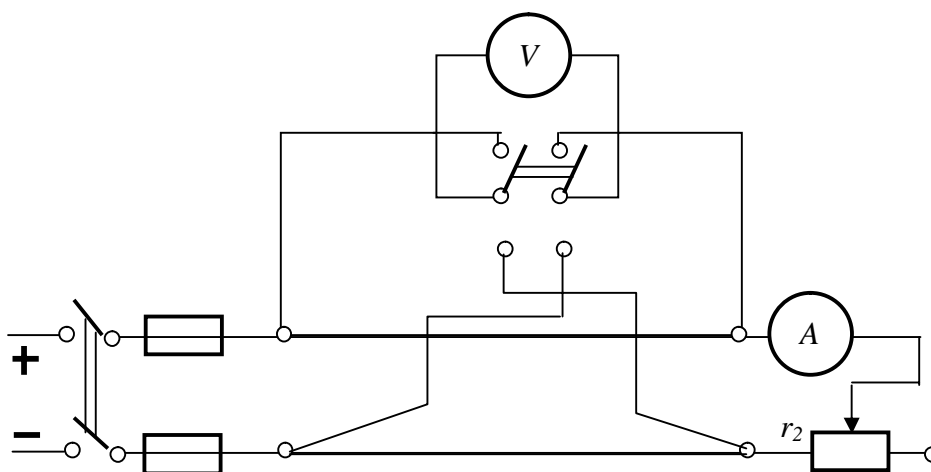


Рис.1.1. Схема для исследования потерь напряжения и мощности в проводах линии передачи в зависимости от тока нагрузки

2.4. Располагая измеренными данными, вычислить $\Delta U = \Delta U^{\prime} + \Delta U^{\prime\prime}$, ΔP и Результаты измерений и вычислений внести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений и вычислений ΔU , ΔP и $r_{л}$

Измерено		Вычислено			
I, A	$\Delta U^{\prime}, B$	$\Delta U^{\prime\prime}, B$	$\Delta U = \Delta U^{\prime} + \Delta U^{\prime\prime}, B$	$\Delta P, Bm$	$r_{л}, Ом$
0,5					
1,0					
.....					
.....					
3,0					

2.5. В общей системе координат построить зависимости $\Delta U(I)$ и $\Delta P(I)$.

2.6. Рассчитать (по данным опытов в табл.1.1) среднее значение сопротивления $r_{л}$ и определить эквивалентную длину двухпроводной воздушной линии из медных проводов сечением меди 6 мм^2 (величину удельного сопротивления меди взять по литературным данным).

2.7. Выполнить схему соединений для исследования передачи энергии при постоянном напряжении U_1 в начале линии (рис.1.2).

2.8. Изменяя сопротивление нагрузки r_2 при поддержке с помощью реостата r_1 постоянства напряжения U_1 , увеличивать ток в цепи. Для нескольких значений тока, например, для $I=0.5; 1; 1.5; 2$ и т.д. A , измерить напряжение в конце линии U_2 . (Для того, чтобы при увеличении тока I в нагрузке напряжение U_1 на входе линии сохранялось неизменным, необходимо уменьшать величину сопротивления реостата r_1 !).

2.9. На основании измерений по схеме рис.1.2 вычислить P_1, P_2 и r_2 .

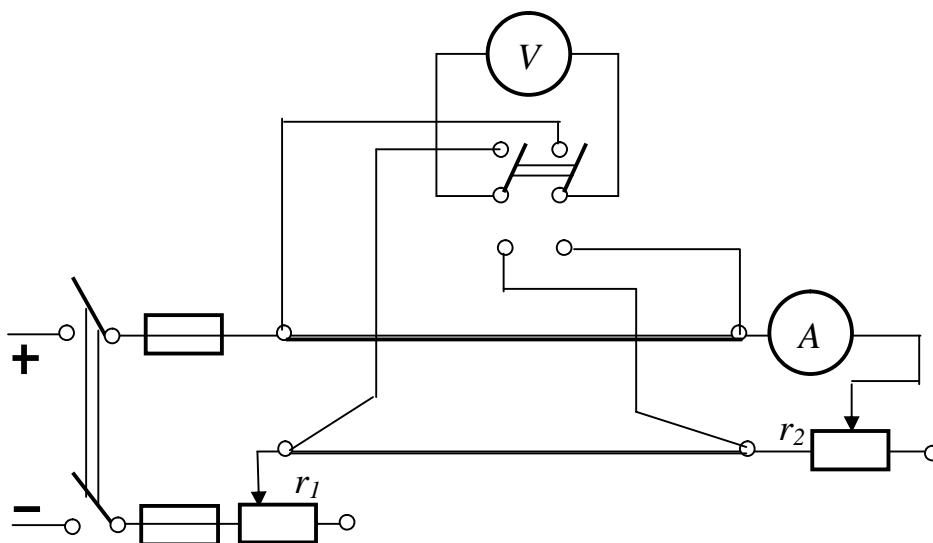


Рис.1.2. Исследование передачи энергии при постоянном напряжении в начале линии

Полученные данные измерений и вычислений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты исследования передачи энергии при постоянном напряжении на входе линии

Измерено			Вычислено			
I, A	U_1, B	U_2, B	P_1, Bm	P_2, Bm	$\eta, \%$	$r_2, Ом$

2.10. Расчётным путём определить значения I , U_2 , P_1 , P_2 и η при холостом ходе ($r_2=\infty$, то есть при разомкнутой цепи нагрузки) и при коротком замыкании ($r_2=0$, то есть при замкнутых накоротко выходных зажимах линии). Напряжение U_1 при этом должно оставаться неизменным.

2.11. В общей системе координат построить кривые зависимостей U_2 , P_1 , P_2 , η и r_2 от тока I (включая режимы холостого хода и короткого замыкания) при $U_1=\text{const}$.

3. Методические указания к оформлению работы

При оформлении отчёта важно чётко разграничить две части работы:

3.1. Исследование падения напряжения и потери мощности в линии в зависимости от тока нагрузки.

3.2. Исследование зависимости напряжения U_2 в конце линии, мощности P_2 и КПД η линии от тока нагрузки при постоянном (неизменном) напряжении U_1 в начале линии.

По каждой части работы в отчёте необходимо привести рабочие схемы, результаты измерений и вычислений в виде соответствующих таблиц, графиков, перечень применяемых приборов (с краткими характеристиками). Выводы сделать по всей работе.

Особое внимание следует обратить на построение графических зависимостей U_2 , P_1 , P_2 , η и r_2 от тока нагрузки. Для каждой из указанных величин необходимо выбрать свой масштаб (однако, для P_1 и P_2 необходимо выбрать один и тот же масштаб).

С целью удобства записи масштаба значений величин система координат должна иметь четыре оси ординат при одном и том же начале отсчёта.

4. Вопросы для самопроверки

4.1. Как будет изменяться напряжение на зажимах приёмника энергии при уменьшении его сопротивления, если напряжение в начале линии неизменно?

4.2. Как определяется ток в линии передачи при коротком замыкании на её конце?

4.3. При каком значении отношения $r_2/r_{\text{л}}$ мощность приёмника P_2 будет максимальной? Каков при этом КПД линии?

4.4. Каково назначение реостата r_1 , включаемого в начале линии?

4.5. Как можно определить КПД η линии?

4.6. Как определяются I , U_2 , P_1 , P_2 , и η при холостом ходе линии?

4.7. Чему равен КПД η линии при максимальном токе нагрузки?

4.8. Как записать условие передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку, если $r_{\text{л}}=0$, то есть, если нагрузка включена непосредственно на зажимы источника?

4.9. Сказывается ли на КПД линии наличие внутреннего сопротивления источника питания?

4.10. Почему напряжение на входе линии, работающей в режиме холостого хода, больше того же напряжения на входе линии, работающей на конкретную нагрузку?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы. Исследование основных свойств линейных электрических цепей постоянного тока: принципа наложения и теоремы об эквивалентном генераторе, а также построение потенциальной диаграммы отдельного контура электрической цепи.

1. Пояснения к работе

Принцип наложения состоит в том, что ток каждой ветви сложной цепи с несколькими источниками определяется алгебраическим суммированием составляющих токов, каждая из которых является функцией только одной ЭДС:

$$I_n = I'_n + I''_n + I'''_n + \dots, \quad (2.1)$$

где $I'_n, I''_n, I'''_n, \dots$ - составляющие токов в ветви n , обусловленные действием ЭДС E_1, E_2, E_3, \dots соответственно.

Знак составляющих тока в ветви n определяется на основании сопоставления направлений этих составляющих и произвольно выбранного положительного направления тока в этой ветви при действии всех источников.

Теорема об эквивалентном генераторе (теорема об активном двухполюснике) обычно применяется в том случае, когда требуется определить ток только в одной ветви сложной электрической цепи.

Согласно этой теореме ток I_{np} в любом элементе (приемнике) r_{np} сложной электрической цепи определяется в следующем порядке.

Разомкнув ветвь с элементом r_{np} , определяют напряжение холостого хода U_{xx} между точками размыкания. Затем определяют входное сопротивление r_{ex} эквивалентного генератора, т.е. сопротивление всей остальной части сложной цепи относительно разомкнутых точек при накоротко замкнутых источниках ЭДС и разомкнутых источниках тока. Искомый ток I_{np} определяется по теореме об эквивалентном генераторе:

$$I_{np} = \frac{U_{xx}}{r_{ex} + r_{np}} \quad (2.2)$$

В настоящей работе исследуется цепь постоянного тока, схема которой приведена на рис.2.1.

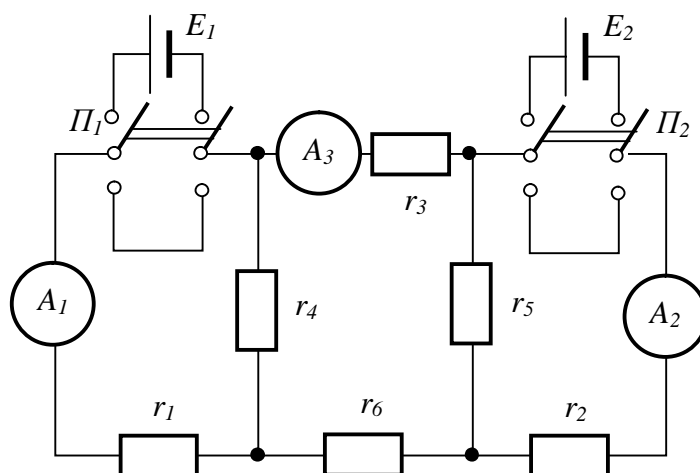


Рис.2.1. Схема исследуемой цепи

2. Подготовка к выполнению работы

При подготовке к лабораторным занятиям (в домашних условиях) необходимо:

2.1. В черновом протоколе испытаний зарисовать схему рис.2.1 исследуемой цепи и во всех ветвях стрелками указать произвольно выбранные положительные направления токов.

2.2. Считая элемент r_3 приемником энергии, в буквенном выражении определить напряжение холостого хода U_{xx} и входное сопротивление $r_{вх}$ эквивалентного генератора. По теореме об эквивалентном генераторе определить ток I_3 .

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать схему рис.2.1, при этом:

а) для измерения токов необходимо использовать миллиамперметры магнитоэлектрической системы на 150 – 500 mA , а для измерения ЭДС источников и напряжения холостого хода эквивалентного генератора – магнитоэлектрический вольтметр на 30 – 50 V .

б) переключатели (тумблеры) Π_1 и Π_2 установить в такое положение, чтобы источники ЭДС были отключены от схемы;

в) миллиамперметры должны быть включены в схему таким образом, чтобы принятые в п. 2.1 положительные направления токов в соответствующих ветвях совпадали с направлением от зажима «+» к зажиму «-» через прибор.

При таком включении отклонение стрелки прибора вправо по шкале свидетельствует о совпадении действительного направления тока с принятым направлением, и, следовательно, ток является положительным. Отклонение

стрелки прибора влево от нулевого деления шкалы указывает на то, что действительное направление тока противоположно принятому за положительное. В этом случае необходимо поменять полярность включения миллиамперметра на противоположное (от «-» к «+») и его показания считать отрицательными.

3.2. Измерить ЭДС источников E_1 и E_2 . Результаты измерений записать в табл. 2.1. В эту же таблицу записать также величины сопротивлений элементов цепи (указаны на щитке лабораторного стола).

Таблица 2.1

ЭДС источников напряжения и сопротивления элементов цепи

$E_1, В$	$E_2, В$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$r_3, Ом$	$r_4, Ом$	$r_5, Ом$	$r_6, Ом$

3.3. Исследовать цепь с применением принципа наложения.

3.3.1. Исследовать распределение токов в ветвях цепи при действии только ЭДС E_1 . Для этой цели переключатели Π_1 и Π_2 нужно установить в такое положение, чтобы ЭДС E_1 была включена, а ЭДС E_2 - отключена, при этом вся остальная часть цепи должна остаться без изменений.

Результаты измерений внести в табл. 2.2.

3.3.2. Исследовать распределение токов в ветвях цепи при действии только ЭДС E_2 , для чего переключатели Π_1 и Π_2 установить в соответствующие положения.

Результаты измерений также внести в табл. 2.2.

3.3.3. По принципу наложения выполнить алгебраическое суммирование составляющих токов в ветвях и результаты внести в табл. 2.2.

3.3.4. Исследовать распределение токов в ветвях при действии обоих источников ЭДС E_1 и E_2 .

Результаты измерений внести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты исследования принципа наложения

Токи при воздействии только ЭДС E_1	$I'_1 = \dots\dots mA$	$I'_2 = \dots\dots mA$	$I'_3 = \dots\dots mA$
Токи при воздействии только ЭДС E_2	$I''_1 = \dots\dots mA$	$I''_2 = \dots\dots mA$	$I''_3 = \dots\dots mA$
Токи, полученные путем суммирования составляющих токов	$I_1 = \dots\dots mA$	$I_2 = \dots\dots mA$	$I_3 = \dots\dots mA$
Измеренные токи при включенных ЭДС E_1 и E_2	$I_1 = \dots\dots mA$	$I_2 = \dots\dots mA$	$I_3 = \dots\dots mA$

3.3.5. Сравнить токи ветвей, полученные в п. 3.3.3 и 3.3.4.

- 3.4. Исследовать цепь с применением метода эквивалентного генератора.
- 3.4.1. Определить величину напряжения холостого хода эквивалентного генератора расчетным путем, использовав для этой цели выражение для U_{xx} , полученное в п. 2.2. Результаты расчета внести в табл. 2.3.
- 3.4.2. При включенных источниках ЭДС E_1 и E_2 измерить напряжение холостого хода U_{xx} на зажимах разомкнутой ветви с сопротивлением r_3 . Сравнить измеренное значение U_{xx} с рассчитанным в предыдущем пункте. Результаты измерений внести в табл. 2.3.
- 3.4.3. Аналитически определить величину входного сопротивления эквивалентного генератора, использовав для этой цели выражение для r_{ex} , полученное в п. 2.2. Результаты расчета внести в табл. 2.3.
- 3.4.4. Проверить величину r_{ex} экспериментальным путем. С этой целью при включенных источниках ЭДС E_1 , E_2 и замкнутом накоротко сопротивлении r_3 измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$, после чего определить экспериментальное значение $r_{ex} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}$.

Результаты измерений внести в табл. 2.3.

- 3.4.5. По теореме об эквивалентном генераторе вычислить ток в ветви с сопротивлением r_3 и сравнить его с величиной этого тока, полученной в п. 3.3.4 по методу наложения (при определении тока I_3 использовать измеренное напряжение U_{xx} и экспериментально полученное сопротивление r_{ex}). Результаты исследований также записать в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты исследования цепи методом эквивалентного генератора

Напряжение холостого хода U_{xx} , В		Ток короткого замыкания $I_{кз}$, мА	Входное сопротивление r_{ex} , Ом		Ток I_3 , мА	
Измерено	Вычислено	Измеренный	Эксперимент	Вычислено	Эксперимент	Вычислено

4. Построить потенциальную диаграмму контура исследуемой цепи.

- 4.1. Для заданного преподавателем контура цепи рис.2.1 рассчитать потенциалы характерных точек, приняв одну из них заземленной. Результаты расчета занести в табл. 2.4.

Потенциалы характерных точек контура

Контур	Точка	Потенциал

4.2. По данным таблицы 2.4 построить потенциальную диаграмму контура.

5. Вопросы для самопроверки

- 5.1. В чем заключается принцип наложения?
- 5.2. Определите ток в ветви с ЭДС E_1 (рис.2.1) методом наложения.
- 5.3. В чем заключается сущность теоремы об эквивалентном генераторе?
- 5.4. Как определить ЭДС эквивалентного генератора и его внутреннее сопротивление?
- 5.5. Определите ток в ветви с ЭДС E_2 (рис.2.1) методом эквивалентного генератора.
- 5.6. Что представляет собой потенциальная диаграмма и как она строится?
- 5.7. Как изменяется потенциал при переходе через сопротивление навстречу току, протекающему через него?
- 5.8. Как изменяется потенциал при переходе через источник ЭДС по направлению, встречному стрелке источника?

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы. Экспериментальное определение параметров и выяснение основных свойств цепей с последовательным соединением приемников. Исследование условий возникновения резонанса напряжений и определение его признаков.

1. Пояснения к работе

При последовательном соединении активного r , индуктивного x_L и ёмкостного x_C сопротивлений (рис.3.1,а) мгновенное значение напряжения источника согласно второму закону Кирхгофа определяется алгебраической суммой мгновенных значений напряжений на отдельных элементах:

$$u = u_r + u_L + u_C,$$

а действующее значение напряжения источника – векторной суммой действующих значений напряжений на отдельных элементах, что изображено на векторной диаграмме (рис.3.1,б). Это напряжение может быть рассчитано по формуле :

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = I \cdot z, \quad (3.1)$$

где: $U_r = I r$ - напряжение на активном сопротивлении;

$U_L = I x_L$ и $U_C = I x_C$ - напряжения на индуктивности и на емкости соответственно,

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}, \quad - \text{ полное сопротивление цепи,} \quad (3.2)$$

где: $x_L = \omega L = 2 \pi f L$ и $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi f C}$ - индуктивное и емкостное сопротивления соответственно,

$x = x_L - x_C$ - реактивное сопротивление цепи.

Для цепей с любым количеством последовательно соединенных активных, индуктивных и емкостных элементов справедливо:

$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots = \sum r_i$ - общее активное сопротивление цепи,

$x = (x_{L1} + x_{L2} + x_{L3} + \dots) - (x_{C1} + x_{C2} + x_{C3} + \dots) = \sum x_{Li} - \sum x_{Ci}$ - общее реактивное сопротивление цепи.

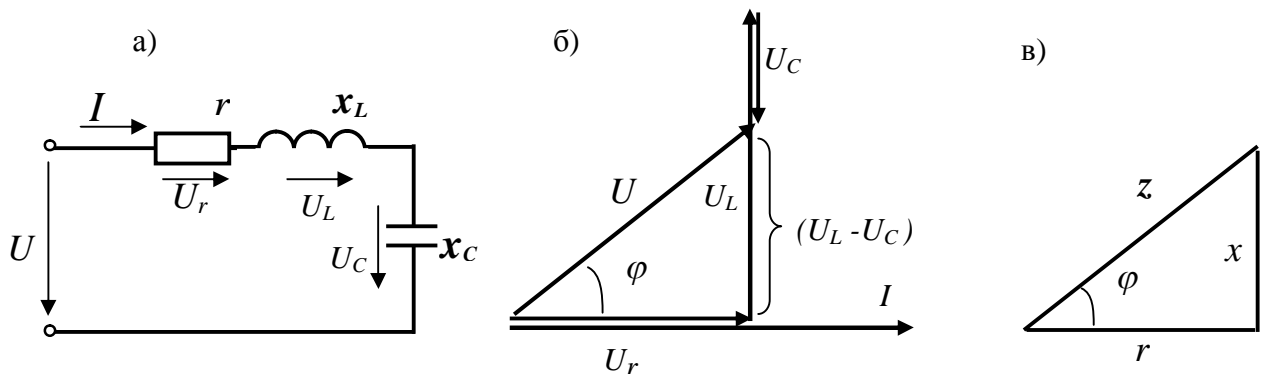


Рис.3.1. Схема, векторная диаграмма и треугольник сопротивлений при последовательном соединении элементов

Полное сопротивление цепи z , активное r и реактивное $x = x_L - x_C$ образуют прямоугольный треугольник сопротивлений (рис.3.1.в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}, \quad r = z \cdot \cos \varphi, \quad x = z \cdot \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg x/r \quad (3.3)$$

Коэффициент мощности цепи $\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{P}{S},$ (3.4)

где: $P = UI \cos \varphi = I^2 r$ - активная мощность,

$Q = UI \sin \varphi = I^2 x$ - реактивная мощность,

$$S = U I = \sqrt{P^2 + Q^2} - \text{полная мощность.}$$

В зависимости от соотношения между x_L и x_C характер цепи может быть индуктивным или емкостным.

При выполнении условия $x_L = x_C$ в цепи с последовательным соединением индуктивности и емкости возникает режим резонанса напряжений – состояние, при котором напряжение, приложенное к цепи, совпадает по фазе с током.

Очевидно, что общее реактивное сопротивление цепи при резонансе будет равняться нулю, а полное сопротивление - равно активному:

$$x = x_L - x_C = 0, \quad z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r. \quad (3.5)$$

Ток в цепи при неизменном напряжении источника питания U достигает максимального значения:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{r}.$$

Напряжения на реактивных сопротивлениях в режиме резонанса равны между собой и по величине могут значительно превышать напряжение питания:

$$U_L = U_C = I \cdot x_L = I \cdot x_C = U \cdot Q, \quad (3.6)$$

где $Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1/\omega C}{r}$ - добротность резонансного контура.

При $Q > 1$ напряжения на индуктивности и на емкости превышают величину напряжения источника.

Источником питания в данной работе служит сеть синусоидального напряжения 127 В , 50 Гц .

В качестве приемников энергии используются:

- 1) проволочный ползунковый реостат с сопротивлением R ;
- 2) конденсаторная батарея емкостью C , сопротивление которой можно считать чисто емкостным;
- 3) катушка индуктивности с ненасыщенным стальным сердечником, обладающая как индуктивным x_K , так и активным r_K сопротивлениями.

Изменение индуктивности катушки осуществляется путем изменения величины воздушного зазора между сердечником и ярмом магнитопровода катушки, при этом с увеличением зазора индуктивность уменьшается.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Исследование цепи, состоящей из последовательного соединения реостата и катушки индуктивности.

2.1.1. Собрать рабочую схему рис.3.2.

2.1.2. Подав напряжение на схему и, выдвигая сердечник из катушки, установить ток в цепи $1-2 \text{ А}$.

2.1.3. Для выбранного значения тока измерить: напряжение на зажимах реостата U_R , катушки U_K и общее напряжение U , а также потребляемую мощность P . Результаты измерений занести в табл. 3.1.

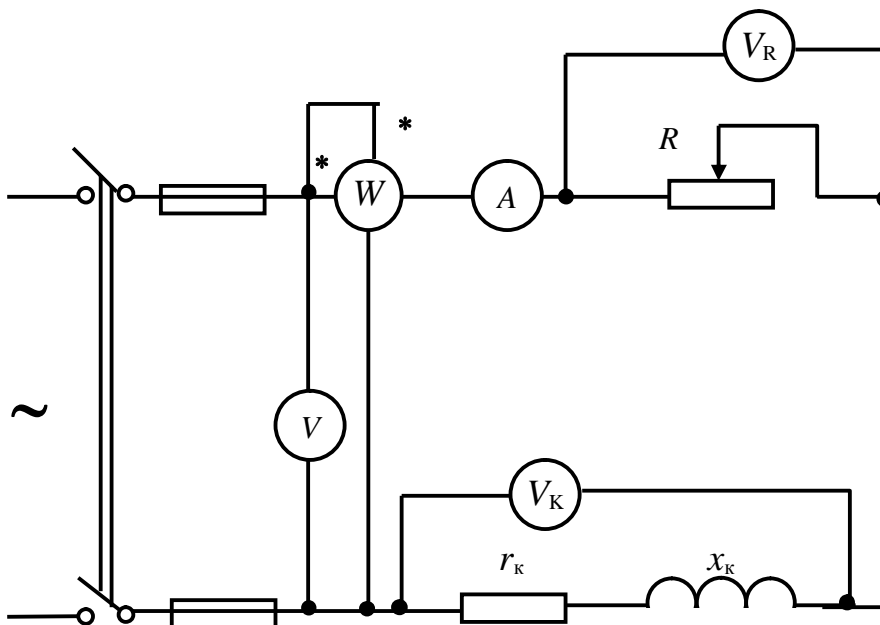


Рис.3.2. Схема для исследования последовательного соединения реостата и катушки индуктивности

2.1.4. На основании полученных данных определить: активное сопротивление всей цепи r , полное сопротивление z , активное сопротивление реостата R , активное сопротивление катушки r_K , полное и индуктивное сопротивление катушки z_K и x_K , индуктивность катушки L_K , коэффициент мощности катушки $\cos\varphi_K$ и всей цепи $\cos\varphi$, активное $U_{ак}$ и реактивное $U_{Lк}$ напряжение на катушке. Результаты вычислений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты исследования цепи при последовательном соединении реостата и катушки

Измерено					Вычислено											
$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_R,$ B	$U_K,$ B	$r,$ Om	$z,$ Om	$R,$ Om	$r_K,$ Om	$z_K,$ Om	$x_K,$ Om	$\cos\varphi_K$	$L,$ $Гн$	$\cos\varphi$	$U_{ак},$ B	$U_{Lк},$ B	

2.1.5. По данным табл. 3.1 в масштабе построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений для исследуемой цепи.

2.2. Исследование цепи, состоящей из последовательного соединения реостата и конденсаторной батареи.

2.2.1. Собрать рабочую схему (рис.3.3.).

2.2.2. Зная напряжение и частоту сети, сопротивление реостата (из предыдущего опыта) и емкость конденсаторной батареи (указана на рабочем щитке), рассчитать сопротивление конденсатора x_C , полное сопротивление цепи z , ток цепи I , напряжения на реостате U_R и конденсаторной батарее

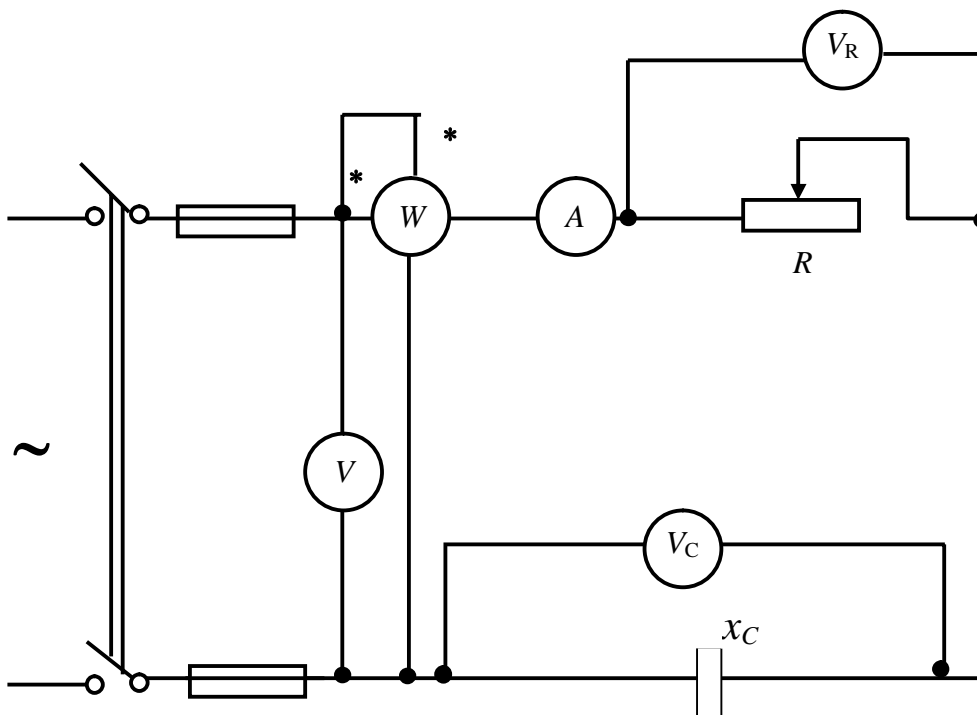


Рис.3.3. Схема для исследования последовательного соединения реостата и конденсаторной батареи

U_C , потребляемую мощность P и коэффициент мощности $\cos \varphi$. Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты исследования цепи при последовательном соединении реостата и конденсаторной батареи

Расчет											Эксперимент				
Исходные данные				Вычислено											
U , B	R , Ω	C , $\mu\text{кФ}$	f , $\Gamma\text{ц}$	x_C , Ω	z , Ω	I , A	P , $B\text{т}$	U_R , B	U_C , B	$\cos\varphi$	U , B	I , A	U_R , B	U_C , B	P , $B\text{т}$

2.2.3. Измерить напряжение на зажимах реостата U_R , конденсаторной батарее U_C и общее напряжение U , а также ток I и потребляемую мощность P . Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Сравнить результаты расчета и измерений.

2.2.4. В масштабе построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений для исследуемой цепи.

2.3. Исследование резонанса напряжений.

2.3.1. Собрать схему рис.3.4, включив последовательно с катушкой и конденсаторной батареей реостат R в качестве добавочного активного сопротивления с целью ограничения тока и напряжений при резонансе.

2.3.2. Выдвигая сердечник из катушки, постепенно уменьшать ее индуктивное сопротивление, добиться режима резонанса, при котором ток в цепи достигает максимального значения. С помощью реостата установить ток в режиме резонанса равным 2 - 2,5 А и занести показания приборов в табл. 3.3.

2.3.3. Изменяя положение сердечника (выдвигая и вдвигая его), снять и занести показания приборов в табл. 3.3 для двух режимов $x_L < x_C$ и $x_L > x_C$, добиваясь при этом значений тока 1.0 – 1.5 А.

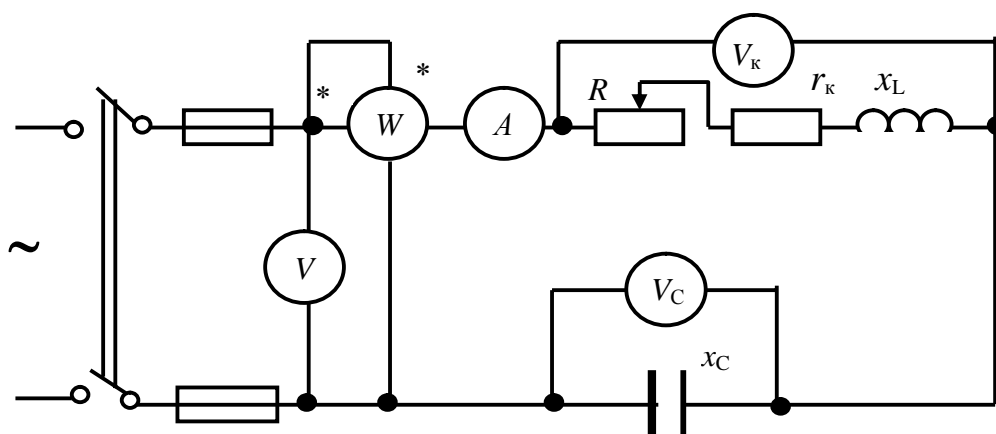


Рис.3.4. Схема для исследования резонанса напряжений

Таблица 3.3

Результаты исследования резонанса напряжений

№ пп	Измерено					Вычислено									
	U , В	I , А	P , Вт	U_K , В	U_C , В	r , Ом	z , Ом	z_K , Ом	x_L , Ом	L , Гн	x_C , Ом	U_L , В	U_a , В	$\cos\varphi$	
1.															
2.															
3.															

2.3.4. По результатам измерений вычислить: r , z , z_K , x_L , L , x_C , U_L , U_a для всех случаев по п.3.2. и 3.3. Результаты вычислений занести в табл. 3.3.

2.3.5. По данным табл. 3.3 в масштабе построить векторные диаграммы цепи для 3-х случаев: 1) $x_L > x_C$; 2) $x_L = x_C$; 3) $x_L < x_C$.

3. Вопросы и задачи для самопроверки

- 3.1. Какой физический имеет смысл активное сопротивление?
- 3.2. Как и почему отличается активное сопротивление от омического?
- 3.3. Что такое индуктивность, ёмкость?

3.4. Как зависят активное, индуктивное и емкостное сопротивления от частоты?

3.5. Чему равен угол сдвига фаз между напряжением и током:

а) в реостате, б) в индуктивности, в) в емкости?

3.6. Как с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра можно определить индуктивное сопротивление и коэффициент мощности катушки?

3.7. Что понимают под активной, реактивной и полной мощностями цепи?

3.8. Какую мощность измеряет ваттметр?

3.9. Известны показания приборов в схеме рис.3.2: вольтметра $V-100\text{ В}$, ваттметра $W-160\text{ Вт}$, амперметра $A-2\text{ А}$, вольтметра $V_R-60\text{ В}$. Определить параметры катушки и реостата.

3.10. При каких условиях возникает резонанс напряжений?

3.11. Как практически можно достигнуть резонанса напряжений?

3.12. Почему при резонансе в последовательном контуре напряжения на катушке U_K и на конденсаторе U_C не одинаковы?

3.13. Каково назначение реостата R при исследовании резонанса напряжений?

3.14. Чему равен $\cos\varphi$ (коэффициент мощности цепи) в момент резонанса напряжений?

3.15. При каких условиях величина напряжения на конденсаторе может превысить напряжение источника?

3.16. При каком соотношении между сопротивлениями r_K , x_L и x_C , соединенными последовательно, напряжение на конденсаторе U_C при резонансе будет в 2 раза больше входного напряжения U ?

Примечание. Расчеты по п.п. 3.9 и 3.16 выполнить при подготовке к лабораторным занятиям и привести в отчете о лабораторной работе.

Лабораторная работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ВЕТВЕЙ И РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Цель работы. Определение параметров и выяснение основных соотношений и свойств цепей при параллельном соединении активных и реактивных элементов. Исследование условий возникновения резонанса токов и его признаков.

1. Пояснения к работе

При параллельном соединении активного r , индуктивного x_L и емкостного x_C сопротивлений (рис.4.1,а) мгновенное значение тока источника согласно первому закону Кирхгофа равно алгебраической сумме мгновенных значений токов, протекающих через отдельные элементы :

$$i = i_r + i_L + i_C,$$

а действующее значение тока источника – векторной суммой действующих значений токов в отдельных элементах (рис.4.1,б) и определяется формулой:

$$I = \sqrt{I_r^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{(U \cdot g)^2 + (U \cdot b_L - U \cdot b_C)^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \cdot y, \quad (4.1)$$

где : $g = 1/r$, $b_L = 1/x_L$, $b_C = 1/x_C$ – активная индуктивная и ёмкостная проводимости, соответственно;

$b = b_L - b_C$ – реактивная проводимость; y – полная проводимость цепи.

В общем случае при параллельном соединении нескольких ветвей их эквивалентные величины определяются по формулам:

$$g = \sum_{k=1}^n g_k, \quad b_L = \sum_{k=1}^n b_{Lk}, \quad b_C = \sum_{k=1}^n b_{Ck}.$$

Полная проводимость цепи y , активная g и реактивная b проводимости составляют прямоугольный треугольник (треугольник проводимостей рис.4.1,в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = y \cdot \cos \varphi, \quad b = y \cdot \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg b/g \quad (4.2)$$

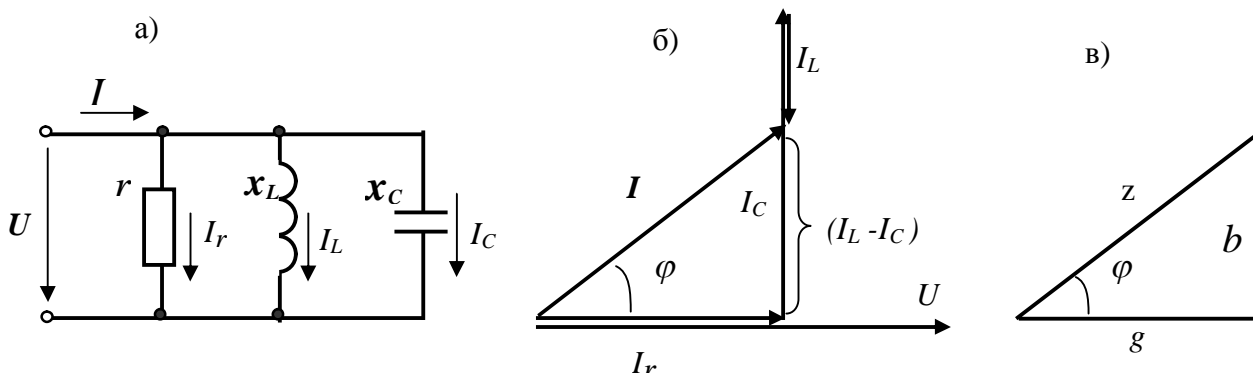


Рис.4.1. Схема, векторная диаграмма и треугольник проводимостей при параллельном соединении элементов

При выполнении данной работы параллельно включаются ветви, состоящие из последовательного соединения активных и реактивных элементов. Поэтому ток какой-либо ветви может определяться по составляющим

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (4.3)$$

где: $I_a = I \cdot \cos \varphi$ - активный ток ; $I_p = I \cdot \sin \varphi$ - реактивный ток.

Тогда активная, реактивная и полная проводимости такой ветви:

$$g = \frac{I_a}{U} = \frac{I \cdot \cos \varphi}{U} = y \cdot \cos \varphi = \frac{r}{z^2}, \quad b = \frac{I_p}{U} = \frac{I \cdot \sin \varphi}{U} = y \cdot \sin \varphi = \frac{x}{z^2},$$

$$y = \frac{I}{U} = \frac{1}{z} = \sqrt{g^2 + b^2}.$$

Активная и реактивная мощности:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U^2 \cdot g, \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U^2 \cdot x.$$

В случае, когда реактивные проводимости Σb_L и Σb_C равны, в цепи возникает резонанс токов.

$$b_L = b_C - \text{условие возникновения резонанса в параллельном контуре.} \quad (4.4)$$

При резонансе токов общая реактивная проводимость цепи $b = b_L - b_C = 0$, общий реактивный ток $I_p = I_L - I_C = U \cdot b_L - U \cdot b_C = 0$, а ток неразветвленной части цепи носит чисто активный характер:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = I_a = U \cdot g.$$

При этом ток в общей части цепи I находится вблизи минимума и совпадает по фазе с напряжением U , угол сдвига фаз $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

В настоящей работе резонанс токов достигается путем изменения индуктивности реактивной катушки при постоянных значениях напряжения и частоты тока.

2. Порядок выполнения работы

1. Исследование цепи при параллельном соединении приемников.

1.1. Собрать рабочую схему рис.4.2.

1.2. Пользуясь 1-полюсными рубильниками P_1 , P_2 и P_3 , включить в цепь сначала только катушку и, выдвигая сердечник, установить ток в ней 1,5 - 2 А.

Затем включить только ветвь с конденсаторной батареей, и, наконец, только реостат.

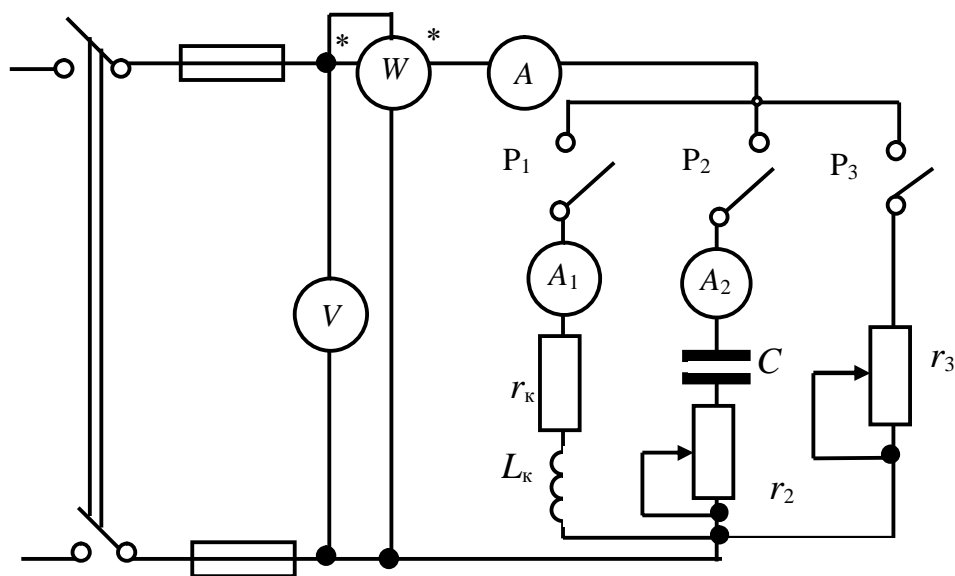


Рис.4.2. Схема для исследования параллельного соединения приемников энергии

В каждом случае измерить напряжение U , ток I , потребляемую мощность P и вычислить: полную S и реактивную Q мощности, коэффициент мощности

$\cos \varphi$, активный I_a и реактивный I_p токи, активную g , реактивную b и полную y проводимости.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

1.3. Включить попарно: а) реостат и катушку; б) реостат и ветвь с конденсаторной батареей (исследование провести при тех же значениях токов в них, что и в п.1.2, т.е. при тех же положениях сердечника и движка реостатов).

В каждом случае произвести измерения и вычисления тех же величин, что и в п.1.2.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

1.4. По данным табл. 4.1 построить в масштабе векторные диаграммы цепи для случаев параллельного соединения: а) реостата и катушки; б) реостата и ветви с конденсаторной батареей. На векторных диаграммах показать все активные и реактивные составляющие токов.

Таблица 4.1

Результаты исследования цепи при параллельном соединении приемников

№ пп	Включено	Измерено			Вычислено							
		$U,$ V	$I,$ A	$P,$ W	$S,$ VA	$Q,$ Var	$\cos \varphi$ -	$I_a,$ A	$I_p,$ A	$g,$ Cm	$b,$ Cm	$y,$ Cm
1	Катушка											
2	Ветвь с конденсаторной батареей											
3	Реостат											
4	Реостат и катушка											
5	Реостат и ветвь с конденсаторной батареей											

2. Исследование резонанса токов.

2.1. Включить параллельно катушку и ветвь с конденсаторной батареей (рис.4.2.). Выдвигая сердечник из катушки, постепенно уменьшать ее индуктивность. При этом будет изменяться как ток I_1 в цепи катушки, так и ток I в общей части цепи. Последний при равенстве проводимостей b_L и b_C (резонанс токов) достигает практически наименьшего значения. Более точно момент наступления резонанса можно определить по показаниям вольтметра V , ваттметра W и амперметра A . При резонансе токов $\cos \varphi = 1$ и $P = UI$. Для трёх положений сердечника ($b_L > b_C$, $b_L = b_C$ и $b_L < b_C$) измерить U , I_1 , I_2 , P и P_2 .

Результаты измерений занести в табл. 4.2.

Примечания: а) т. к. напряжение U практически неизменно, то мощность P_2 ветви с конденсаторной батареей можно взять из табл.4.1;

б) активная мощность катушки определяется по формуле $P_1 = P - P_2$.

2.2. Для всех случаев измерений по п.2.1 вычислить следующие величины:
 $P_1, I_{a1}, I_{p1}, I_{a2}, I_{p2}, g_1, g_2, b_L, b_C, \cos \varphi$.
 Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты исследования резонанса токов

№ пп	Измерено						Вычислено									
	$U,$ B	$I,$ A	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$P,$ Bm	$P_2,$ Bm	$P_1,$ Bm	$I_{a1},$ A	$I_{p1},$ A	$I_{a2},$ A	$I_{p2},$ A	$g_1,$ Cm	$g_2,$ Cm	$b_L,$ Cm	$b_C,$ Cm	$\cos \varphi$
1																
2																
3																

2.3. По данным табл. 4.2 построить векторные диаграммы и треугольники проводимостей цепи для трёх случаев: а) $b_L > b_C$; б) $b_L = b_C$; в) $b_L < b_C$.

3. Вопросы и задачи для самопроверки

3.1. Какие токи называют активными и реактивными?

3.2. Как определяются активная, реактивная и полная проводимости?

3.3. При каких условиях в электрических цепях возникает резонанс токов?

3.4. Как практически можно получить резонанс токов?

3.5. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса токов?

3.6. Чему равняется реактивный ток в общей части цепи (например, в линии передачи) при резонансе токов?

3.7. Где используются на практике режимы, близкие к резонансу токов?

3.8. Реостат и катушка включены параллельно, при этом ток реостата

$I_{реост} = 2 \text{ A}$, активный и реактивный токи катушки соответственно равны $I_{ак} = 1 \text{ A}$ и $I_{Лк} = 4 \text{ A}$. Определить ток в общей части цепи.

3.9. Реостат и конденсаторная батарея включены параллельно на напряжение сети $U = 130 \text{ B}$. Сопротивления реостата и конденсатора $r = x_C = 100 \text{ Ом}$.

Определите ток в общей части цепи.

3.10. Определите емкость конденсаторной батареи, которую нужно подключить параллельно катушке п.1.2 (табл.5.1) для повышения $\cos \varphi$ до 0.9 ($\varphi > 0$).

Примечание. Ответы на вопросы 3.1-3.9 подготовить до начала лабораторных занятий, а ответ на вопрос 3.10 - при оформлении отчета о лабораторной работе.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОГО СОЕДИНЕНИЯ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы. Выявление основных свойств цепей синусоидального тока при смешанном соединении. Экспериментальная проверка расчета смешанного соединения, в основу которого положено использование метода проводимостей.

1. Пояснения к работе

Использование метода проводимостей позволяет в схеме смешанного соединения заменить параллельно включенные ветви одной эквивалентной, после чего получается схема последовательного соединения, ток в которой легко определяется по закону Ома.

Рекомендуемый порядок расчета токов в схеме смешанного соединения.

1. Определяем активные и реактивные проводимости каждой из параллельно включенных ветвей. Например, для схемы рис.5.1,а

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{r_2}{r_2^2 + x_{C2}^2}; \quad b_2 = \frac{-x_{C2}}{z_2^2} = \frac{-x_{C2}}{r_2^2 + x_{C2}^2}; \quad g_3 = \frac{r_3}{z_3^2} = \frac{r_3}{r_3^2 + x_L^2}; \quad b_3 = \frac{x_L}{z_3^2} = \frac{x_L}{r_3^2 + x_L^2}.$$

Определяем активную, реактивную и полную проводимости эквивалентной ветви:

$$g_9 = g_2 + g_3; \quad b_9 = b_2 + b_3; \quad y_9 = \sqrt{g_9^2 + b_9^2}.$$

2. Определяем полное, активное и реактивное сопротивления эквивалентной ветви:

$$z_9 = \frac{1}{y_9}; \quad r_9 = g_9 \cdot z_9^2; \quad x_9 = b_9 \cdot z_9^2.$$

Следует заметить, что b_9 и x_9 могут получиться как положительными (индуктивный характер), так и отрицательными (ёмкостный характер).

3. Определяем полное сопротивление всей цепи согласно рис.5.1,б :

$$z = \sqrt{(r_1 + r_9)^2 + (-x_{C1} + x_9)^2}.$$

4. Рассчитываем ток в неразветвленной части цепи:

$$I_1 = \frac{U}{z}.$$

5. По схеме рис.5.1,б определяем напряжение на параллельных ветвях:

$$U_{23} = I_1 \cdot z_3.$$

6. Определяем токи в параллельно включенных ветвях:

$$I_2 = \frac{U_{23}}{z_2} = \frac{U_{23}}{\sqrt{r_2^2 + x_{C2}^2}}; \quad I_3 = \frac{U_{23}}{z_3} = \frac{U_{23}}{\sqrt{r_3^2 + x_L^2}}.$$

7. Строим векторную диаграмму. Для схемы рис.5.1,а полная векторная диаграмма приведена на рис.5.1,

8. в.

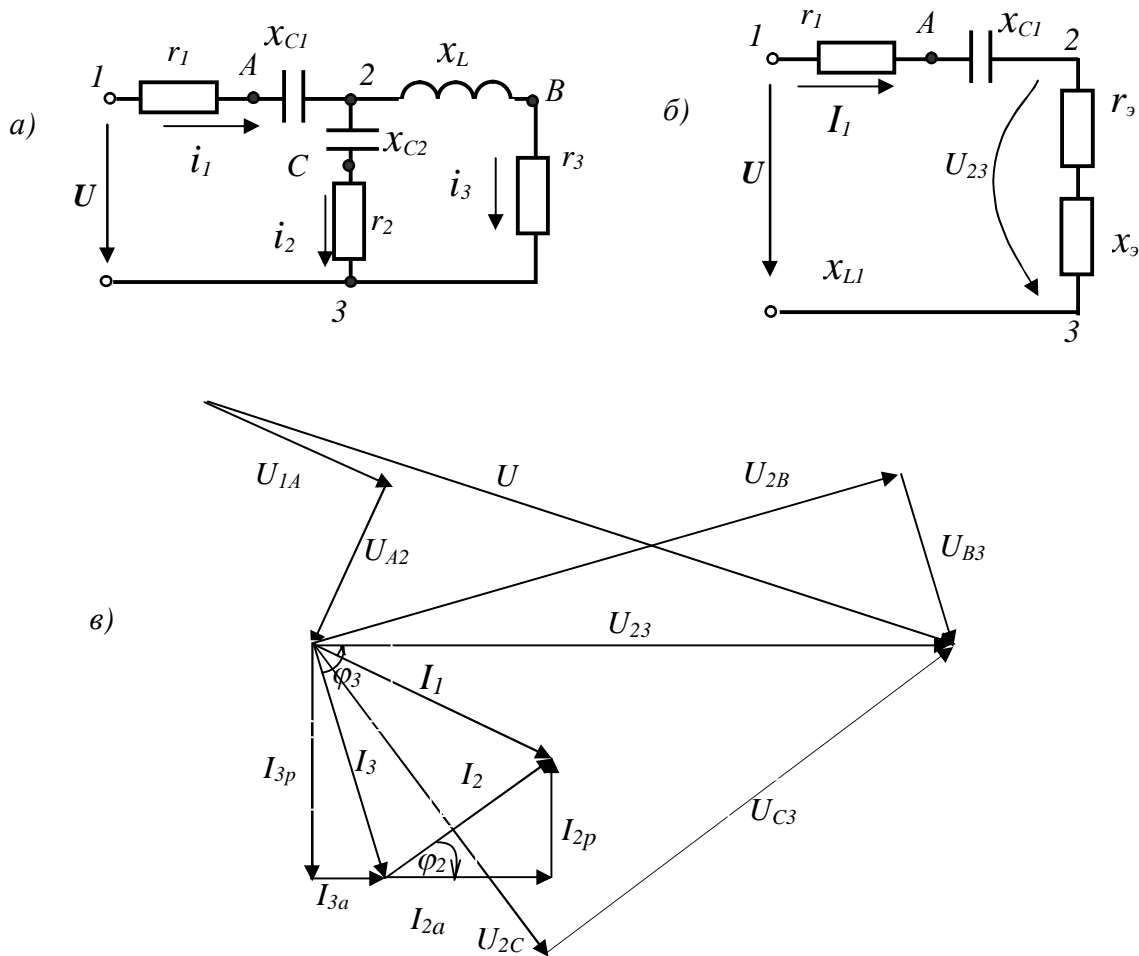


Рис.5.1. Пример схемы смешанного соединения и её векторная диаграмма

Рекомендуемый порядок построения векторной диаграммы.

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора напряжения U_{23} , положение которого может быть произвольным. Остальные векторы напряжений и токов имеют строго определённые положения относительно выбранного вектора U_{23} .

Далее выполняется построение векторной диаграммы токов. Вектор тока I_3 отстаёт по фазе (повернут по часовой стрелке) на угол $\varphi_3 = \arctg x_L/r_2$ от

вектора напряжения U_{23} вследствие индуктивного характера сопротивления третьей ветви. Построение вектора тока I_2 может быть выполнено по составляющим: активная составляющая $I_{2a} = U_{23} \cdot g_3$ совпадает с напряжением U_{23} , реактивная (индуктивная) составляющая $I_{2p} = U_{23} \cdot b_3$ отстает от U_{23} на 90° . Ток I_2 имеет активно-емкостный характер, поэтому его вектор опережает (повернут против часовой стрелки) на угол $\varphi_2 = \arctg x_{C2}/r_2$ вектор напряжения U_{23} . Построение вектора тока I_2 также может быть выполнено по составляющим: активная составляющая I_{2a} совпадает с напряжением U_{23} , реактивная (емкостная) составляющая I_{2p} опережает U_{23} на 90° .

Ток в неразветвленной части цепи согласно первому закону Кирхгофа равен векторной сумме токов в параллельно включенных ветвях: $I_1 = I_2 + I_3$.

Построение векторов напряжений U_{A2} , U_{1A} осуществляем относительно вектора тока I_1 . По отношению к току I_1 вектор $U_{A2} = I_1 \cdot x_{C1}$ (напряжение на емкости) отстает на 90° , $U_{1A} = I_1 \cdot r$ (напряжение на активном сопротивлении) совпадает. Согласно второму закону Кирхгофа в векторной форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_{23} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{1A}, \text{ а } \underline{U}_{23} = \underline{U}_{B3} + \underline{U}_{2B} \text{ и } \underline{U}_{23} = \underline{U}_{C3} + \underline{U}_{2C},$$

причем $U_{B3} = I_3 \cdot r_3$ совпадает с током I_3 , а $U_{2B} = I_3 \cdot x_L$ опережает этот ток на 90° ; соответственно $\underline{U}_{C3} = I_2 \cdot r_2$ совпадает с током I_2 , а $U_{2C} = I_2 \cdot x_{C2}$ отстает от этого тока на 90° .

При построении векторных диаграмм сложение векторов токов и напряжений согласно законам Кирхгофа можно производить в любой последовательности. Однако, если требуется совместить векторную и топографическую диаграммы, то сложение векторов напряжений производится строго в той же последовательности, в которой они находятся на схеме. И каждый вектор напряжения на диаграмме определяет положение комплексных потенциалов соответствующих узлов схемы, причём конец вектора указывает положение той точки, которая в индексации напряжения стоит первой.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему смешанного соединения согласно рис.5.2.

Источником питания в данной схеме служит сеть синусоидального напряжения 127 В , 50 Гц .

В качестве приемников энергии используются:

- 1) проволочный ползунковый реостат с сопротивлением R (60-100 Ом);
- 2) конденсаторная батарея емкостью $C = 40-50 \text{ мкФ}$, сопротивление которой можно считать чисто емкостным;
- 3) катушка индуктивности с ненасыщенным стальным сердечником, обладающая как индуктивным x_{Lk} , так и активным r_k сопротивлениями.

Изменение индуктивности катушки осуществляется путем регулирования величины воздушного зазора между сердечником и ярмом магнитопровода катушки, при этом с увеличением воздушного зазора её индуктивность уменьшается.

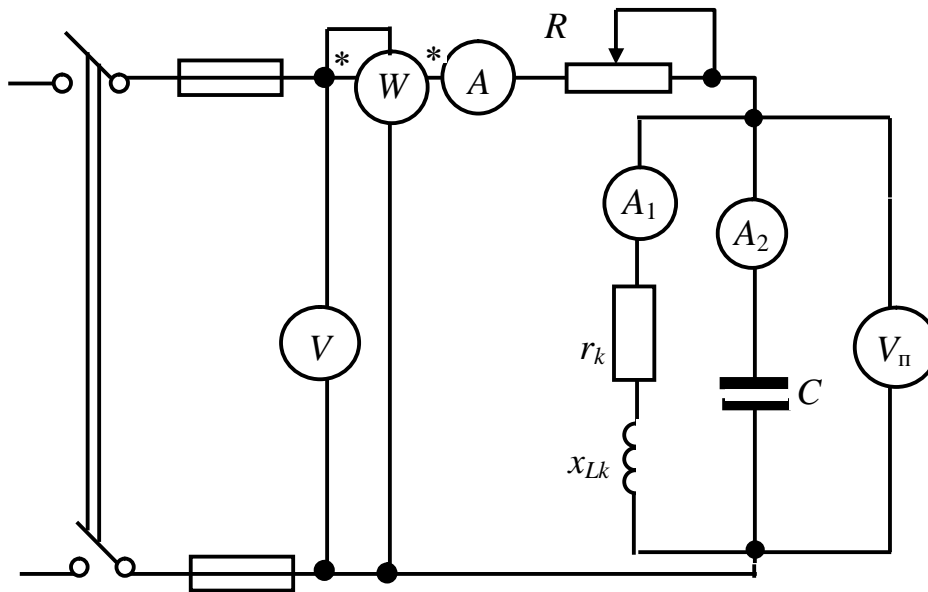


Рис.5.2. Схема для исследования смешанного соединения

2.2. Включить схему при минимальном воздушном зазоре и вращая маховик катушки найти положение сердечника, при котором в параллельных ветвях имеет место резонанс токов. Далее вдвигая от этого положения сердечник, установить ток в неразветвленной части цепи 1.2...1.6 А. Показания всех приборов занести в табл. 5.1.

2.3. Выдвигая сердечник от положения, при котором имел место резонанс, установить ток в неразветвленной части цепи 1.5...2 А и снова показания всех приборов занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений и вычислений

Режим: до или после резонанса	Измерено						Вычислено							
	U, В	I, А	P, Вт	I ₁ , А	I ₂ , А	U _n , В	x _C , Ом		I _{1a} , А	I _{1p} , А	z _k , Ом	r _k , Ом	x _{Lk} , Ом	U _R , В
							По С	Эксп						
До														
После														

2.4. Произвести вычисление величин, указанных в табл. 5.1, а именно: сопротивление ёмкости x_C (как по величине ёмкости, так и по показаниям приборов); активную и реактивную составляющие тока I_1 ; полное, активное и реактивное сопротивление катушки.

Подсказка: из векторной диаграммы можно вывести формулу для определения I_{1p} , используя теорему косинусов:
$$I_{1p} = \frac{I_1^2 + I_2^2 - I^2}{2 \cdot I_2}.$$

2.5. По данным табл. 5.1 строго в масштабе строим полные векторные диаграммы цепи для обоих опытов.

3. Вопросы и задачи для самопроверки

3.1. Запишите формулы определения полной, активной и реактивной проводимостей ветви, содержащей активное сопротивление, индуктивность и ёмкость.

3.2. Как рассчитать активное, реактивное и полное сопротивление ветви, эквивалентной нескольким параллельно включенным ветвям?

3.3. Могут активное и реактивное сопротивления эквивалентной ветви (см. п.3.2) быть отрицательными? Если да, то объяснить, что это означает.

3.4. Какова последовательность расчета смешанного соединения в цепях синусоидального тока?

3.5. В каком порядке рекомендуется строить полную векторную диаграмму цепи при смешанном соединении?

3.6. Для схемы рис.5.3 определить показание амперметра, если $u=100\sqrt{2}\sin(\omega t+45^\circ)$ В, $r=x_L=20$ Ом; $x_C=10$ Ом.

3.7. Для схемы п. 3.6 качественно построить полную векторную диаграмму.

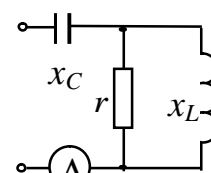


Рис.5.3

Примечание. Расчеты по пп 3.6 и 3.7 выполнить при подготовке к лабораторным занятиям и привести в отчете о лабораторной работе.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы: - экспериментально получить параметры реальных катушек, имеющих индуктивную связь, определить их одноимённые зажимы, взаимную индуктивность и величину коэффициента связи; проверить расчётные соотношения, справедливые при последовательном, параллельном и трансформаторном включении элементов.

1. Пояснения к работе

Два элемента электрической цепи называют индуктивно связанными, если у них весь магнитный поток или его часть являются общими. При этом изменение тока в одном элементе наводит в другом элементе ЭДС взаимной индукции.

В этом случае, кроме обычных r , x , z параметров (см. рис.6.1), катушки характеризуют взаимной индуктивностью $M_{12}=M_{21}=M$ (сопротивлением $X_M=\omega M$), которая может быть рассчитана по данным первого или второго эксперимента лабораторной работы:

$$M = \frac{E_{2,m}}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{2x}}{\omega \cdot I_1};$$

$$M = \frac{X_{\text{созл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}.$$

Взаимную индуктивную связь катушек можно характеризовать и коэффициентом связи, который определяется соотношениями

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} = \frac{x_M}{\sqrt{x_1 \cdot x_2}} < 1.$$

Здесь:

L_1 и L_2 – индуктивности самоиндукции катушек;

M – взаимная индуктивность катушек, т.е. индуктивность, обусловленная общим потокосцеплением катушек;

x_1, x_2, x_M – соответствующие реактивные сопротивления.

Два зажима двух индуктивно связанных катушек называются одноимёнными (однополярными), если при одинаково направленных токах i_1, i_2 относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждом элементе складываются. Это так называемые «начала» или «концы» обмоток. Одноимённые зажимы определяются экспериментально, причем для каждой пары катушек отдельно. В нашей лабораторной работе это можно сделать по результатам второго или третьего экспериментов, когда будут известны реактивные сопротивления $x_{согл}$ при согласном и $x_{встр}$ при встречном включении катушек.

При последовательном соединении индуктивно связанных катушек (рис.6.2) входное сопротивление цепи записывается легко, поэтому расчёт такой цепи выполняется по закону Ома, с учётом вида соединения:

$$Z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2 \pm 2x_M)^2}; \quad I = U / Z; \quad U_{кат} = \sqrt{r_k^2 + (x_k \pm x_M)^2} \cdot I.$$

В этих формулах верхний знак соответствует согласному включению, а нижний – встречному.

Так как $Z_{согл} > Z_{встр}$, то при одинаковом напряжении источника ток цепи $I_{согл}$ меньше тока $I_{встр}$, что и используется в экспериментах для определения одноимённых зажимов катушек.

При параллельном соединении (рис.6.3) сопротивление каждой из ветвей, как и общее сопротивление имеют характерные отличия, позволяющие определять одноимённые зажимы катушек. Формулы для сопротивлений каждой из катушек и цепи в целом при наличии взаимной индуктивности получаются с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа:

$$\underline{Z}_{1c} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_2 \pm \underline{Z}_M}; \quad \underline{Z}_{2c} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 \pm \underline{Z}_M}; \quad \underline{Z}_{ex} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \pm 2\underline{Z}_M}.$$

Здесь $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ – сопротивления катушек без индуктивной связи, а $\underline{Z}_{1c}, \underline{Z}_{2c}$ – сопротивления ветвей, т.е. тех же катушек, но уже с учётом влияния другой катушки, причем верхние знаки относятся к случаю, когда к общему узлу катушки подключены одноимёнными зажимами (иногда это называют

согласным включением), а нижние знаки – для случая подключения разноименных зажимов к общему узлу (встречное включение).

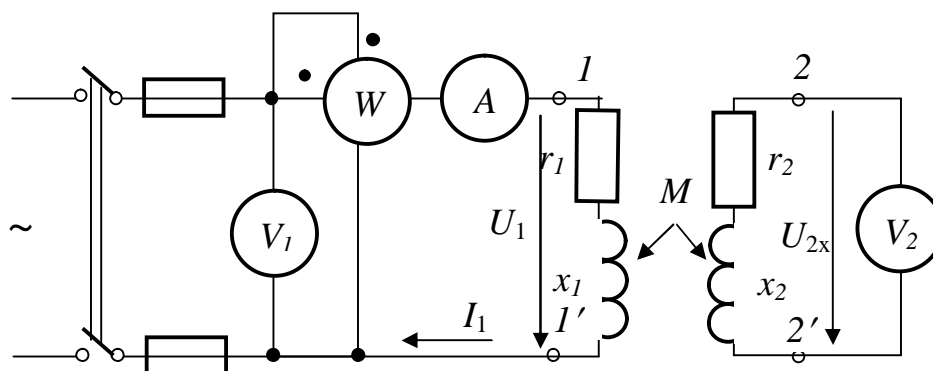


Рис. 6.1. Схема для определения параметров первой катушки и взаимной индуктивности

В трансформаторной схеме включения индуктивно связанных элементов (рис.6.4) первичная и вторичная цепь не имеют непосредственного электрического контакта. Поэтому трансформатор описывается двумя уравнениями, составленными по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 I_1 - \underline{Z}_M I_2 = \underline{U}_1; \\ (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_H) I_2 - \underline{Z}_M I_1 = 0. \end{cases}$$

Здесь \underline{Z}_H - сопротивление нагрузки трансформатора.

Токи I_1 и I_2 трансформатора можно определить как непосредственным решением этой системы уравнений, так и с применением развязки связи.

Расчёт любых цепей с индуктивно связанными элементами удобнее выполнять в комплексной форме.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Определение параметров индуктивно связанных катушек.

Собрав схему рис.6.1, необходимо выдвиганием сердечника установить в первой катушке ток примерно 1,5 А.

Вторая катушка должна быть разомкнутой.

Положение сердечника следует строго сохранять во всех последующих экспериментах.

Измерить все величины, указанные в табл. 6.1.

По результатам измерений рассчитать параметры первой катушки, записать её сопротивление в комплексной форме:

$$r_1 = \frac{P}{I_1^2}, \quad Z_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_1 = \sqrt{Z_1^2 - r_1^2}, \quad x_M = \frac{U_{2x}}{I_1}, \quad \underline{Z}_1 = r_1 + jx_1 = \dots\dots$$

Затем в схеме рис.6.1 поменять местами первую и вторую катушки, снова измерить все величины, указанные в табл. 6.1, и рассчитать параметры второй катушки, записать её сопротивление в комплексной форме:

$$r_2 = \frac{P}{I_2^2}, \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2}, \quad x_2 = \sqrt{Z_2^2 - r_2^2}, \quad x_M = \frac{U_{1x}}{I_2}, \quad \underline{Z}_2 = r_2 + jx_2 = \dots\dots$$

Рассчитать коэффициент связи индуктивно связанных катушек.

Таблица 6.1

Экспериментальное определение параметров индуктивно связанных катушек

Измерено и рассчитано	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_x,$ B	$Z,$ Om	$r,$ Om	$x,$ Om	$x_M,$ Om	$M,$ $mГн$
1-я катушка									
2-я катушка									

По указанию преподавателя далее в работе выполняется либо пункт 2.2 исследований при последовательном соединении, либо пункт 2.3 при параллельном соединении катушек.

2.2. Исследование и расчёт последовательного соединения индуктивно связанных элементов.

Собрать схему рис.6.2 и выполнить измерения величин, указанных в табл. 6.2 и занести их в эту таблицу.

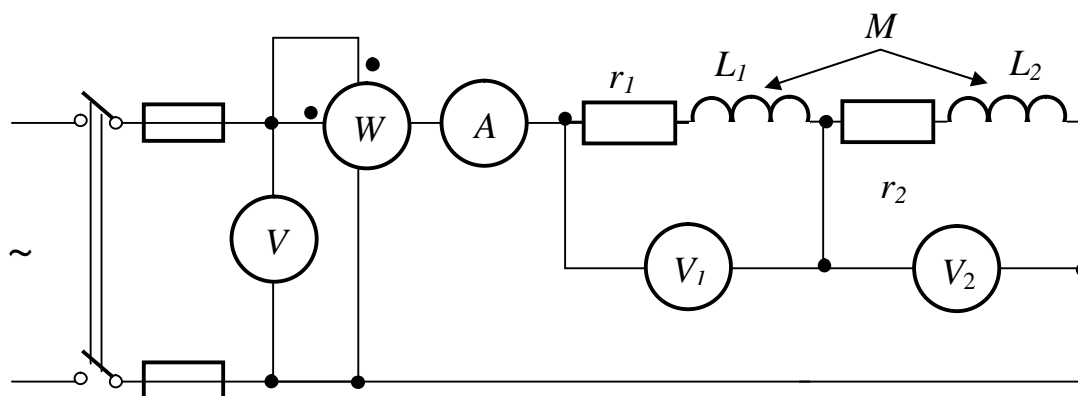


Рис.6.2. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

Зная параметры катушек, рассчитать ток I , напряжения U_1, U_2 на катушках, а также мощность P цепи при согласном и встречном включении катушек. Результаты расчётов также занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты исследования цепи при согласном и встречном соединении катушек

Последовательное соединение		Измерено				Вычислено		
		$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_1,$ B	$U_2,$ B	$Z_{BX},$ Om	$x_{BX},$ Om
Согласное включение	Эксперим.							
	Расчёт							
Встречное включение	Эксперим.							
	Расчёт							

По результатам измерений во втором эксперименте вычислить полные Z_{BX} и индуктивные x_{BX} сопротивления цепи при согласном и при встречном

включении элементов. Сопротивления $r_{\text{согл}} = r_{\text{встр}} = r_1 + r_2$ принять из первого эксперимента. Вычислить значение взаимной индуктивности M катушек и сравнить его со значением, полученным в первом эксперименте исследований.

$$Z_{\text{согл}} = \frac{U}{I_{\text{согл}}}; \quad x_{\text{согл}} = \sqrt{Z_{\text{согл}}^2 - r_{\text{согл}}^2}; \quad Z_{\text{встр}} = \frac{U}{I_{\text{встр}}}; \quad x_{\text{встр}} = \sqrt{Z_{\text{встр}}^2 - r_{\text{встр}}^2}; \quad M = \dots$$

Сопоставить значения токов $I_{\text{согл}}$, $I_{\text{встр}}$ в табл. 6.2, и сформулировать порядок определения одноимённых зажимов индуктивно связанных катушек.

2.3. Исследование и расчёт параллельного соединении индуктивно связанных элементов.

Собрать схему рис.6.3 и выполнить измерения величин, указанных в табл. 6.3, занести их в эту таблицу.

Зная параметры катушек, рассчитать входной ток I , токи I_1 , I_2 катушек, а также мощность P цепи в двух случаях: при подключении к общему узлу одноименных зажимов (согласное включение), а также разноименных зажимов (встречное включение). Входное напряжение принять равным экспериментальному значению.

Результаты расчётов также занести в табл. 6.3.

По результатам измерений в этом эксперименте вычислить сопротивления цепи $Z_{\text{вх}}$ при согласном и встречном включении элементов. Сравнить расчётные и измеренные величины, сопоставить значения токов $I_{\text{согл}}$, $I_{\text{встр}}$ и сформулировать порядок определения одноимённых зажимов различных обмоток.

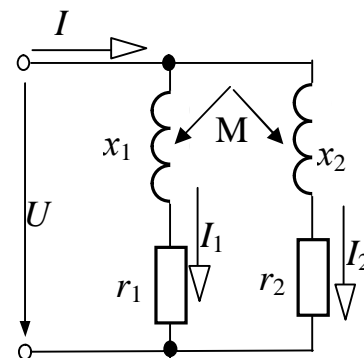


Рис. 6.3. Схема параллельного включения катушек

Таблица 6.3

Результаты исследования цепи при параллельном соединении катушек

Параллельное соединение		$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$I_1,$ A	$I_2,$ A	$Z_{\text{вх}},$ $Ом$
Согласное	Эксперимент				-	-	
	Расчёт						
Встречное	Эксперимент				-	-	
	Расчет						

2.4. Исследование трансформаторной схемы включения индуктивно связанных элементов.

Для этого собрать схему цепи по рис.6.4.

Результаты измерений внести в табл. 6.4.

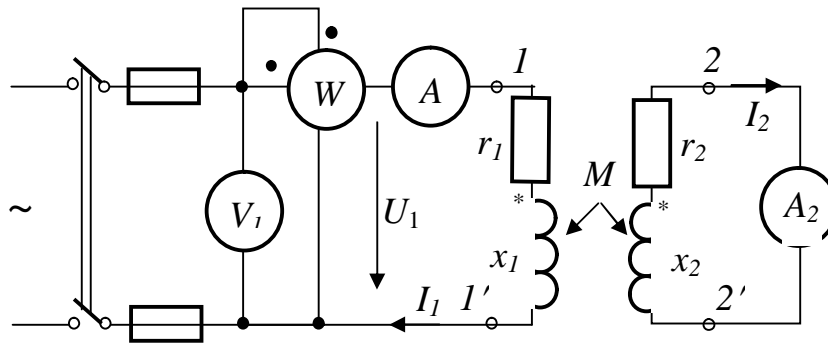


Рис. 6.4. Трансформаторная схема включения катушек при коротком замыкании на зажимах второй катушки

Произвести расчет коэффициента связи обмоток $K_{св}$ и мощности, передаваемой из первичной обмотки во вторичную P_{1-2} . Эти данные также занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Расчётные и измеренные значения величин в трансформаторной схеме

	U_1, B	I_1, A	$P, Вт$	I_2, A	$K_{св}$	$P_{1-2}, Вт$
Эксперимент					-----	-----
Расчёт						

При оформлении отчёта необходимо выполнить расчёт трансформаторной схемы, который привести в отчете, и с соблюдением масштабов построить полную векторную диаграмму цепи.

Сделать выводы по выполненной работе.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Что называется явлением взаимной индукции и как математически выражается ЭДС взаимной индуктивности?

3.2. Какие зажимы катушек называют одноимёнными, какие существуют способы их определения?

3.3. Приведите схемы и формулы для определения взаимной индуктивности M катушек.

3.4. В схеме по рис.6.1 параллельно вольтметру подключён резистор R . Можно ли в этом случае найти взаимную индуктивность M катушек через показания вольтметра и амперметра?

3.5. Какие расчётные соотношения проверялись при последовательном соединении катушек в лабораторном эксперименте?

3.6. Что такое «ёмкостный эффект», в чём его проявление, и в каких цепях он возможен?

3.7. Сформулируйте условие передачи активной мощности через узел связи и укажите, чему она равна при последовательном и при параллельном соединении катушек.

3.8. Сформулируйте и покажите на небольшом примере правила «развязки» индуктивной связи.

3.9. Рассчитайте входное сопротивление цепи по рис.6.3 (параллельное соединение, согласное влияние), применив развязку связи.

3.10. Рассчитайте входное сопротивление цепи по рис.6.4 (трансформаторная схема) в режимах холостого хода и короткого замыкания.

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы. Экспериментальное исследование различных режимов работы приемников энергии, соединенных звездой и треугольником, при питании их от симметричной трехфазной системы напряжений.

1. Пояснения к работе

Трехфазной называют цепь, в которую входят три ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга. Трехфазные источники энергии и приемники связывают, соединяя их звездой или треугольником.

При соединении трехфазной цепи звездой (рис.7.1) все три фазы приемника или генератора соединяют в одной точке, называемой нулевой точкой или нейтралью приемника, или генератора. Провод, соединяющий нейтраль генератора O и приемника O_1 называют нейтральным или нулевым. Различают фазные напряжения генератора: $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$; фазные напряжения приемника $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$; линейные напряжения генератора: $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$; линейные напряжения приемника: $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$.

При симметричном режиме трехфазной цепи линейные и фазные напряжения связаны между собой соотношением

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}, \quad (7.1)$$

а линейные токи равны фазным, т.е.

$$I_{л} = I_{ф}. \quad (7.2)$$

Ток в нулевом проводе равен геометрической сумме фазных токов

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (7.3)$$

При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, поэтому для этого случая нейтральный провод не применяется. Нулевой провод применяется при несимметричной нагрузке фаз приемника, соединенных звездой. Основное его назначение – выравнивание фазных напряжений приемника.

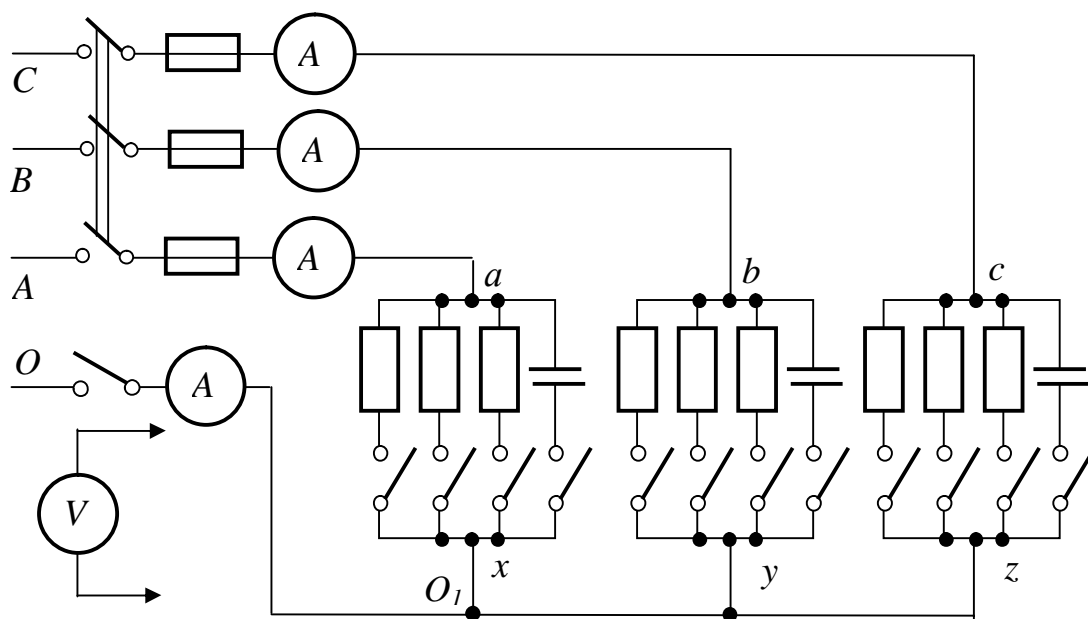


Рис.7.1. Соединение приемника в звезду

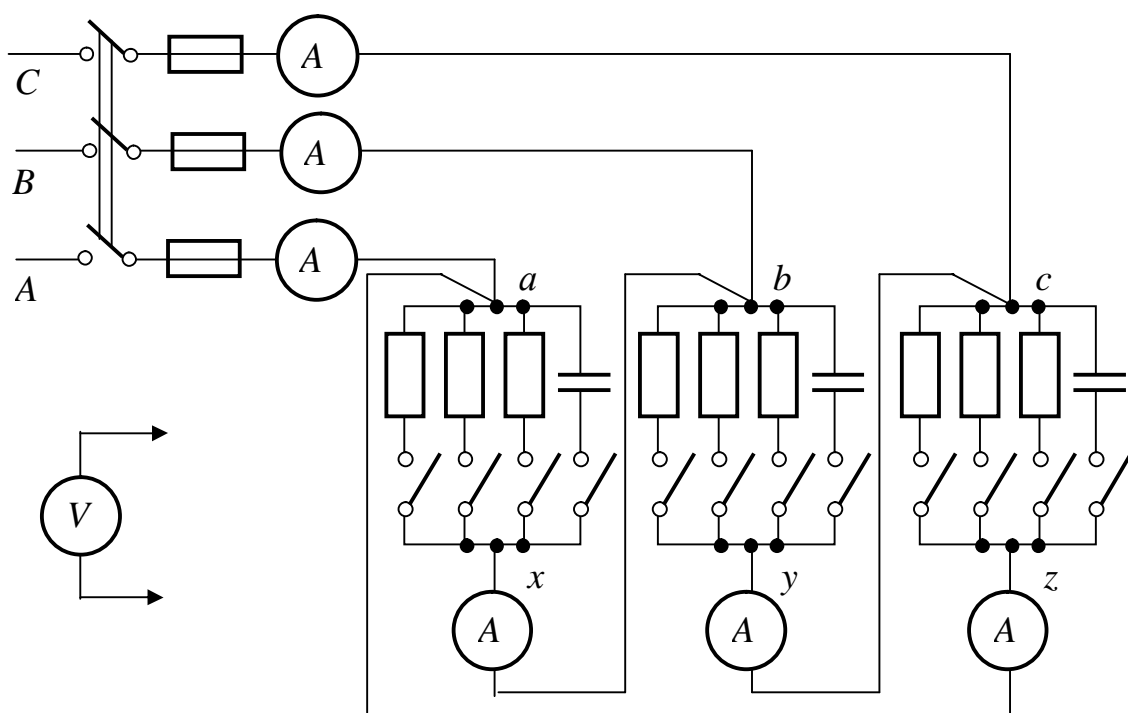


Рис.7.2. Соединение приемника в треугольник

Как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке линейное напряжение равно разности двух соответствующих фазных напряжений, например, для генератора:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (7.4)$$

В случае несимметричной нагрузки между нейтральными точками приемника и генератора появляется узловое напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали

$$\underline{U}_N = \underline{U}_{o,o} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (7.5)$$

а фазные напряжения приемника искажаются (становятся несимметричными):

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N,$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N,$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

При соединении трехфазной цепи треугольником (рис.7.2) и симметричной нагрузке линейные напряжения приемника равны фазным, т.е.

$$U_{л} = U_{\phi}, \quad (7.6)$$

а токи отличаются в $\sqrt{3}$ раз, причем

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi}. \quad (7.7)$$

Линейные токи для указанного включения приемников как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке рассчитывают на основании первого закона Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ax} - \underline{I}_{cz}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{by} - \underline{I}_{ax}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{cz} - \underline{I}_{by}. \quad (7.8)$$

Анализ трехфазных цепей удобно производить с помощью векторных диаграмм. На рис. 7.3 приведена векторная диаграмма симметричной звезды, а

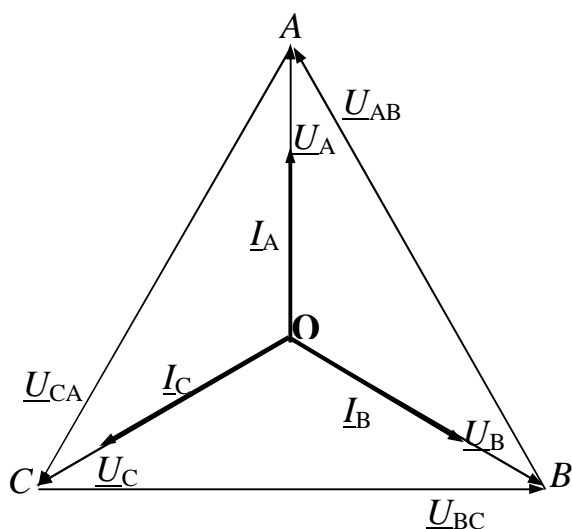


Рис.7.3. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной звездой

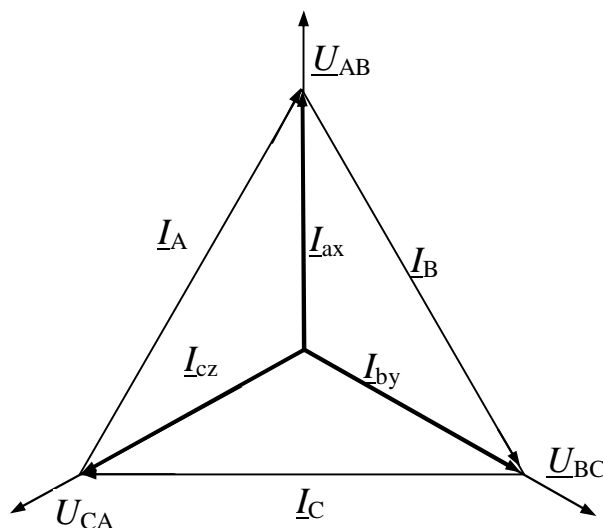


Рис.7.4. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником

на рис.7.4 - векторная диаграмма симметричного треугольника (предполагается, что нагрузка является чисто активной).

Параллельное соединение трех резисторов и ёмкости в каждой фазе позволяет создавать как симметричную, так и несимметричную нагрузки.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Соединение приемников энергии в звезду

2.1.1. Выполнить соединение фаз приемника звездой по схеме рис.7.1.

2.1.2. Измерить линейные и фазные напряжения и токи при симметричной и несимметричной нагрузках, указанных в табл. 7.1, для случаев: а) при отключенном нулевом проводе и б) при включенном нулевом проводе.

Результаты измерений записать в табл. 7.1.

2.1.3. На основании измерений для случая симметричной нагрузки вычислить отношение среднего значения линейного напряжения к среднему значению фазного напряжения $U_{л}/U_{\phi}$ и определить сопротивление фазы

приемника

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}.$$

2.1.4. Пригласить преподавателя и провести опыт короткого замыкания указанной им фазы **при отключенном нулевом проводе**. Произвести при этом измерение всех напряжений и токов, и записать их в табл. 7.1.

2.1.5. На основании измерений, сведенных в табл. 7.1., построить в масштабе, который следует указать, векторные диаграммы для опытов 1, 3, 5, 7.

2.1.6. Зная напряжение сети и сопротивления фаз приемника для случая 5 (табл. 7.1), аналитически определить величину смещения нейтрали и сравнить ее с данными эксперимента (взять из векторной диаграммы).

2.1.7. Сделать анализ векторных диаграмм и вывод относительно назначения нулевого провода.

Примечание. При построении векторных диаграмм, и в частности при определении нейтральной точки на топографической диаграмме напряжений, рекомендуется воспользоваться циркулем. Нейтральная точка располагается в середине криволинейного треугольника, возникшего при пересечении дуг окружностей, центрами которых являются точки А, В и С, а радиусы их равны, соответственно, напряжениям: $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$.

2.2. Соединение приемников энергии в треугольник

2.2.1. Выполнить соединение фаз приемника по схеме треугольника (рис.7.2).

2.2.2. Измерить линейные и фазные напряжения и токи для всех случаев, указанных в табл. 7.2.

2.2.3. Для симметричной нагрузки вычислить отношение среднего значения линейных токов к среднему значению фазных токов $I_{л}/I_{\phi}$.

2.2.4. На основании измерений (по данным табл. 7.2) построить в масштабе, который необходимо указать, векторные диаграммы для опытов 1, 2, 3.

2.2.5. Зная напряжение сети и сопротивление фазы приемника, расчетным путем проверить величину линейного тока I_B (п.3 табл. 7.2).

Сравнить расчетное значение тока I_B с экспериментальным.

2.2.6. Сделать анализ векторных диаграмм.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Напишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приемников энергии в звезду и треугольник.

3.2. Почему на подстанциях в нулевом проводе не устанавливают предохранитель?

3.3. Почему при симметричной нагрузке в нулевом проводе отсутствует ток?

3.4. Что такое смещение нейтрали? Как можно определить или измерить напряжение смещения нейтрали?

3.5. Почему короткое замыкание в одной из фаз приемника энергии разрешается устраивать только при выключенном нулевом проводе?

3.6. Расскажите о порядке построения векторных диаграмм трехфазных цепей при несимметричной нагрузке и соединениях в звезду и в треугольник.

3.7. Аналитически покажите, во сколько раз будет отличаться линейный ток одного и того же симметричного приемника с сопротивлением Z_ϕ при включении его сначала треугольником, а затем звездой на одно и то же напряжение сети $U_L (I_{LV} \div I_{LY})$.

Ответ на последний вопрос привести в отчете о лабораторной работе.

Лабораторная работа 8

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы. Изучение основных методов измерений активной и реактивной мощностей в цепях трехфазного тока.

1. Пояснения к работе

Активная мощность в цепях трехфазного тока может быть измерена методами одного, двух и трех однофазных ваттметров, а также с помощью трехфазного ваттметра.

Метод однофазного ваттметра применяется при симметричной нагрузке. В этом случае ваттметр включается для измерения мощности одной фазы приемника энергии, а суммарная мощность цепи получается путем утроения мощности одной фазы

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi, \quad (8.1)$$

где: $U_{\text{л}}$ и $I_{\text{л}}$ - линейное напряжение и линейный ток;

U_ϕ и I_ϕ - фазное напряжение и фазный ток;

φ - угол сдвига фаз между фазными напряжением и током.

Наиболее универсальным и распространенным методом измерения активной мощности в **трехфазных трехпроводных** цепях является метод двух ваттметров. Этот метод применяется при любой схеме приемников энергии (звезда и треугольник) как при симметричной, так и при несимметричной нагрузках.

На рис. 8.1 приведена схема включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной цепи, а на рис. 8.2 - векторная диаграмма, соответствующая симметричной нагрузке приемника с положительным углом φ .

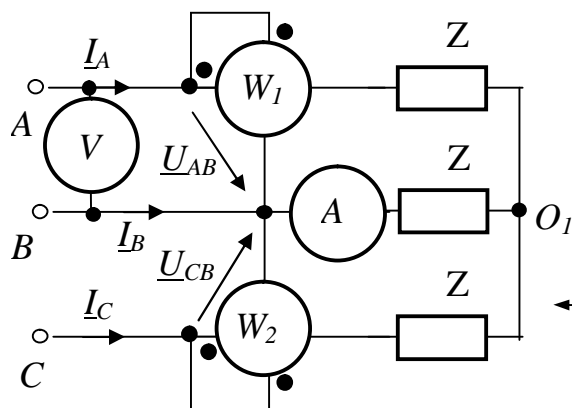


Рис. 8.1. Измерение активной мощности методом двух ваттметров

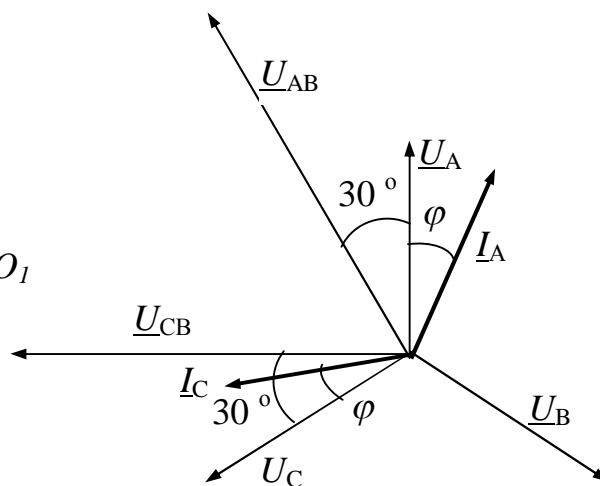


Рис. 8.2. Векторная диаграмма, соответствующая схеме измерения активной мощности

Из векторной диаграммы видно, что при симметричной нагрузке показание первого ваттметра

$$P_1 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi), \quad (8.2)$$

а второго

$$P_2 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi). \quad (8.3)$$

Очевидно, показания ваттметров одинаковы только при $\varphi = 0$ (чисто активная нагрузка); при $\varphi = 60^\circ$, $P_1 = 0$, и вся мощность цепи измеряется только вторым ваттметром; при $\varphi > 60^\circ$ $P_1 < 0$, и стрелка первого ваттметра будет отклоняться в левую от нуля сторону. Для измерения мощности P_1 в последнем

случае надо изменить направление тока в катушке напряжения ваттметра (поменяв полярность выводов катушки), и мощность P_1 считать отрицательной.

Аналогичная картина наблюдается в цепи с активно - емкостной нагрузкой.

Как при симметричной, так и при несимметричной нагрузках мощность трехфазной цепи определяется алгебраической суммой показаний ваттметров

$$P = P_1 + P_2. \quad (8.4)$$

Реактивная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке также может быть измерена одним, двумя или тремя однофазными ваттметрами.

На рис.8.3 приведена схема для измерения реактивной мощности

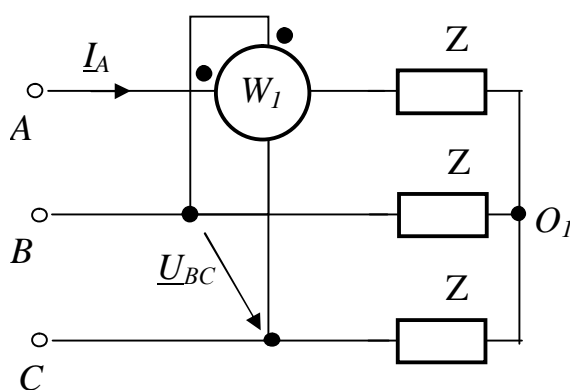


Рис. 8.3. Измерение реактивной мощности одним ваттметром

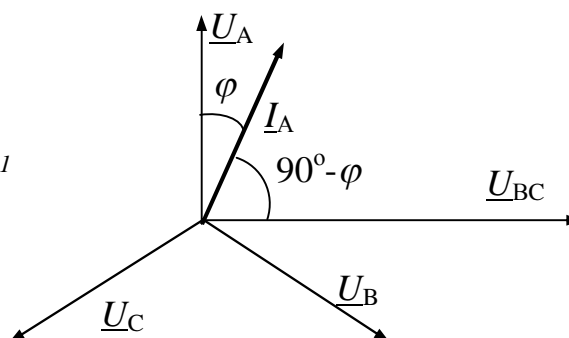


Рис. 8.4. Векторная диаграмма, соответствующая схеме измерения реактивной мощности

индуктивной нагрузки однофазным ваттметром, а на рис.8.4 - векторная диаграмма, соответствующая этой схеме. Нетрудно показать, что реактивная мощность трехфазной цепи в этом случае

$$Q = \sqrt{3}N, \quad (8.5)$$

где N - показание ваттметра, Вт или ВА.

При измерении реактивной мощности емкостной нагрузки в схеме рис.8.3 следует изменить направление тока в параллельной катушке ваттметра.

Так как даже при незначительной асимметрии схема измерения реактивной мощности с помощью одного ваттметра дает заметную погрешность, на практике чаще применяют схему с двумя ваттметрами (рис.8.5). Реактивная мощность в этом случае

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2}(N_1 + N_2), \quad (8.6)$$

где N_1 и N_2 - показания ваттметров.

Реактивную мощность симметричной трехфазной цепи можно определить также по показаниям ваттметров в схеме рис.8.1. При этом

$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2), \quad (8.7)$$

где P_1 и P_2 - мощности, измеренные первым и вторым ваттметрами соответственно.

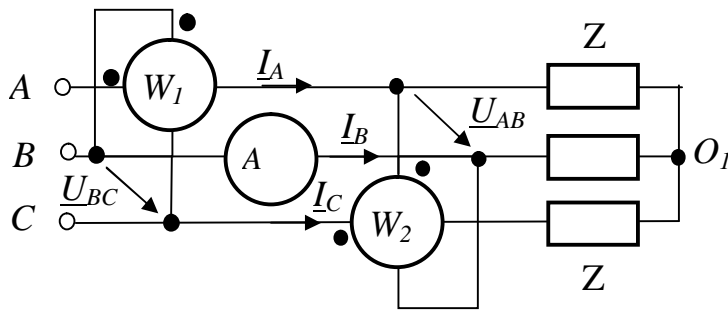


Рис. 8.5. Измерение реактивной мощности с помощью двух ваттметров

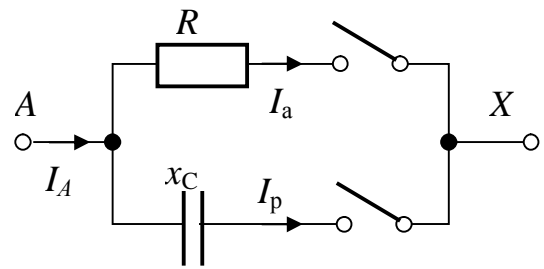


Рис. 8.6. Схема включения резисторов и конденсатора для одной фазы

В данной работе в качестве активной нагрузки используются резисторы, а в качестве реактивной - конденсаторы или дроссели (реактивные катушки со стальными сердечниками).

Схема соединения резисторов и конденсатора для одной фазы показана на рис.8.6.

2. Порядок выполнения работы

2.1. С помощью индукционного фазоуказателя проверить порядок следования фаз на щитке рубильника.

2.2. Собрать схему для измерения активной мощности двумя однофазными ваттметрами (рис.8.1), предусмотрев в ней приборы для измерения тока и линейного напряжения.

2.3. Выполнить измерения и вычисления в симметричных трехфазных цепях величин для случаев, предусмотренных табл. 8.1.

В опыте 4 мощность возникшей однофазной цепи вычисляется по формуле $P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$. А $\cos \varphi$ можно вычислить как отношение I_a / I (рис.8.6).

Таблица 8.1

№ п/ п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		$U_{\text{л}},$ В	$I_{\text{л}},$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$\cos \varphi$	$P = P_1 + P_2,$ Вт	$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi, \text{Вт}$
1.	Резисторы							
2.	Резисторы и конденсаторы							
3.	Конденсаторы (или дроссели)							
4.	Обрыв линейного провода А							

2.4. По данным табл. 8.1 для случаев 1 и 3 в масштабе построить векторные диаграммы.

2.5. Собрать схему для измерения реактивной мощности симметричной трехфазной цепи с помощью двух однофазных ваттметров (рис.8.5).

2.6. Измерить и вычислить все величины, указанные в табл. 8.2.

В опыте 4 мощность возникшей однофазной цепи вычисляется по формуле $Q = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$. А $\sin \varphi$ можно определить как отношение I_p / I (рис.8.6).

Таблица 8.2

№ п/ п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		$U_{\text{л}},$ <i>B</i>	$I_{\text{л}},$ <i>A</i>	$N_1,$ <i>Bm</i>	$N_2,$ <i>Bm</i>	$\sin \varphi$	$Q = \sqrt{3}/2 (N_1 + N_2),$ <i>вар</i>	$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi,$ <i>вар</i>
1.	Резисторы							
2.	Резисторы и конденсаторы							
3.	Конденсаторы (или дроссели)							

2.7. По данным табл. 8.2 для случая 2 построить векторную диаграмму схемы рис.8.5.

2.8. Сделать выводы о работе.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Назовите известные Вам методы измерения активной мощности трехфазных цепей. В каких случаях применяется каждый из них?

3.2. Перечислите способы измерения реактивной мощности трехфазных цепей. В чем заключается сущность этих методов?

3.3. Как влияет порядок чередования фаз на щитке рубильника на измерение активной и реактивной мощностей трехфазной цепи?

3.4. В каком случае показания ваттметра в схеме измерения активной мощности методом двух приборов будут одинаковыми?

3.5. В каком случае стрелка одного из ваттметров, включенных по схеме двух приборов для измерения активной мощности трехфазной цепи, отклоняется влево?

3.6. Чем отличаются схемы включения однофазных ваттметров при измерении реактивной мощности индуктивной и емкостной нагрузки?

3.7. Постройте векторную диаграмму измерительной схемы рис.8.1, если нагрузка симметрична и носит активно-емкостный характер.

3.8. Напишите формулы для определения показаний ваттметров схемы рис.8.1 при активно-емкостной нагрузке.

3.9. В каком случае неприменима схема рис. 8.1?

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: исследование влияния индуктивности и ёмкости на форму кривой тока; проверка методики расчёта цепей несинусоидального тока.

1. Пояснения к работе

Периодическое несинусоидальное напряжение в общем случае можно представить в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_1) + U_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \psi_2) + \dots + U_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_k) + \dots, \quad (9.1)$$

где: U_0 - постоянная составляющая (нулевая гармоника) напряжения;

U_{km} - амплитуда k -ой гармоники напряжения;

ψ_k - начальная фаза k -ой гармоники напряжения.

Если напряжение вида (9.1) прикладывается к цепи, состоящей из последовательного соединения активного сопротивления r , индуктивности L и ёмкости C , то в цепи возникает ток

$$i(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \psi_2 - \varphi_2) + \dots + I_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_k - \varphi_k) + \dots, \quad (9.2)$$

где I_{km} - амплитуда k -ой гармоники тока;

φ_k - угол сдвига по фазе между k -ыми гармониками напряжения и тока.

При этом

$$I_{km} = \frac{U_{km}}{\sqrt{r^2 + \left(k \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C}\right)^2}}, \quad (9.3)$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{k \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C}}{r}. \quad (9.4)$$

Особо следует подчеркнуть зависимость индуктивного $x_L^{(k)}$ и ёмкостного $x_C^{(k)}$ сопротивлений от угловой частоты тока:

$$x_L^{(k)} = k \cdot \omega \cdot L, \quad (9.5)$$

$$x_C^{(k)} = \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C}. \quad (9.6)$$

Из уравнений (9.5) и (9.6) видно, что индуктивное сопротивление $x_L^{(k)}$ прямо пропорционально угловой частоте ω , а ёмкостное сопротивление $x_C^{(k)}$ – обратно пропорционально угловой частоте ω .

Активная мощность P , потребляемая цепью, равна арифметической сумме мощностей $P^{(k)}$ отдельных гармоник, то есть

$$P = \sum_{k=0}^n P^{(k)} = U^{(0)} \cdot I^{(0)} + U^{(1)} \cdot I^{(1)} \cdot \cos \varphi^{(1)} + U^{(2)} \cdot I^{(2)} \cdot \cos \varphi^{(2)} + \dots + U^{(k)} \cdot I^{(k)} \cdot \cos \varphi^{(k)} + \dots + U^{(n)} \cdot I^{(n)} \cdot \cos \varphi^{(n)}, \quad (9.7)$$

где: k - номер гармоники;

n - число гармоник напряжения и тока;

$U^{(k)}$ и $I^{(k)}$ - действующие значения k -ой гармоники напряжения и тока.

Действующие значения напряжения U и тока I определяются из выражений:

$$U = \sqrt{U^{(0)2} + U^{(1)2} + U^{(2)2} + \dots + U^{(k)2} + \dots + U^{(n)2}}$$

$$I = \sqrt{I^{(0)2} + I^{(1)2} + I^{(2)2} + \dots + I^{(k)2} + \dots + I^{(n)2}} \quad (9.8)$$

Периодические несинусоидальные напряжения и токи могут быть разложены в ряд Фурье не только аналитически (если известно их аналитическое выражение), но и графоаналитическим методом.

Этот метод основан на замене определённого интеграла суммой конечного числа слагаемых.

При графическом разложении в ряд Фурье несинусоидальной функции времени $f(\omega \cdot t)$ её период T разбивают на n равных интервалов $\Delta \omega \cdot t = \frac{2\pi}{n}$

(рис. 9.1) и интегралы, определяющие коэффициенты ряда Фурье, заменяют соответствующими алгебраическими суммами. Постоянная составляющая A_0

ряда Фурье, амплитуда k -той гармоники синусной составляющей A_k' и

амплитуда k -той гармоники косинусной составляющей A_k'' этого ряда

находятся из выражений:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t), \quad (9.10)$$

$$A'_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t) \cdot \sin_p(k \cdot \omega \cdot t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \quad (9.11)$$

$$= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t) \cdot \sin_p(k \cdot \omega \cdot t),$$

$$A''_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t) \cdot \cos_p(k \cdot \omega \cdot t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \quad (9.12)$$

$$= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega \cdot t) \cdot \cos_p(k \cdot \omega \cdot t),$$

где: $f_p(\omega \cdot t)$ - значение несинусоидальной функции в конце p -го интервала

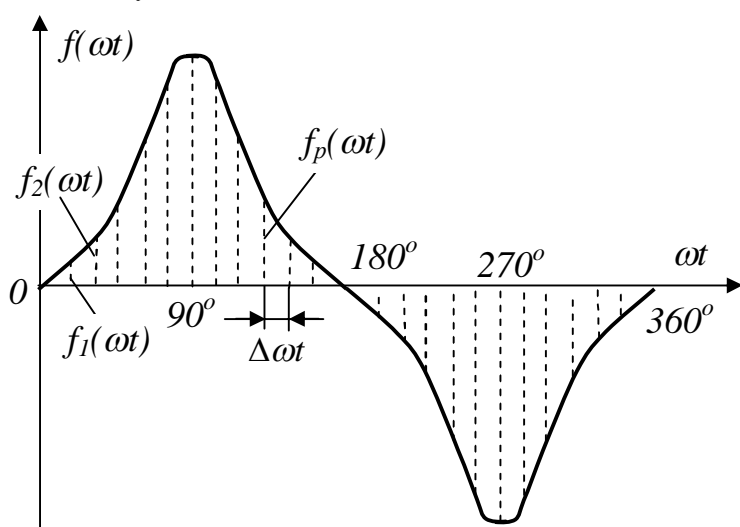


Рис.9.1.Графоаналитическое разложение несинусоидальной функции времени на гармонические составляющие

(текущий индекс p пробегает значения от 1 до n);

$\sin_p(k \cdot \omega \cdot t)$ - значение синуса от аргумента в конце p -го интервала, причём аргумент $\omega \cdot t$ умножен на порядок гармоники k .

Чем больше число интервалов разбиения, тем точнее результаты разложения в ряд Фурье. На практике обычно достаточно разделить период $2 \cdot \pi$ на $n = 24$ или $n = 18$ интервалов.

Если несинусоидальная периодическая кривая (напряжения или тока)

симметрична относительно оси абсцисс, то на n равных интервалов разбивают половину периода и по тем же формулам находят гармонические составляющие этих напряжений или токов.

При замене синусно-косинусного ряда одинарным синусным рядом Фурье используют следующие формулы:

$$A_k = \sqrt{(A'_k)^2 + (A''_k)^2}, \quad (9.13)$$

$$\psi_k = \arctg \frac{A''_k}{A'_k}, \quad (9.14)$$

где A_k и ψ_k - соответственно, амплитуда и начальная фаза k -той гармоники одинарного ряда Фурье.

Величина и знак углов ψ_k зависит от знаков A_k'' и A_k' . Так, например, если A_k'' и A_k' положительны, то угол ψ_k находится в первой четверти координатной плоскости (то есть в пределах от 0 до $+90^0$), если A_k'' положительно, а A_k' отрицательно, то угол находится во второй четверти (то есть в пределах от $+90^0$ до $+180^0$), если A_k'' и A_k' отрицательны, то угол находится в третьей четверти (в пределах от $+180^0$ до $+270^0$ или, что равносильно, от -90^0 до -180^0), если, наконец, A_k'' отрицательно, а A_k' положительно, то угол находится в четвёртой четверти (то есть его величина заключена или от $+270^0$ до $+360^0$, или от 0^0 до -90^0).

При построении разных гармоник на общем графике необходимо учитывать то, что масштаб по оси ординат для всех гармоник одинаков, а масштаб по оси абсцисс – различный. Масштаб по оси абсцисс для k -той гармоники должен быть взят в k раз большим, чем для первой гармоники, так как в периоде первой гармоники вмещается k периодов k -той гармоники.

В настоящей работе для получения несинусоидального напряжения используется реактивная катушка со стальным сердечником (дроссель). Дроссель включается последовательно с резистором r_1 (рис.9.2).

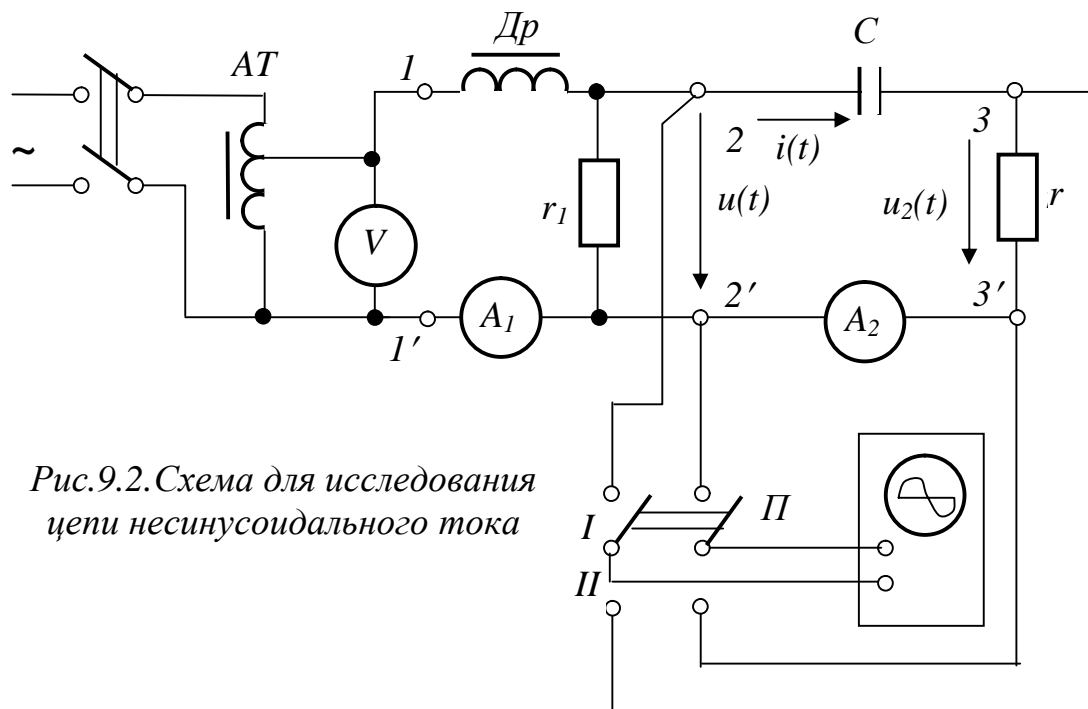


Рис.9.2. Схема для исследования цепи несинусоидального тока

При насыщении дросселя ток в последовательной цепи дроссель - резистор становится несинусоидальным и, следовательно, напряжение на резисторе также становится несинусоидальным. Это напряжение (напряжение между точками 2-2' на схеме рис.9.2) и используется в качестве источника несинусоидального напряжения для питания различных потребителей.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Исследовать электрическую цепь, состоящую из последовательного соединения активного сопротивления и ёмкости, при включении её на несинусоидальное напряжение. Для этого:

2.1.1. Собрать схему соединений рис.9.2. В качестве дросселя Dr использовать катушку со стальным сердечником. В качестве активного сопротивления r_1 - реостат с сопротивлением 20 – 50 Ом.

2.1.2. Записать в табл. 9.1 величину ёмкости C (указана на щитке лабораторного стола), а также величину сопротивления r исследуемой цепи, которую определяем методом вольтметра-амперметра, подключив вольтметр параллельно r и поделив его показание на показание амперметра A_2 .

Таблица 9.1

Параметры исследуемой цепи и ток в ней

$C, мкФ$	$r, Ом$	I, mA	
		Расчёт	Эксперимент

2.1.3. С помощью автотрансформатора AT установить ток в цепи дросселя, равный 1.5.....2 А. (Контролировать значение этого тока нужно с помощью амперметра A_1).

2.1.4. Записать в табл. 9.1 показание амперметра A_2 в исследуемой цепи.

2.1.5. Снять на кальку с экрана осциллографа кривые входного несинусоидального напряжения $u(t)$ исследуемой цепи (переключатель П в положении I) и напряжение $u_2(t)$ на активном сопротивлении r (переключатель П в положении II). Последнее напряжение по форме совпадает с током, что является основанием утверждать, что эта осциллограмма (с учётом переводного масштаба из напряжения в ток) является осциллограммой тока цепи. Для определения масштаба тока необходимо максимальное значение напряжения u_{2max} (в вольтах) разделить на величину сопротивления r и число клеток изображения на экране осциллографа напряжения u_{2max} .

2.1.6. Несинусоидальную кривую входного напряжения $u(t)$ разложить на гармонические составляющие ряда Фурье, используя графоаналитический метод разложения или стандартную программу разложения в ряд на ЭВМ. При разложении ограничиться только первой и третьей гармониками.

2.1.7. По входному напряжению $u(t)$, полученному в виде ряда Фурье и известным параметрам цепи (C, r) рассчитать первую и третью гармоники тока.

2.1.8. Определить действующее значение несинусоидального тока и сравнить его значение с экспериментально найденным значением (см. табл.9.1).

2.1.9. В одной и той же координатной системе построить графики тока первой гармоники, тока третьей гармоники и тока, полученного путём

суммирования этих гармоник. Сравнить кривую суммарного тока с экспериментально полученной кривой тока $i(t)$ (см. п.2.1.5).

2.1.10. Сравнить форму входного несинусоидального напряжения $u(t)$ и суммарного тока $i(t)$. Сделать выводы о влиянии ёмкости на форму кривой тока.

2.2. Заменить в схеме рис.9.2 конденсатор C на катушку индуктивности и повторить выполнение п.2.1.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Какие гармоники содержит несинусоидальная периодическая функция времени, симметричная относительно оси абсцисс?

3.2. Какие гармоники содержит разложение в ряд Фурье несинусоидальной периодической функции времени, обладающей симметрией относительно начала координат?

3.3. С какой целью в данной работе применяется дроссель Dp ?

3.4. Какие значения несинусоидальных периодических токов, напряжений и мощностей учитывают (показывают) приборы различных систем:

- а) магнитоэлектрической;
- б) электромагнитной;
- в) электродинамической;
- г) индукционной?

3.5. Как изменяется сопротивление пассивных элементов R , L , C для токов различных гармоник?

3.6. Как определяется действующее значение периодического несинусоидального напряжения или тока? Запишите это в буквенном виде.

3.7. Какое влияние оказывает индуктивность на форму несинусоидального тока при сопоставлении её с формой приложенного несинусоидального напряжения?

3.8. Ответьте на вопрос 3.7, заменив слово "индуктивность" на слово "ёмкость".

Лабораторная работа 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА, СОДЕРЖАЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЁМКОСТЬ

Цель работы. Изучение заряда и разряда конденсатора в цепи, состоящей из последовательно включённых ёмкости C и резистора r . Исследование переходных процессов в схеме при смешанном соединении сопротивлений и ёмкости.

1. Пояснения к работе

При включении цепи рис.10.1, состоящей из последовательно включённых ёмкости C и активного сопротивления r , на постоянное напряжение U источника переходный процесс в ней протекает согласно уравнению, составленному на основании второго закона Кирхгофа

$$ir + u_c = U,$$

или

$$C \frac{du_c}{dt} r + u_c = U, \quad (10.1)$$

где i - мгновенный ток,

u_c - мгновенное значение напряжения на конденсаторе.

Решением линейного дифференциального уравнения (10.1) является выражение вида

$$u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (10.2)$$

где $\tau = r \cdot C$ - постоянная времени цепи.

Ток в цепи может быть найден путем дифференцирования уравнения (10.2) и умножения полученного результата на емкость конденсатора

$$i = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{d}{dt} \left[U - U e^{-\frac{t}{rc}} \right] = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.3)$$

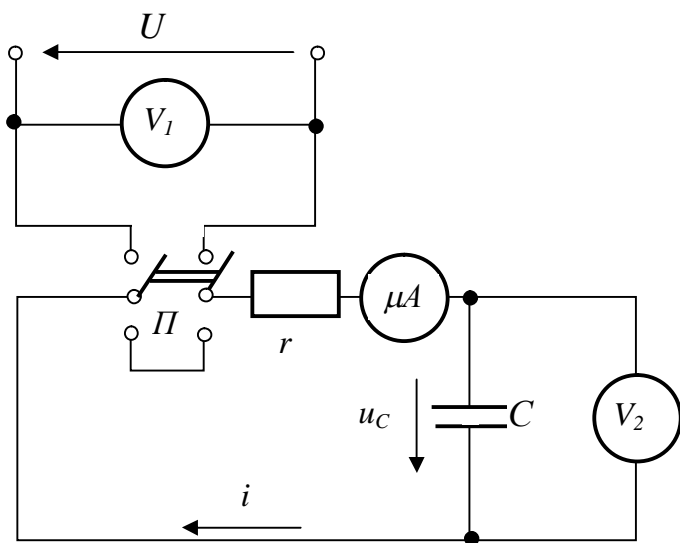


Рис. 10.1. Схема для исследования переходных процессов в цепи последовательным соединением r, C

На рис. 10.2,а показаны зависимости $u_c(t)$ и $i(t)$ при включении цепи r, C на постоянное напряжение U . Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго, однако практически можно считать, что переходный процесс заканчивается по истечении времени $t_m = (3...5) \tau$.

При разрядке емкости C на сопротивление r переходный процесс в цепи (переключатель Π схемы 10.1 в нижнем положении)

протекает согласно уравнению

$$C \frac{du_c}{dt} r + u_c = 0. \quad (10.4)$$

При этом напряжение на емкости и ток

$$u_c = U e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10.5)$$

$$i = - \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10.6)$$

где $\tau = r C$ - постоянная времени цепи, зависящая только от ее параметров в послекоммутационном режиме.

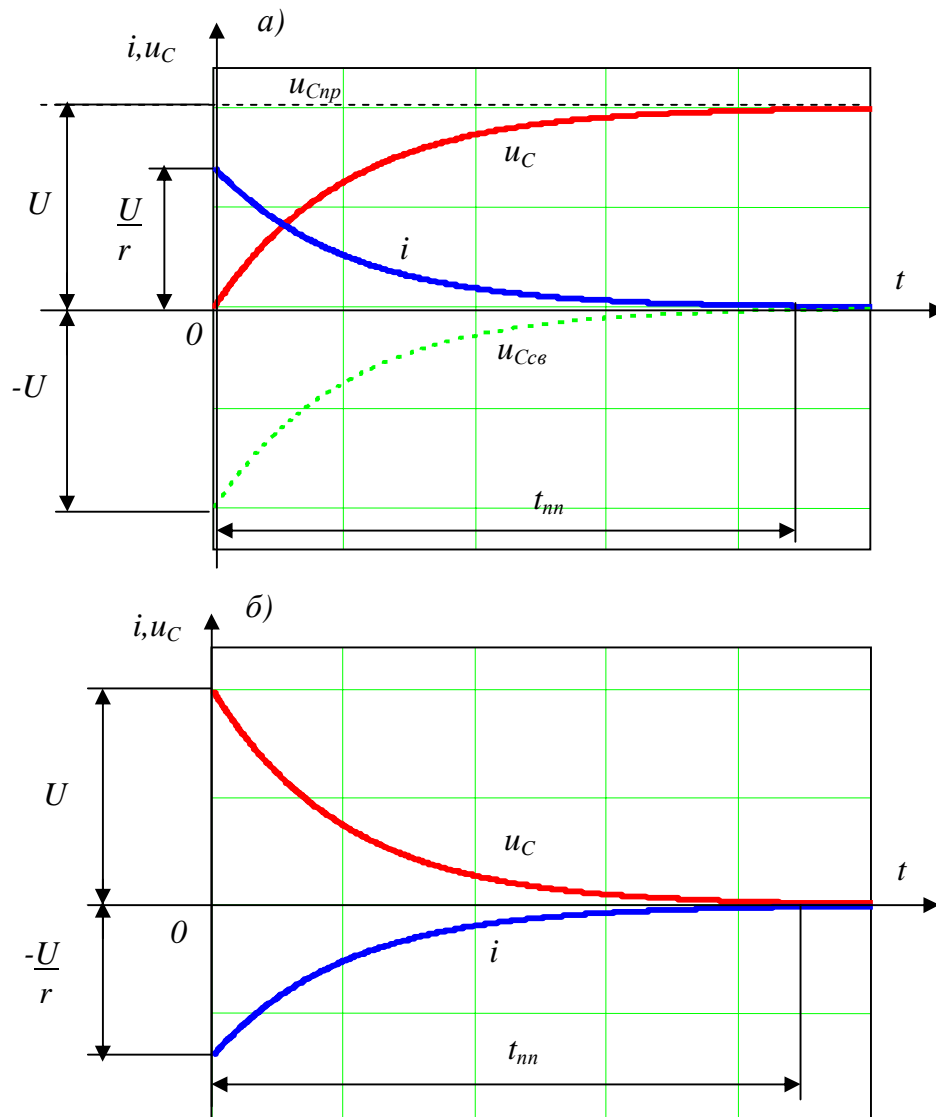


Рис. 10.2. Графики изменения $u_C(t)$ и $i(t)$:
 а – при заряде конденсатора;
 б – при разряде конденсатора

На рис. 10.2,б изображены зависимости $u_C(t)$ и $i(t)$ при разряде конденсатора через активное сопротивление. Отрицательный знак тока указывает на то, что действительное направление тока разряда будет противоположным его положительному направлению (рис. 10.1).

Электрическая цепь смешанного соединения сопротивлений и емкости рис. 10.3 при её включении на постоянное напряжение описывается системой уравнений

$$i_1 = i_2 + i_C, \quad (10.7)$$

$$i_1 r_1 + i_2 r_2 = U, \quad (10.8)$$

$$i_2 r_2 - \frac{1}{C} \int i_c dt = 0 . \quad (10.9)$$

Искомые токи имеют принужденные и свободные составляющие:

$$i_{1np} = \frac{U}{r_1 + r_2}; \quad i_{2np} = i_{1np}; \quad i_{Cnp} = 0;$$

$$i_{1cс} = A e^{p_1 t}; \quad i_{2cс} = B e^{p_1 t}; \quad i_{Cс} = D e^{p_1 t};$$

$$i_1 = i_{1np} + i_{1cс}; \quad i_2 = i_{2np} + i_{2cс}; \quad i_C = i_{Cnp} + i_{Cс}.$$

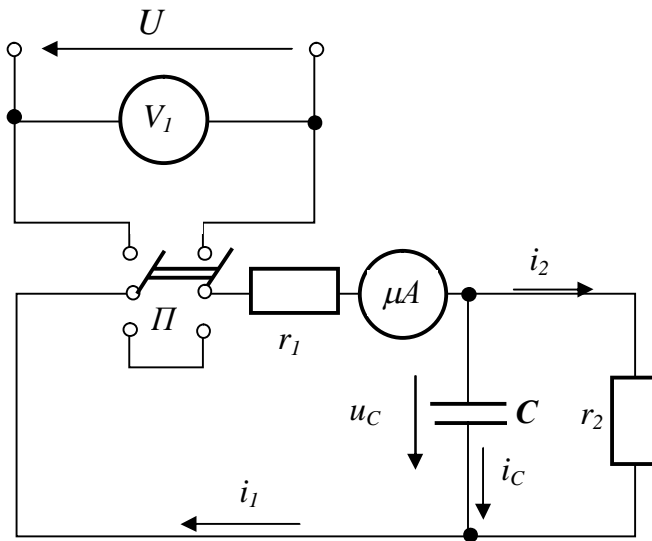


Рис. 10.3. Схема для исследования переходных процессов в цепи со смешанным соединением сопротивлений и емкости

Корень характеристического уравнения p_1 может быть найден из выражения входного операторного сопротивления цепи

$$Z(p) = r_1 + \frac{r_2 \cdot \frac{1}{pC}}{r_2 + \frac{1}{pC}} = 0,$$

откуда

$$p_1 = - \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2 C} = - \frac{1}{\tau}, \quad (10.10)$$

где

$$\tau = \frac{r_1 r_2 C}{r_1 + r_2} \quad - \text{ постоянная}$$

времени цепи.

Решением системы уравнений (10.7) – (10.9) являются выражения вида

$$i_1 = \frac{U}{r_1 + r_2} + A e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10.11)$$

$$i_2 = \frac{U}{r_1 + r_2} + B e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10.12)$$

$$i_C = D e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10.13)$$

где A , B и D - постоянные интегрирования, которые находим из начальных условий.

При $t=0$

$$i_1(0_+) = \frac{U}{r_1 + r_2} + A,$$

$$i_2(0_+) = \frac{U}{r_1 + r_2} + B,$$

$$i_c(0_+) = D.$$

Значения токов в момент коммутации

$$i_1(0_+) = \frac{U - u_c(0)}{r_1} = \frac{U}{r_1},$$

$$i_2(0_+) = \frac{u_c(0)}{r_2} = 0,$$

$$i_c(0_+) = i_1(0_+) - i_2(0_+) = \frac{U}{r_1}.$$

Таким образом: $A = \frac{U}{r_1} - \frac{U}{r_1 + r_2}$, $B = -\frac{U}{r_1 + r_2}$, $D = \frac{U}{r_1}$.

Окончательные выражения для токов с учетом постоянных интегрирования имеют вид

$$i_1(t) = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(1 + \frac{r_2}{r_1} e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (10.14)$$

$$i_2(t) = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (10.15)$$

$$i_c(t) = \frac{U}{r_1} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.16)$$

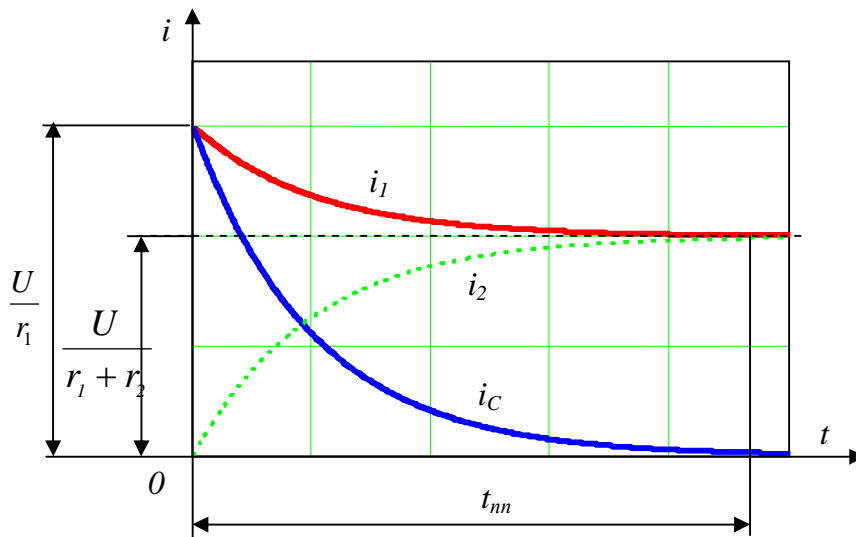


Рис. 10.4. Графики изменения токов в ветвях схемы рис. 10.3 при включении цепи на постоянное напряжение

На рис. 10.4 показаны зависимости токов ветвей цепи рис. 10.3 в функции времени. По окончании переходного процесса ток в конденсаторе отсутствует,

а токи в сопротивлениях становятся одинаковыми. Практически это наступает по истечении времени $t_m = (3...5) \tau$.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему соединений рис. 10.1.

Для измерения напряжения на конденсаторе необходимо использовать вольтметр электростатической системы, имеющий бесконечно большое внутреннее сопротивление, или вольтметр цифровой системы, а для измерения тока - микроамперметр магнитоэлектрической системы.

2.2. С помощью переключателя Π включить цепь рис. 10.1 на постоянное напряжение и через каждые 10-15с снимать отсчеты напряжения на конденсаторе и тока в цепи. Результаты измерений свести в табл. 10.1.

2.3. На основании измерений (табл. 10.1) построить в общей системе координат графики $u_C(t)$ и $i(t)$.

2.4. Рассчитать практическое время протекания переходного процесса t_m и сравнить его с экспериментально полученным значением этого времени.

Таблица 10.1

Результаты исследования цепи r, C при заряде конденсатора

t, c	U, B	u_C, B	$i, мкА$
0			
.			
.			
.			
.			

2.5. Исследовать разряд конденсатора (переключатель Π в схеме рис. 10.1 находится в нижнем положении), снимая показания приборов через 10-15с до нулевых значений u_C и i . Результаты измерений свести в табл. 10.2.

2.6. По данным табл. 10.2 в общей системе координат построить графики изменения напряжения $u_C(t)$ и тока $i(t)$ при разряде конденсатора.

Таблица 10.2

Результаты измерений напряжения u_C и тока i при разряде конденсатора

t, c	u_C, B	$i, мкА$
0		
.		
.		
.		

2.7. Собрать схему соединений рис.10.3 и записать ее параметры в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Параметры схемы рис. 10.3

$U, В$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$C, мкФ$

2.8. Включить цепь рис. 10.3 на постоянное напряжение и через каждые 10-15с измерять ток той ветви, в которой находится микроамперметр. При последующих включениях цепи, изменив место включения микроамперметра, измерять токи остальных ветвей (перед каждым включением цепи разрядить конденсатор с помощью проводника).

Результаты измерений свести в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Результаты измерения токов в схеме рис. 10.3

$t, с$	$i_1, мкА$	$i_2, мкА$	$i_C, мкА$
0			
.			
.			
.			

9. В общей системе координат построить графики токов $i_1(t)$, $i_2(t)$ и $i_C(t)$. Убедиться в соблюдении первого закона Кирхгофа.

10. Для электрической цепи рис. 10.3 рассчитать принужденные составляющие токов, значения токов в момент коммутации и постоянную времени цепи.

Результаты расчета свести в табл. 10.5.

Таблица 10.5.

Результаты расчета принужденных составляющих токов и значений токов в момент коммутации

$i_{1np}, мкА$	$i_{2np}, мкА$	$i_{Cnp}, мкА$	$i_1(0_+), мкА$	$i_2(0_+), мкА$	$i_C(0_+), мкА$	$\tau, с$

Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Как определяется постоянная времени цепи r , C ? Каков ее физический смысл?

3.2. Приборы каких систем используются в схемах соединений рис.10.1 и рис.10.3 настоящей работы? Почему?

3.3. Сформулируйте законы коммутации, применяемые при анализе переходных процессов.

3.4. Какова длительность переходных процессов?

3.5. По каким признакам судят об окончании переходного процесса?

3.6. Как находят принужденные составляющие токов в ветвях цепи смешанного соединения сопротивлений и конденсатора, а также значения токов в момент коммутации?

3.7. Укажите метод нахождения постоянной времени цепи r, C по экспериментальной кривой $u_C(t)$.

3.8. Составьте систему уравнений, описывающих электрическое состояние цепи рис. 10.3 после коммутации.

Лабораторная работа 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЦЕПИ r, L, C НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Цель работы: изучение аperiodического и периодического характера заряда конденсатора и его разряда в цепи r, L, C .

1. Пояснения к работе

При включении цепи, состоящей из последовательно соединённых активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C , на постоянное напряжение U (рис. 11.1) возможен аperiodический или периодический характер протекания переходного процесса.

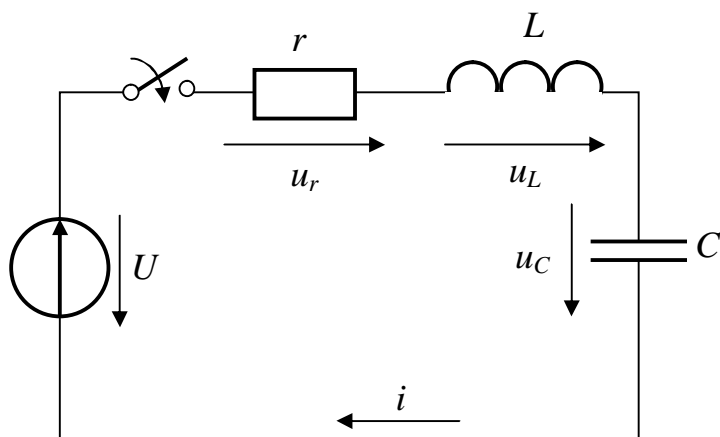


Рис. 11.1. Схема включения цепи r, L, C на постоянное напряжение

Уравнение состояния цепи имеет вид:

$$u_r + u_L + u_C = U,$$

или

$$i r + L \frac{di}{dt} + u_C = U.$$

С учетом того, что

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \text{ получим}$$

$$L C \frac{d^2 u_C}{dt^2} + r C \frac{du_C}{dt} + u_C = U. \quad (11.1)$$

Для (11.1) составим характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{r}{L}p + \frac{1}{LC} = 0$$

и найдем его корни:

$$p_1 = -\frac{r}{2L} + \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}},$$

$$p_2 = -\frac{r}{2L} - \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Характер переходного процесса зависит от знака подкоренного выражения, т.е. от параметров r , L , C .

Если корни характеристического уравнения будут действительными, отрицательными и различными по величине, т.е. $r > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то характер процесса будет апериодическим.

В этом случае получим

$$u_C(t) = U - \frac{U}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}), \quad (11.2)$$

$$i(t) = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (11.3)$$

При апериодическом характере переходного процесса напряжение на емкости плавно возрастает от нулевого значения до принужденного, равного напряжению источника (рис. 11.2,а). Начальное и принужденное значения тока равны нулю. При этом нарастание и спад тока происходит без колебаний, т.е. ток не меняет своего направления.

Переходный процесс длится в течение времени $t_{nn} = (3...5)\tau$, где $\tau = \frac{1}{|p_1|}$ - постоянная времени цепи.

Если корни характеристического уравнения комплексные сопряженные с отрицательной действительной частью ($p_1 = -b + j \cdot \omega_0$, $p_2 = -b - j \cdot \omega_0$), т.е. если $r < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то характер переходного процесса будет периодическим (колебательным). В этом случае напряжение на конденсаторе и ток совершают затухающие колебания около своих принужденных (установившихся) значений

$$u_C(t) = U - \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (11.4)$$

$$i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} \cdot e^{-bt} \cdot \sin \omega_0 t, \quad (11.5)$$

где

$$b = \frac{r}{2L}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}, \quad \psi = \arctg \frac{\omega_0}{b}.$$

Затухание колебаний тока и напряжения на конденсаторе (рис. 11.2, б), определяется множителем - экспонентой. Относительное затухание колебаний характеризуется декрементом колебания Δ , представляющим отношение мгновенных значений тока через один период:

$$\Delta = \frac{i(t)}{i(t+T_0)} = e^{bT_0}, \quad (11.6)$$

где $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ - период свободных колебаний цепи.

Из уравнений (11.4) и (11.5) следует, что наибольшее значение напряжения на конденсаторе будет близко к $2U$, а наибольший ток стремится к значению $\frac{U}{\omega_0 L}$. Переходный процесс длится в течение времени $t_{mn} = (3...5) \tau$,

где $\tau = \frac{1}{b}$ - постоянная времени цепи.

На рис. 11.3 изображена схема экспериментальной установки, с помощью которой исследуют переходные процессы в цепи r, L, C при ее включении на постоянное напряжение источника. Для получения неподвижного изображения кривых $u_C(t)$ и $i(t)$ на экране осциллографа необходимо повторять включение цепи периодически с частотой, равной частоте развертки осциллографа, так как однократный переходный процесс в цепи исследовать трудно вследствие его быстротечности.

Для периодического включения рассматриваемой цепи ее питание осуществляется от источника прямоугольного напряжения частотой 50 Гц . Момент скачкообразного нарастания напряжения источника соответствует включению цепи r, L, C . При этом на экране осциллографа наблюдается напряжение на емкости $u_C(t)$ (в положении I переключателя П) и ток $i(t)$, а точнее напряжение на сопротивлении магазина r_m (в положении II переключателя П). За время $\frac{T}{2}$ процесс заряда конденсатора практически завершается.

Момент скачкообразного уменьшения напряжения источника до нуля соответствует короткому замыканию цепи. При этом происходит аperiodический или колебательный разряд конденсатора в цепи r, L, C .

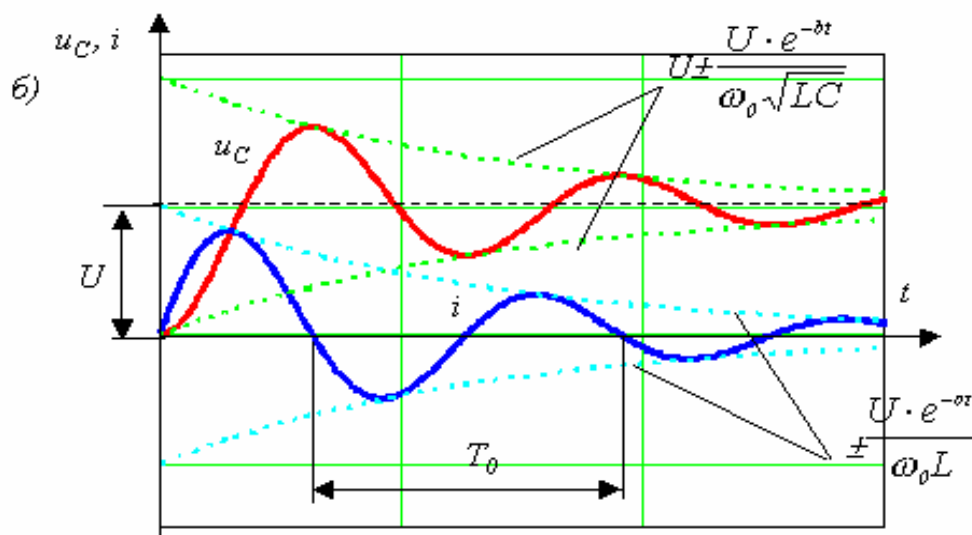
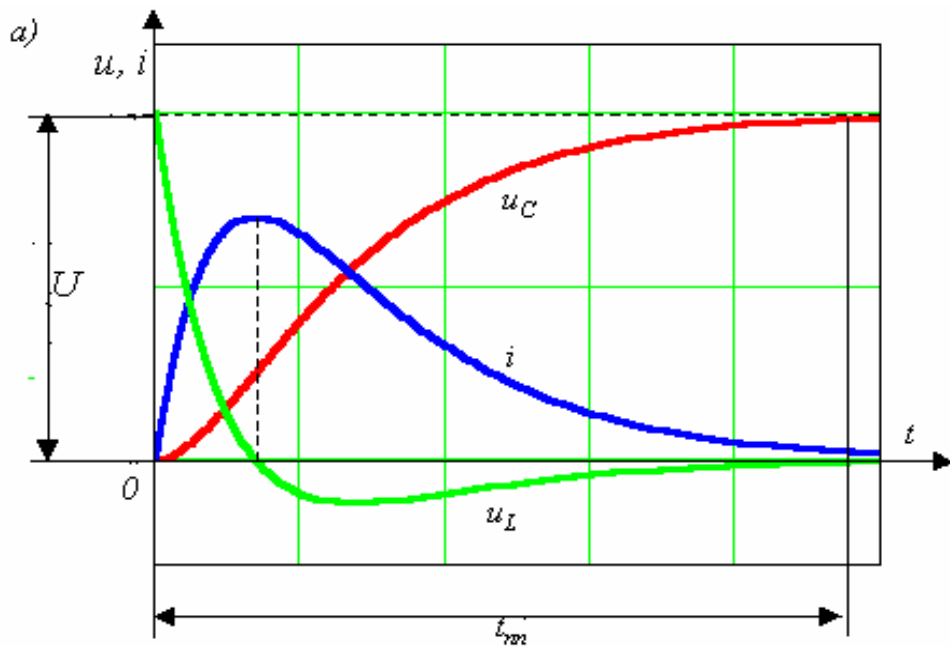


Рис. 11.2. Графики изменения $u_C(t)$ и $i(t)$

При аperiodическом характере разряда конденсатора ($r > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$) напряжение u_C и ток i с течением времени плавно без колебаний стремятся к своим нулевым установившимся значениям

$$u_C = \frac{U}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}), \quad (11.7)$$

$$i = \frac{U}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (11.8)$$

Колебательный разряд конденсатора ($r < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$) происходит в соответствии с уравнениями

$$u_C(t) = \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (11.9)$$

$$i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} \cdot e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \pi). \quad (11.10)$$

Как видно из приведенных уравнений, характер переходного процесса, его длительность, период свободных колебаний, декремент затухания определяются только параметрами электрической цепи в послекоммутационном режиме работы и не зависят от вида коммутации цепи (заряд или разряд конденсатора).

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему соединений электрической цепи рис.11.3 и записать в табл. 11.1 её параметры.

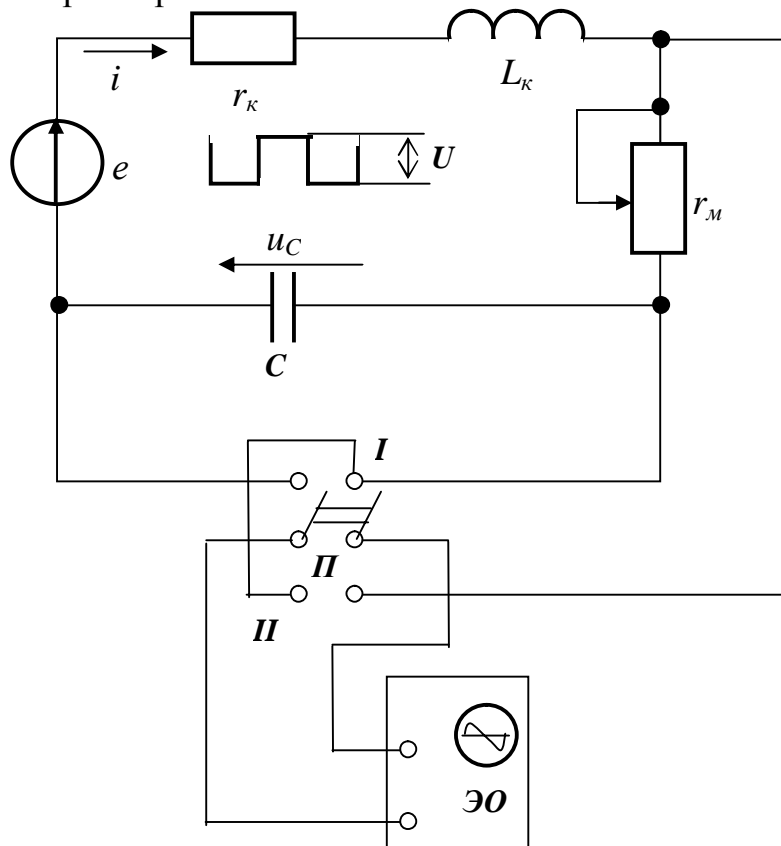


Рис. 11.3. Рабочая схема для исследования переходных процессов при включении цепи r, L, C на постоянное напряжение и исследования короткого замыкания этой цепи

Таблица 11.1

Параметры схемы для исследования переходных процессов

$r_k, \text{ Ом}$	$L_k, \text{ Гн}$	$C, \text{ мкФ}$

2.2. Определить критическое сопротивление цепи $r_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L_k}{C}}$.

2.3. Снять на кальку с экрана осциллографа напряжение источника и по снятой экспериментальной кривой определить величину напряжения U .

2.4. Установить с помощью магазина сопротивлений сопротивление цепи $r=2r_{кр}$ ($r = r_k + r_M$) и при включенном источнике снять на кальку с экрана осциллографа напряжение на ёмкости $u_C(t)$ при заряде и разряде конденсатора.

2.5. При $r = 2r_{кр}$ снять на кальку с экрана осциллографа кривую тока $i(t)$, а точнее кривую напряжения на магазине сопротивлений с последующим перерасчетом ее на $i(t)$ (при заряде и разряде конденсатора).

2.6. Установить сопротивление цепи $r = r_k + r_M = 0,2r_{кр}$ и снять на кальку с экрана осциллографа кривые $u_C(t)$ и $i(t)$ при заряде и разряде конденсатора.

2.7. По экспериментальной кривой $i(t)$ определить период T_0 свободных колебаний цепи и декремент колебаний Δ .

2.8. Экспериментально определить критическое сопротивление цепи $r_{кр}$; для этого, плавно увеличивая с помощью магазина сопротивлений сопротивление цепи r , заметить то значение сопротивления r_M , при котором колебательный процесс переходит в апериодический, и затем определить $r = r_k + r_M$.

Снять с экрана осциллографа кривую напряжения $u_C(t)$.

Сравнить результаты опытного определения $r_{кр}$ и расчетного его значения (п.2).

2.9. Зная величину напряжения U и параметры цепи, произвести расчет кривой напряжения $u_C(t)$ или тока $i(t)$ для одного из случаев заряда или разряда конденсатора:

1) $r=2 r_{кр}$; 2) $r=r_{кр}$; 3) $r=0,2r_{кр}$ (по указанию преподавателя).

Показать расчет корней p_1 и p_2 характеристического уравнения, имея в виду, что $r = r_k + r_M$.

Результаты расчета свести в таблицу.

Расчетные кривые $u_C(t)$ или $i(t)$ построить в той же системе координат, что и экспериментальные (пп. 4, 5, 6). Сравнить расчетные и экспериментальные зависимости.

2.10. Для исследуемой цепи при $r=0,2r_{кр}$ вычислить T_0 и Δ и сравнить полученные результаты с экспериментально найденными (п. 7).

Сделать выводы о работе.

3. Вопросы для самопроверки

3.1. Каков физический смысл критического сопротивления цепи?

3.2. Объясните, как получается неподвижное изображение кривых $u_C(t)$ и $i(t)$ на экране осциллографа.

3.3. Как велико может быть напряжение на емкости по сравнению с напряжением источника в цепи r, L, C при периодическом характере переходного процесса?

3.4. Чему равны начальные и конечные (принужденные) значения тока и напряжений на отдельных элементах в цепи r, L, C при включении ее на постоянное напряжение?

3.5. Чему равны начальные и конечные (принужденные) значения тока и напряжений на отдельных элементах в цепи r, L, C при её коротком замыкании?

3.6. Как определить продолжительность переходного процесса в цепи r, L, C при аperiодическом и колебательном его характере?

3.7. Чему равен период свободных колебаний T_0 и декремент затухания Δ в цепи r, L, C при колебательном характере переходного процесса?

3.8. Назовите возможные причины расхождения теоретической и экспериментальной кривых $u_C(t)$ или $i(t)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи – М.:Гардарика, 1999. – 637 с.

3. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. - Л.: Энергоиздат. 1981. – Т.1 – 536 с.; Т.2 – 416 с.

4. Атабеков Г.И., Тимофеев А.В., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. – М.: Энергия, 1978. – Ч.1. Линейные электрические цепи. – 592 с.

5. Рыбалко Н.П. Линейные цепи постоянного и однофазного синусоидального токов в установившихся режимах. Методы анализа и расчета: Киев, УМК ВО,- 1991, - 136 с.

6. Рыбалко М.П. Лінійні кола постійного та синусоїдного струмів в установившихся режимах (двополюсники та триполюсники). – К.: ІСДО, 1995.– 224 с.

7. Рыбалко Н.П. Трёхфазные цепи синусоидального тока: Киев, УМК ВО,- 1991, - 64 с.

8. Рыбалко М.П., Есауленко В.О. Перехідні процеси в лінійних електричних колах із зосередженими параметрами. Навч. посібник.-Донецьк: ДонДТУ, 1999. -172с.