

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

***ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
учебно-методическое пособие***

Донецк
2016

УДК 621.3.01 (07)

Рекомендовано Учёным Советом ДонНТУ как учебно-методическое пособие (протокол № 2 от 28.10.2016 г.)

Лабораторный практикум по теоретической электротехнике: учебно-методическое пособие / В. Ф. Денник, В. А. Эсауленко, А. В. Корощенко [и др.] – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 130 с.

Настоящее учебное издание предназначено для студентов, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, теория электромагнитного поля и др.). В учебном издании приведены правила внутреннего распорядка в лабораториях секции ТОЭ кафедры «Электромеханика и ТОЭ», правила безопасности при работе с электрооборудованием, инструкции по выполнению семнадцати лабораторных работ и рекомендуемые бланки отчётов о лабораторных работах в Приложении.

Составители:

- В.Ф. Денник, проф.
- В.А. Эсауленко, проф.
- А.В. Корощенко, доц.
- Е.А. Журавель, доц.
- В.Х. Антамонов, доц.
- В.Е. Михайлов, доц.
- В.П. Чорноус, доц.
- О.Г. Шелехова, доц.
- М.В. Апухтин, ст.преп.
- Е.В. Чорноус, ст.преп.

Рецензенты:

- А.П. Ковалёв, проф.
- В.П. Шамота, проф.
- А.Н. Рак, доц.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	5
Правила внутреннего распорядка	5
Правила техники безопасности	5
Вопросы, подлежащие самостоятельному изучению до начала лабораторных занятий	6
Сведения и рекомендации, необходимые для выполнения лабораторных работ по теоретической электротехнике	7
Порядок сборки схем.....	7
Сведения об электроизмерительных приборах.....	7
Условные обозначения на шкалах приборов	9
Класс точности прибора, погрешности измерений.....	10
Графическое изображение результатов исследования	11
Рекомендации по составлению и оформлению отчёта о выполненной лабораторной работе	14
Лабораторная работа 1. Исследование передачи энергии постоянного тока по двухпроводной линии	15
Основные теоретические положения.....	15
Методические указания по выполнению работы.....	16
Методические указания к оформлению работы.....	18
Вопросы для самопроверки.....	19
Лабораторная работа 2. Исследование сложной цепи постоянного тока	19
Основные теоретические положения.....	19
Подготовка к выполнению работы	20
Методические указания по выполнению работы.....	21
Вопросы для самопроверки.....	23
Лабораторная работа 3. Исследование нелинейных цепей постоянного тока	24
Основные теоретические положения.....	24
Методические указания по выполнению работы.....	25
Вопросы для самопроверки.....	27
Лабораторная работа 4. Исследование неразветвленных цепей синусоидального тока резонанса напряжений	27
Основные теоретические положения.....	27
Методические указания по выполнению работы.....	29
Вопросы и задачи для самопроверки.....	32
Лабораторная работа 5. Исследование цепей синусоидального тока при параллельном соединении ветвей и резонанса токов	32
Основные теоретические положения.....	33
Методические указания по выполнению работы.....	34
Вопросы и задачи для самопроверки.....	36
Лабораторная работа 6. Исследование цепей синусоидального тока с индуктивно связанными элементами	37
Основные теоретические положения.....	37
Методические указания по выполнению работы.....	39
Вопросы для самопроверки.....	41
Лабораторная работа 7. Исследование трехфазных цепей	42
Основные теоретические положения.....	42
Методические указания по выполнению работы	45

Вопросы для самопроверки.....	48
Лабораторная работа 8. Измерение активной и реактивной мощностей	
трехфазного тока	48
Основные теоретические положения.....	48
Методические указания по выполнению работы.....	51
Вопросы для самопроверки.....	52
Лабораторная работа 9. Исследование цепей несинусоидального тока	52
Основные теоретические положения.....	53
Методические указания по выполнению работы.....	56
Вопросы для самопроверки.....	57
Лабораторная работа 10. Исследование переходных процессов в цепях	
постоянного тока, содержащих сопротивления и емкость.....	58
Основные теоретические положения.....	58
Методические указания по выполнению работы.....	61
Вопросы для самопроверки.....	63
Лабораторная работа 11. Исследование переходных процессов при	
включении цепи r, L, C на постоянное напряжение	64
Основные теоретические положения.....	64
Методические указания по выполнению работы.....	68
Вопросы для самопроверки.....	69
Лабораторная работа 12. Исследование катушки со стальным сердечником	69
Основные теоретические положения.....	69
Методические указания по выполнению работы.....	72
Вопросы для самопроверки.....	73
Лабораторная работа 13. Исследование цепи при последовательном	
соединении катушки со стальным сердечником и конденсатора	74
Основные теоретические положения.....	74
Методические указания по выполнению работы.....	77
Вопросы для самопроверки.....	78
Лабораторная работа 14. Исследование утроителя частоты	78
Основные теоретические положения.....	79
Методические указания по выполнению работы.....	81
Вопросы для самопроверки.....	82
Лабораторная работа 15. Исследование выпрямителей однофазного и	
трехфазного токов	82
Основные теоретические положения.....	82
Методические указания по выполнению работы.....	83
Вопросы для самопроверки.....	85
Лабораторная работа 16. Исследование четырехполюсника	86
Основные теоретические положения.....	86
Методические указания по выполнению работы.....	88
Вопросы для самопроверки.....	90
Лабораторная работа 17. Исследование электрических фильтров	90
Основные теоретические положения.....	90
Методические указания по выполнению работы.....	92
Вопросы для самопроверки.....	93
Литература	94
Приложение. Бланки отчётов о лабораторных работах	95

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

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.

3. Лабораторные работы выполняются бригадами из 2-4-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. Студенты должны бережно обращаться со всем оборудованием лаборатории.

6. Во время занятий в лаборатории должен поддерживаться надлежащий порядок и рабочая 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 обязан представить преподавателю полученные результаты измерений и в черновом протоколе получить пометку о правильности результатов работы и разрешение на разборку схемы. В случае получения неверных данных студент обязан повторить измерения.

9. К следующему занятию каждый студент должен представить отчет о предыдущей выполненной работе по установленной форме (см. с. 14).

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 и декану.

Правила техники безопасности

Практически все напряжения, с которыми приходится иметь дело в лабораториях секции ТОЭ кафедры «Электромеханика и ТОЭ», 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 подключении схемы к источнику 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:

- включать схему без предупреждения членов бригады. При включении следует громко сказать: «Подую напряжение».

- прикасаться к незащищенным частям установки, находящейся под напряжением.

- производить пересоединения в схеме, находящейся под напряжением. Все пересоединения выполнять только при отключенном источнике питания, после чего схема должна быть вновь проверена преподавателем или лаборантом.

- брать приборы или аппараты, не предназначенные для выполнения данной лабораторной работы.

- загромождать лабораторные столы лишними предметами, в том числе лишними соединительными проводами.

- оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением.

- после отключения цепи с ёмкостью разбирать схему без предварительного разряда конденсатора.

- включать схему, если один из концов соединительных проводов остаётся свободным.

- выполнять лабораторную работу одному.

- самостоятельно ремонтировать приборы, аппараты и другое электрооборудование.

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

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

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. Схемы включения амперметра, вольтметра и ваттметра при измерении тока, напряжения и мощности.

3. Измерение сопротивлений методом амперметра-вольтметра.

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

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

Сведения и рекомендации, необходимые для выполнения лабораторных работ по теоретической электротехнике

Для успешного выполнения лабораторных работ по теоретической электротехнике 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 техники безопасности, необходимо придерживаться следующих общих принципов. В первую очередь соединяются элементы цепи, по которым замыкаются токи. Сюда относятся также амперметры и токовые обмотки ваттметров. После этого подключаются «цепи напряжения», т.е. вольтметры и обмотки напряжения ваттметров. Подключение ваттметра должно строго соответствовать схеме.

При включении приборов магнитоэлектрической системы должна соблюдаться «полярность» зажимов прибора.

Расположение переносных элементов и проводов на рабочем столе должно соответствовать схеме, быть наглядным, 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 ТОЭ используются в основном стрелочные измерительные приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической систем и комбинированные электронные приборы.

Приборы *магнитоэлектрической системы* с подвижной рамкой (рис. 1,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, что оборачивается недостатком данной системы – малой перегрузочной способностью.

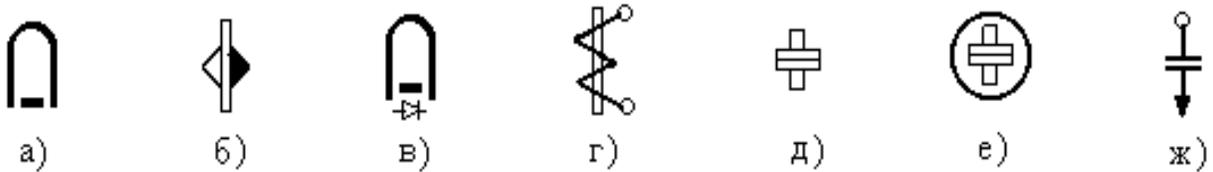


Рис.1. Условные обозначения на шкалах приборов различных систем

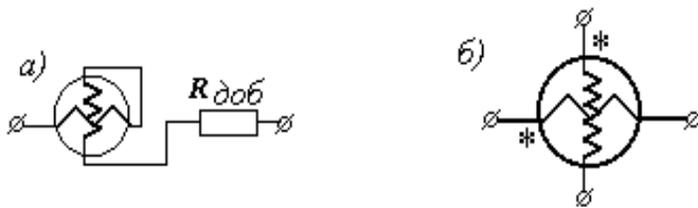


Рис.2. Схема соединения катушек электродинамического вольтметра (а) и ваттметра (б)

В приборах электромагнитной системы (г) измерительная катушка неподвижна и может быть выполнена более толстым проводом,

поэтому эти приборы могут выдерживать большие перегрузки. Они имеют сравнительно невысокий класс точности, что связано с использованием ферромагнитного сердечника. 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 могут применяться 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 взаимодействии электромагнитных полей, создаваемых токами обеих катушек. Приборы электродинамической системы обладают более высокой точностью, чем электромагнитные, 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 при этом снижает их точность.

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, соединена с добавочным сопротивлением и подключается параллельно приёмникам энергии. Изменение направления тока в любой из катушек вызывает изменение направления вращающего момента, действующего на подвижную катушку. Поэтому «одноименные зажимы» 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 (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 пФ. 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 других 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.

Основные из этих условных обозначений приведены на рис. 3. Более полный набор условных обозначений приводится в учебниках по метрологии.

Классы точности приборов: 0,05 0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,5 4,0	
<p>Положение прибора:</p>  - горизонтальное  - вертикальное  - под углом 60°	<p>Род тока:</p>  - постоянный ток  - переменный ток  - трёхфазный ток
<p>Защитные экраны:</p>  - от электрических полей  - от магнитных полей	<p>Испытательное напряжение:</p>  - корпус прибора испытан напряжением 2 кВ

Рис. 3. Основные условные обозначения на шкалах приборов

Класс точности прибора, погрешности измерений

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

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

где x_u – измеренное значение искомой величины;

x – её истинное значение;

x_n – нормирующее значение искомой величины (предел измерения прибора).

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

$$\Delta = 5 \cdot 0,5 / 100 = 0,025 \text{ А} = 25 \text{ мА}.$$

При выполнении работы прибор надо выбирать так, чтобы измеряемые величины приходились на область от 25% до 100% его шкалы. Если, например, тем же амперметром с пределом измерения 5 А будет измеряться ток 0,4 А, 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, вольтах или ваттах.

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.

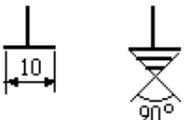
Чтобы получить ясную картину исследуемого явления и выбрать пределы измерения тока или напряжения, рекомендуется вначале выполнить опыт, не производя никаких записей.

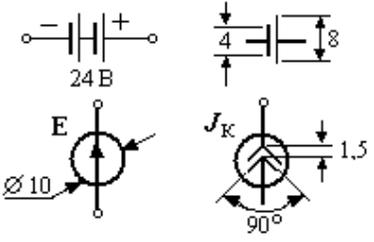
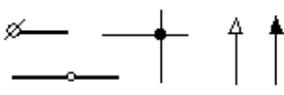
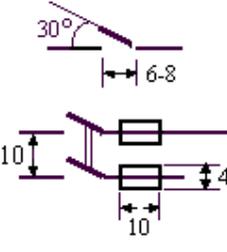
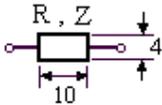
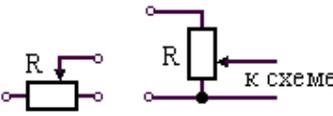
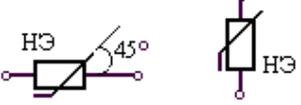
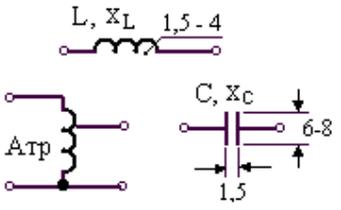
Графическое изображение результатов исследования

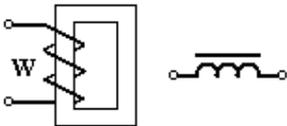
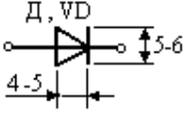
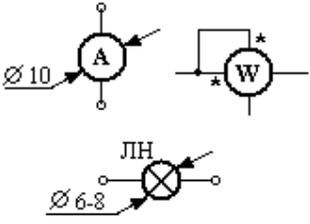
Результаты экспериментов обычно отражают в таблицах, однако часто результаты исследования удобно представить в графическом виде, потому что это будет компактнее и нагляднее таблиц, особенно для сравнения нескольких зависимостей. Исследуемые в электротехнике величины, как правило, изменяются непрерывно и плавно, без изломов или скачков. Графические построения должны сглаживать разброс в результатах измерений, что помогает 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
	Соединение с корпусом. Заземление. Изображается тремя чертами.

 <p>The first row shows three symbols: 1. An accumulator symbol with a battery-like structure and '24 В' below it. 2. A DC voltage source symbol consisting of two parallel lines of unequal length, with a height of 4 and a total width of 8. 3. A current source symbol consisting of a circle with a diagonal arrow pointing outwards, labeled with J_K and a diameter of $\varnothing 10$. A second version of the current source symbol is shown with a 90-degree angle and a height of 1.5.</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, $j_K(t)$. Линии вплотную подходят к стрелкам источника.</p>
 <p>The second row shows three symbols: 1. A removable contact symbol consisting of two horizontal lines of unequal length. 2. A non-removable contact symbol consisting of a horizontal line with a vertical line crossing it at its center. 3. Two vertical arrows: one with a horizontal line across its shaft (representing current) and one without (representing voltage).</p>	<p>Контакты разъёмного и неразъёмного соединений. Обозначения токов и напряжений в схемах: напряжение – стрелка зачернена, ток – стрелка не зачернена.</p>
 <p>The third row shows two symbols: 1. A circuit breaker symbol with a diagonal line representing the moving contact, labeled with a 30-degree angle and a width of 6-8. 2. A switch with a fuse symbol consisting of two horizontal lines with a vertical line in the middle, labeled with a height of 10 and a width 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 fourth row shows a resistor symbol consisting of a rectangle with two leads, labeled with 'R, Z' and dimensions of 10 by 4.</p>	<p>Резистор. Общее обозначение сопротивления. Толщина линии – обычная.</p>
 <p>The fifth row shows two symbols: 1. A rheostat symbol consisting of a rectangle with a diagonal line and a wiper, labeled with 'R'. 2. A potentiometer symbol consisting of a rectangle with a diagonal line and a wiper, labeled with 'R' and 'к схеме'.</p>	<p>Реостат (для регулирования тока в цепи). Неиспользуемый вывод допускается не изображать.</p> <p>Потенциометр, делитель напряжения. Обычно используется на постоянном токе для регулирования напряжения, подаваемого на схему.</p>
 <p>The sixth row shows two symbols: 1. A non-linear resistor symbol consisting of a rectangle with a diagonal line and a 45-degree angle, labeled with 'НЭ'. 2. A non-linear resistor symbol consisting of a rectangle with a diagonal line, labeled with 'НЭ'.</p>	<p>Общее обозначение нелинейного сопротивления. Допускаются буквенные пояснения: например, $HЭ$, $R(I)$, t°.</p>
 <p>The seventh row shows three symbols: 1. An inductor symbol consisting of a coil, labeled with 'L, X_L' and a width of 1.5-4. 2. An autotransformer symbol consisting of a coil with a tap, labeled with 'Атр'. 3. A capacitor symbol consisting of two parallel lines, labeled with 'C, X_C' and dimensions of 6-8 by 1.5.</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. Обозначение катушки с ферромагнитным сердечником.</p>
	<p>Диод полупроводниковый. Размеры изображения 6x5 или 5x4 мм. Не зачернен. Допускается буквенное обозначение.</p>
	<p>Измерительные приборы: A, V, W. У ваттметра указываются одноимённые выводы обмоток тока и напряжения. Лампа накаливания: это её специфическое обозначение. Возможно общее обозначение как нелинейного элемента.</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 по осям 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 10×10 см.

***Рекомендации по составлению и оформлению отчёта
о выполненной лабораторной работе***

Отчёт составляется на основе расчётов, выполненных по данным 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:

- титульную часть с указанием номера и наименования работы, группы, фамилии и инициалов студента-исполнителя;

- 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 лабораторном практикуме, полные расчёты, выполненные при домашней подготовке, схемы, рисунки и графики огромных размеров т.п.

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: экспериментальное 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.

Основные теоретические положения

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 её конце U_2 (напряжением на зажимах приёмника энергии – на нагрузке):

$$\Delta U = U_1 - U_2.$$

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

$$\Delta U = I \cdot r_{\text{л}}.$$

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

$$I = \frac{U_1}{r_2 + r_{\text{л}}} = \frac{U_2}{r_2}.$$

Потеря мощности ΔP в проводах линии есть

$$\Delta P = P_1 - P_2 = I^2 \cdot r_{\text{л}}.$$

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

$$P_1 = U_1 \cdot I = \frac{U_1^2}{r_2 + r_{\text{л}}}.$$

Полезная мощность (мощность, потребляемая приёмником энергии)

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

с изменением сопротивления нагрузки r_2 не остаётся постоянной.

При работе линии в режиме холостого хода, то есть когда $r_2 = \infty$, ток в линии равен нулю. Следовательно, мощность P_2 также будет равна нулю. 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 по сравнению с U_1 . Мощность P_2 при этом сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться.

При работе линии в режиме короткого замыкания, когда $r_2=0$, ток в линии достигает максимального значения

$$I_{кз} = \frac{U_1}{r_l},$$

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

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

откуда $r_2 = r_l$.

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 в конце линии P_2 к мощности P_1 в начале линии, то есть

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

При $P_2 = P_{2\max}$ КПД линии

$$\eta = \frac{r_2}{r_2 + r_l} = \frac{r_2}{2 \cdot r_2} = 0,5,$$

то есть в этом случае половина энергии, отдаваемой источником питания в линию, расходуется на нагрев линии. Обычно реальные 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 3 А. В качестве нагрузочных сопротивлений используются проволочные реостаты. Напряжение постоянного тока в начале линии должно быть не выше 30 В.

Методические указания по выполнению работы

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

2. Собрать схему соединений рис. 1.1. Реостат в схеме должен быть установлен на максимальное сопротивление. Подключение вольтметра для измерения потери напряжения в каждом проводе линии передачи $\Delta U'$ и $\Delta U''$ осуществляется с помощью переключателя S.

3. Изменяя сопротивление реостата, измерить $\Delta U'$ и $\Delta U''$ при различных токах нагрузки: $I = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ А.

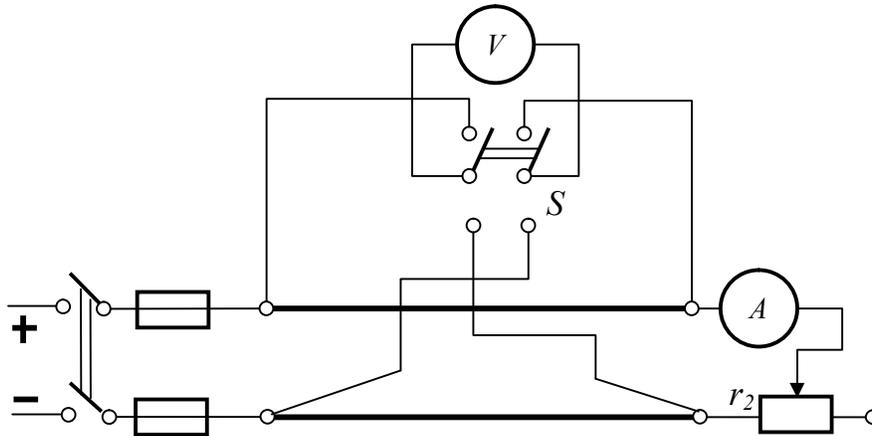


Рис. 1.1. Схема для исследования потерь напряжения и мощности в проводах линии передачи в зависимости от тока нагрузки

4. Располагая измеренными данными, вычислить $\Delta U = \Delta U' + \Delta U''$, ΔP и $r_{л}$. 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	$\Delta U', B$	$\Delta U'', B$	$\Delta U = \Delta U' + \Delta U'', B$	$\Delta P, Вт$	$r_{л}, Ом$
0,5					
1,0					
...					
...					
3,0					

5. В общей системе координат построить зависимости $\Delta U(I)$ и $\Delta P(I)$. Там же, используя среднее значение сопротивления $r_{л}$, построить теоретические зависимости $\Delta U(I)$ и $\Delta P(I)$.

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 6 мм^2 (принять величину удельного сопротивления меди равным $\rho = 0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$).

7. Выполнить схему соединений для исследования передачи энергии при постоянном значении напряжения U_1 в начале линии (рис. 1.2). Переключение вольтметра для измерения U_1 и U_2 осуществляется с помощью переключателя S .

8. Изменяя сопротивление нагрузки r_2 при поддержке с помощью реостата r_1 постоянства величины 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 .

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

Полученные данные измерений и вычислений занести в табл. 1.2.

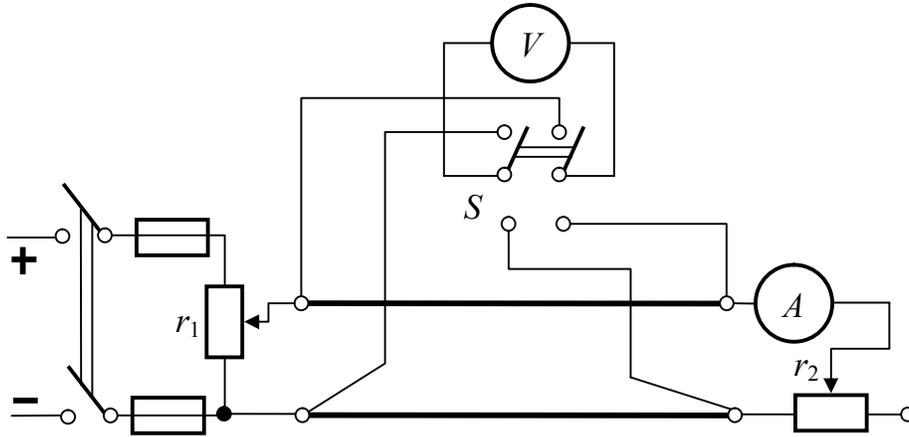


Рис. 1.2. Исследование передачи энергии при постоянном напряжении в начале линии

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	$\eta, \%$	$r_2, Ом$

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.

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 $U_1 = \text{const}$.

Методические указания к оформлению отчёта

При оформлении отчёта важно чётко разграничить две части работы:

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

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. 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 (для P_1 и P_2 использовать один и тот же масштаб) и выполнить построение графиков в общей системе координат.

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

Вопросы для самопроверки

1. Как будет изменяться напряжение на зажимах приёмника энергии при уменьшении его сопротивления, если напряжение в начале линии неизменно?
2. Как определяется ток в линии передачи в режиме короткого замыкания?
3. При каком значении отношения r_2/r_L мощность приёмника P_2 будет максимальной? Каков при этом КПД линии?
4. Каково назначение реостата r_1 , включаемого в начале линии?
5. Как можно определить КПД η линии?
6. Как определяются I , U_2 , P_1 , P_2 , и η
 - а) при холостом ходе линии?
 - б) при коротком замыкании линии?
7. Чему равен КПД η линии при максимальном токе нагрузки?
8. Как записать условие передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку, если $r_L=0$, т.е. если нагрузка включена непосредственно на зажимы источника?
9. Как по данным табл. 1.1 и 1.2 показать выполнение
 - а) второго закона Кирхгофа?
 - б) баланса мощностей?

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

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

Основные теоретические положения

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

$$I_n = I'_n + I''_n + I'''_n + \dots,$$

где $I'_n, I''_n, I'''_n, \dots$ – составляющие токов в ветви n , обусловленные действием первого, второго, третьего источника, соответственно.

Знак составляющих тока в ветви n определяется на основании сопоставления направлений этих составляющих и положительного направления тока этой ветви в исходной схеме.

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 разомкнутыми зажимами. Затем определяют входное сопротивление $r_{вх}$ эквивалентного генератора как входное сопротивление всей остальной части сложной цепи относительно разомкнутых зажимов при накоротко замкнутых источниках ЭДС и разомкнутых источниках тока. Искомый ток I_{np} определяется по теореме об эквивалентном генераторе:

$$I_{np} = \frac{U_{xx}}{r_{вх} + r_{np}}$$

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

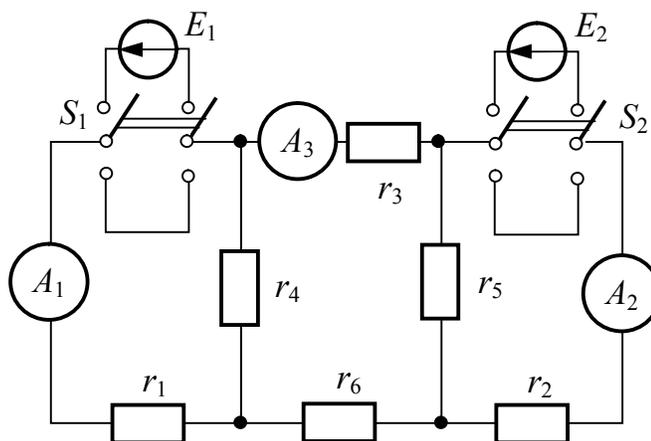


Рис. 2.1. Схема исследуемой цепи

Подготовка к выполнению работы

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

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 .

Методические указания по выполнению работы

1. Собрать схему рис. 2.1, при этом:

а) для измерения токов необходимо использовать миллиамперметры магнитоэлектрической системы на $75 - 150 \text{ мА}$, а для измерения ЭДС источников и напряжения холостого хода – вольтметр магнитоэлектрической системы на $30 - 50 \text{ В}$;

б) переключатели (тумблеры) S_1 и S_2 установить в такое положение, чтобы источники ЭДС были отключены от схемы;

в) выбрать положительные направления токов; миллиамперметры включить в схему таким образом, чтобы принятые 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.

2. Измерить ЭДС источников E_1 и E_2 , определить их полярность («+» и «-»), которую отразить на своей рабочей схеме. 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

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$	$r_3, \text{Ом}$	$r_4, \text{Ом}$	$r_5, \text{Ом}$	$r_6, \text{Ом}$

3. Выполнить опыты по проверке принципа наложения.

- Измерить токи в ветвях цепи при действии только источника ЭДС E_1 .

Для этой цели переключатели S_1 и S_2 нужно установить в такое положение, чтобы источник ЭДС E_1 был включен, а источник ЭДС E_2 – отключен, при этом вся остальная часть цепи должна остаться без изменений.

- Результаты измерений внести в табл. 2.2.

- Измерить токи в ветвях цепи при действии только источника ЭДС E_2 , для чего переключатели S_1 и S_2 установить в соответствующие положения.

- Результаты измерений также внести в табл. 2.2.

- По принципу наложения выполнить алгебраическое суммирование составляющих токов в ветвях и результаты внести в табл. 2.2.
- Измерить токи в ветвях при действии обоих источников ЭДС E_1 и E_2 .
- Результаты измерений внести в табл. 2.2.

Таблица 2.2 Результаты проверки принципа наложения

		I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA
Токи при действии только источника ЭДС E_1	Эксперим.			
	Расчёт			
Токи при действии только источника ЭДС E_2	Эксперим.			
	Расчёт			
Токи, полученные путем суммирования составляющих токов	Эксперим.			
	Расчёт			
Измеренные токи при включенных источниках ЭДС E_1 и E_2				

- Выполнить и представить расчёт токов и их составляющих по данным табл. 2.1 и результаты занести в табл. 2.2.

4. Исследовать цепь с применением метода эквивалентного генератора.

- Определить величину напряжения холостого хода расчетным путем, используя для этой цели выражение для U_{xx} , полученное в п.2 при подготовке к работе. Результаты расчета внести в табл. 2.3.

- 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.

- Аналитически определить величину входного сопротивления эквивалентного генератора, используя для этой цели выражение для r_{ex} , полученное ранее. Результаты расчета внести в табл. 2.3.

- 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 косвенно определить экспериментальное значение $r_{ex} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}$.

- Результаты измерений внести в табл. 2.3.

- По теореме об эквивалентном генераторе вычислить ток в ветви с сопротивлением r_3 и сравнить его с величиной этого тока, полученной в п.3 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 $r_{вх}, Ом$		Ток $I_3, мА$	
Измерено	Вычислено	Измеренный	Эксперимент	Вычислено	Эксперимент	Вычислено

5. Построить потенциальную диаграмму одного из контуров исследуемой цепи.

- Для заданного преподавателем контура цепи рис. 2.1 рассчитать потенциалы характерных точек, приняв потенциал одной из них равным нулю. Результаты расчета занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4 Потенциалы характерных точек контура

Контур	Точка	Потенциал

- По данным табл. 2.4 построить потенциальную диаграмму контура.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается принцип наложения?
2. Определите ток в ветви с источником ЭДС E_1 (рис. 2.1) методом наложения.
3. В чем заключается сущность теоремы об эквивалентном генераторе?
4. Как определить ЭДС эквивалентного генератора и его внутреннее сопротивление (экспериментально и расчётным путём)?
5. Определите ток в ветви с ЭДС E_2 (рис. 2.1) методом эквивалентного генератора.
6. Что представляет собой потенциальная диаграмма и как она строится?
7. Как изменяется потенциал при переходе через сопротивление навстречу току, протекающему через него?
8. Как изменяется потенциал при переходе через источник ЭДС по направлению, противоположному стрелке источника?
9. Справедлив ли принцип наложения для определения мощностей. Ответ поясните.
10. Можно ли применять принцип наложения для определения напряжений на ветвях цепи.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: – исследование вольтамперных характеристик нелинейных сопротивлений и проверка графического метода расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы (НЭ).

Основные теоретические положения

Сопротивления, для которых не выполняется прямо-пропорциональная зависимость между током и напряжением, называются нелинейными. Если в электрической цепи имеется хотя бы один нелинейный элемент, она называется нелинейной.

В настоящей работе исследуются следующие элементы: лампа накаливания, нелинейное полупроводниковое сопротивление (НПС) и линейное сопротивление.

Примерный вид вольтамперных характеристик (ВАХ) лампы накаливания (кривая 1) и нелинейного полупроводникового сопротивления (кривая 2) приведен на рис. 3.1.

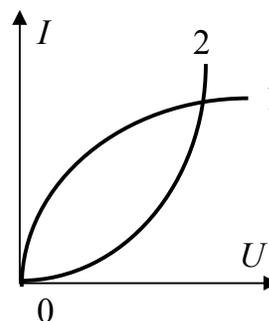


Рис. 3.1. ВАХ нелинейных сопротивлений

Для снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов последние подключаются к делителю напряжения, который представлен реостатом (рис. 3.2). При отсчете показаний приборов необходимо учитывать, что некоторые нелинейные элементы являются инерционными. Поэтому каждый последующий отсчет необходимо делать спустя несколько секунд после

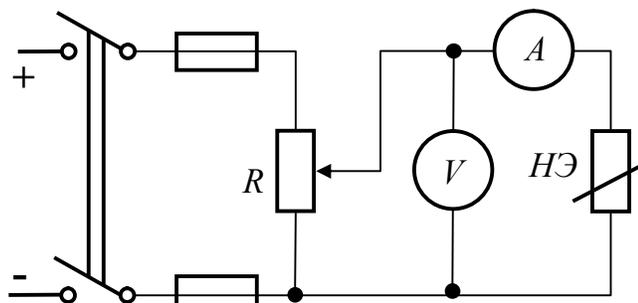


Рис. 3.2. Схема для снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов

изменения параметров режима. Снимая вольтамперные характеристики нелинейных элементов, следует не превышать максимально допустимые значения напряжения, указанные на лабораторном щитке.

Расчеты электрических цепей с нелинейными сопротивлениями построены на использовании графических методов преобразования цепей на основе законов Кирхгофа. Путем постепенной замены последовательно или параллельно соединенных элементов можно получить вольт-амперные характеристики всей цепи и её отдельных участков, а уже по ним определить токи и напряжения в ветвях.

При последовательном соединении нелинейных элементов (рис. 3.3,а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется в соответствии со вторым законом Кирхгофа путем графического сложения напряжений каждого из элементов при одних значениях тока (рис. 3.3,б).

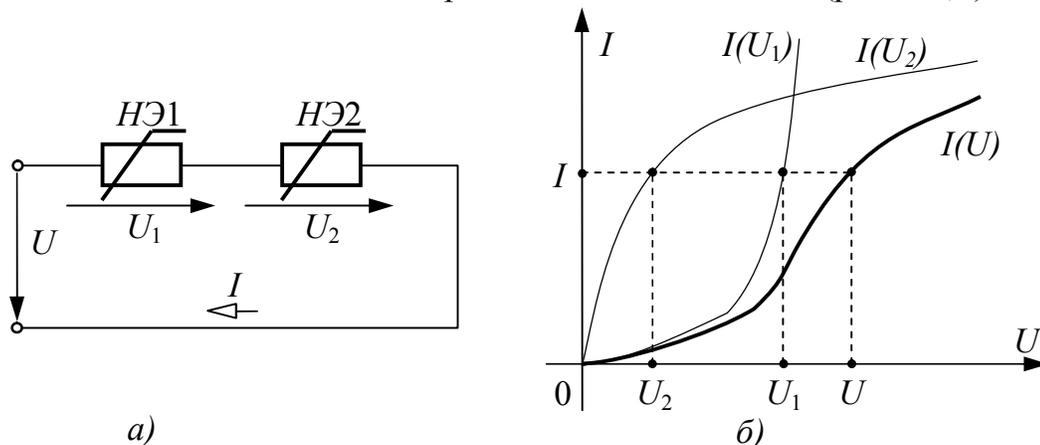


Рис. 3.3. Последовательное соединение нелинейных элементов

При параллельном соединении нелинейных элементов (рис. 3.4,а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется в соответствии с первым законом Кирхгофа путем графического сложения токов каждого из элементов при одних значениях напряжения (рис. 3.4,б).

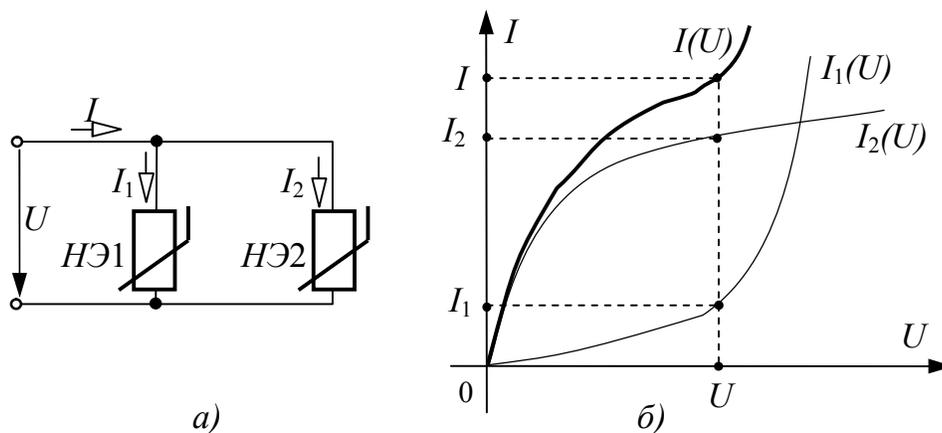


Рис. 3.4. Параллельное соединение нелинейных элементов

Для построения результирующей ВАХ смешанного соединения нелинейных элементов (рис. 3.5,а) на первом этапе выполняется построение промежуточной ВАХ параллельно соединенных элементов $(I_2+I_3)(U_{23})$. Затем промежуточная ВАХ складывается с ВАХ нелинейного элемента, находящегося в общей части цепи, как при последовательном соединении (рис. 3.5,б).

Методические указания по выполнению работы

1. Снять ВАХ каждого нелинейного элемента в соответствии со схемой (рис. 3.2) изменяя величину подаваемого напряжения через каждые 5 В до 50 В (номинальное напряжение элементов).

Результаты измерений свести в табл. 3.1.

Таблица 3.1 Вольтамперные характеристики резистивных элементов

№ п/п	Нелинейное полупроводниковое сопротивление $U_{ном} =$			Лампа накаливания $U_{ном} =$			Линейное сопротивление $U_{ном} =$		
	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$
1	0	0		0	0		0	0	
2									
и т.д.									

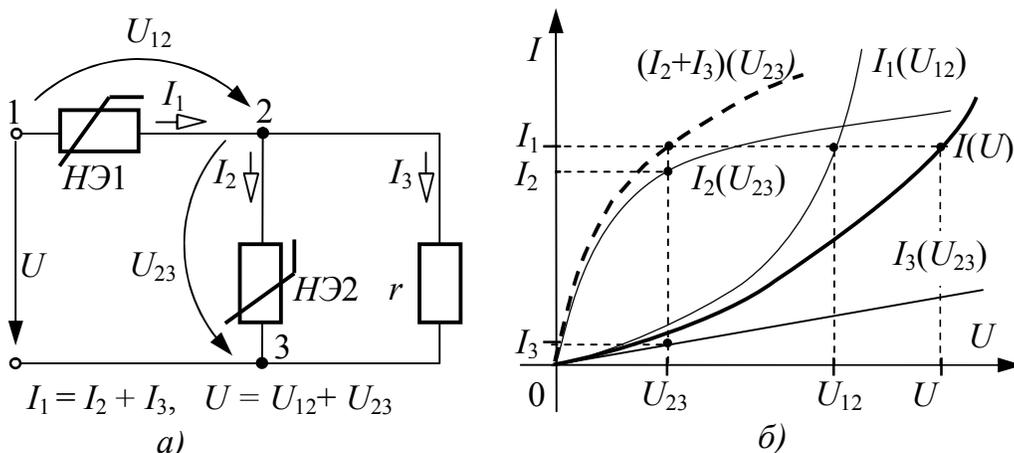


Рис. 3.5. Смешанное соединение нелинейных элементов

2. Для каждого значения тока I (табл. 3.1) вычислить величину статического сопротивления элемента $r_{ст} = \frac{U}{I}$.

3. По данным табл. 3.1 в одной и той же системе координат построить ВАХ нелинейных элементов.

4. В той же системе координат расчетным путем на основании данных табл. 3.1 построить вольтамперные характеристики:

- последовательного соединения лампы накаливания и НПС;
- параллельного соединения лампы накаливания и НПС;
- смешанного соединения трех резистивных элементов при условии, что в общей части цепи включено НПС или лампа накаливания (по указанию преподавателя).

Результаты графического расчета свести в табл. 3.2.

5. Собрать схемы, соответствующие п.4,а,б,в и экспериментально проверить результаты графического расчета.

Ток I_3 измерить для тех же значений напряжений, для которых расчетным путем получены токи I_p .

Результаты измерений также свести в табл. 3.2.

Таблица 3.2 Вольтамперные характеристики цепи при различных схемах соединения нелинейных элементов

№ п/п	Последовательное соединение НЭ			Параллельное соединение НЭ			Смешанное соединение НЭ		
	U, B	Расчет ное	Экспери менталь ное	U, B	Расчет ное	Экспери менталь ное	U, B	Расчет ное	Экспери менталь ное
		I_p, mA	I_3, mA		I_p, mA	I_3, mA		I_p, mA	I_3, mA
1									
2									
3									
и т.д.									

6. В одной системе координат построить зависимости статических сопротивлений нелинейных элементов от напряжения.

Примечание. При оформлении отчета, кроме схемы рис. 3.2, привести схемы, соответствующие исследованиям п.5.

Вопросы для самопроверки

1. Какие цепи называются нелинейными?
2. Дайте определение ВАХ?
3. Как определяется статическое сопротивление НЭ?
4. Как выполняется графический расчет при последовательном, параллельном и смешанном соединении НЭ?
5. Как изменяется статическое сопротивление лампы накаливания с ростом напряжения?

Лабораторная работа 4

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.

Основные теоретические положения

При последовательном соединении активного r , индуктивного x_L и ёмкостного x_C сопротивлений (рис. 4.1,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 согласно изображению на векторной диаграмме (рис. 4.1,б). При построении векторной диаграммы необходимо учитывать, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, на индуктивном сопротивлении – опережает ток на 90° , на ёмкостном – отстает от тока на 90° . Напряжение источника может быть рассчитано по формуле :

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

где: $U_r = I \cdot r$ – напряжение на активном сопротивлении;

$U_L = I \cdot x_L$ и $U_C = I \cdot x_C$ – напряжения на индуктивности и на конденсаторе, соответственно;

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

$$x_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \text{ – индуктивное и емкостное}$$

сопротивления, соответственно,

$$x = x_L - x_C \text{ – реактивное сопротивление цепи.}$$

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

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots = \sum r_i \text{ – общее активное сопротивление цепи,}$$

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

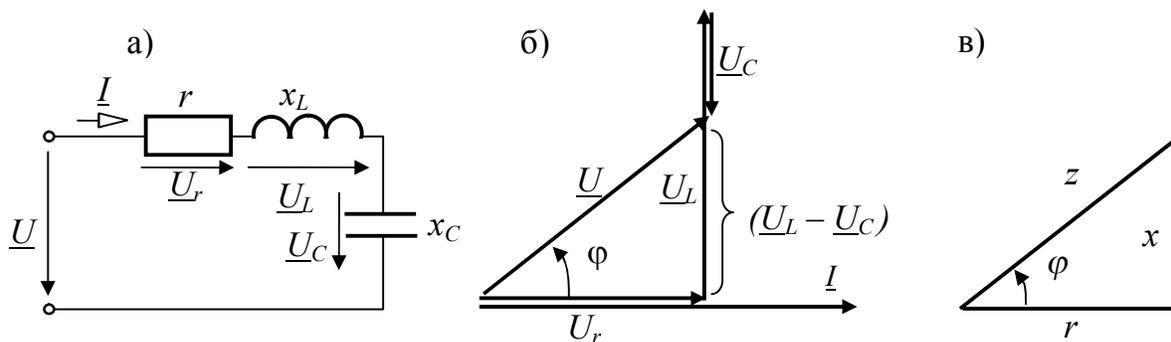


Рис. 4.1. Схема, векторная диаграмма и треугольник сопротивлений при последовательном соединении элементов для случая $x_L > x_C$

Полное сопротивление цепи z , активное r и реактивное $x = x_L - x_C$ образуют прямоугольный треугольник сопротивлений (рис. 4.1.в), для которого справедливы следующие соотношения:

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

$$\text{Коэффициент мощности цепи} \quad \cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{P}{S},$$

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

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

$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – полная мощность.

В зависимости от соотношения между x_L и x_C характер цепи может быть активно-индуктивным или активно-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:

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

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 источника:

$$U_L = U_C = I \cdot x_L = I \cdot x_C = U \cdot Q,$$

где $Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1/\omega C}{r}$ – добротность 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) конденсатор емкостью C , сопротивление которого 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 в магнитопроводе катушки, при этом с увеличением зазора индуктивность уменьшается.

Методические указания по выполнению работы

1. Опытное определение параметров цепи, состоящей из последовательного соединения реостата и катушки индуктивности.

- Собрать схему рис. 4.2.

- Убедиться, что воздушный зазор в сердечнике катушки отсутствует.

Подать напряжение на исследуемую цепь и, увеличивая воздушный зазор в сердечнике катушки, установить ток в цепи $1 \div 2$ А.

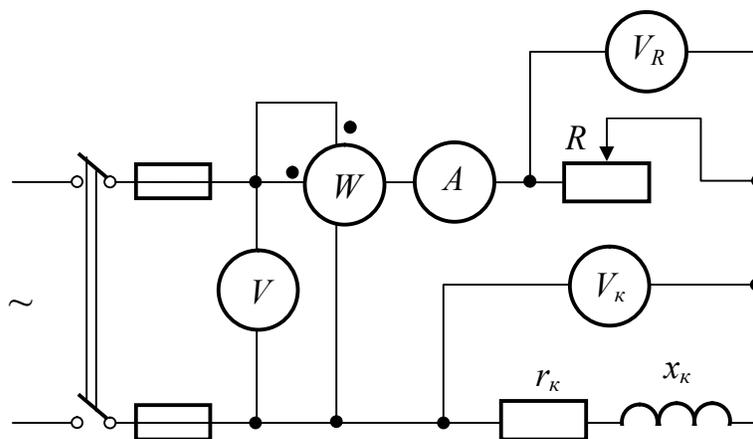


Рис. 4.2. Схема для исследования последовательного соединения реостата и катушки индуктивности

- 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. 4.1.

- 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 сопротивления 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 $U_{Lк}$ напряжения на катушке. Результаты вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1 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 , $Gн$	$\cos\varphi$	$U_{ак}$, B	$U_{Lк}$, B

- По данным табл. 4.1 в масштабе построить векторную диаграмму и треугольник сопротивлений для исследуемой цепи.

2. Опытное определение параметров цепи, состоящей из последовательного соединения реостата и конденсатора.

- Собрать рабочую схему (заменить в схеме рис. 4.2) катушку на конденсатор.

- Зная напряжение и частоту сети, сопротивление реостата (из предыдущего опыта) и емкость конденсатора (указана на рабочем щитке), рассчитать сопротивление конденсатора x_C , полное сопротивление цепи z , ток цепи I , напряжения на реостате U_R и конденсаторе U_C , потребляемую мощность P и коэффициент мощности $\cos\varphi$. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2 Результаты исследования цепи при последовательном соединении реостата и конденсатора

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

- Измерить напряжение на зажимах реостата U_R , конденсаторе U_C и общее напряжение U , а также ток I и потребляемую мощность P . Результаты измерений занести в табл. 4.2. Сравнить результаты расчета и измерений.

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

3. Исследование резонанса напряжений.

- Собрать схему рис. 4.3, включив последовательно с катушкой и конденсатором реостат R в качестве добавочного активного сопротивления с целью ограничения тока и напряжений при резонансе.

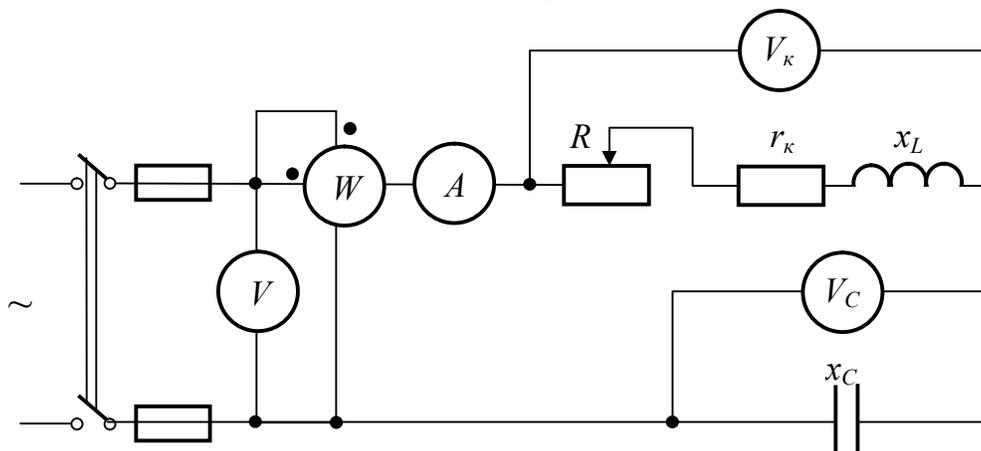


Рис. 4.3. Схема для исследования резонанса напряжений

- Увеличивая воздушный зазор в сердечнике 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 $1,8 \div 2,2 A$ и занести показания приборов в табл. 4.3.

- Изменяя воздушный зазор в сердечнике, снять и занести показания приборов в табл. 4.3 для двух режимов $x_L < x_C$ и $x_L > x_C$, добиваясь при этом значений тока $1,0 \div 1,5 A$.

- По результатам измерений вычислить: r , z , z_k , x_L , L , x_C , U_L , U_a для всех случаев по п.3. Результаты вычислений занести в табл. 4.3.

- По данным табл. 4.3 в масштабе построить векторные диаграммы цепи для 3-х случаев: 1) $x_L > x_C$; 2) $x_L = x_C$; 3) $x_L < x_C$.

Таблица 4.3 Результаты исследования резонанса напряжений

№ пп	Измерено					Вычислено								
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_k,$ B	$U_C,$ B	$r,$ $Ом$	$z,$ $Ом$	$z_k,$ $Ом$	$x_L,$ $Ом$	$L,$ $Гн$	$x_C,$ $Ом$	$U_L,$ B	$U_a,$ B	$\cos\varphi$
1														
2														
3														

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какой физический смысл имеет активное сопротивление?
2. Что такое индуктивность, ёмкость?
3. Как зависят активное, индуктивное и ёмкостное сопротивления от частоты?
4. Чему равен угол сдвига фаз между напряжением и током:
 - а) в реостате, б) в индуктивности, в) в ёмкости?
5. Как с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра можно определить индуктивное сопротивление и коэффициент мощности катушки?
6. Что понимают под активной, реактивной и полной мощностями цепи? Укажите единицы их измерения.
7. Какую мощность измеряет ваттметр?
8. Известны показания приборов в схеме рис. 3.2: вольтметра $V - 100 B$, ваттметра $W - 160 Bm$, амперметра $A - 2 A$, вольтметра $V_R - 60 B$. Определить параметры катушки и реостата.
9. Почему резонанс в последовательном контуре называется резонансом напряжений? При каких условиях он возникает?
10. Как практически можно достичь резонанса напряжений?
11. Почему при резонансе в последовательном контуре напряжения на катушке U_k и на конденсаторе U_C не одинаковы?
12. Каково назначение реостата R при исследовании резонанса напряжений?
13. Чему равен коэффициент мощности цепи ($\cos\varphi$) при резонансе напряжений?
14. При каких условиях в режиме резонанса величина напряжения на конденсаторе может превысить напряжение источника?

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ВЕТВЕЙ И РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Цель работы: экспериментальное определение параметров и проверка основных расчётных соотношений для цепей при параллельном соединении

ветвей с активными и реактивными элементами. Исследование условий возникновения резонанса токов и его признаков.

Основные теоретические положения

При параллельном соединении активного r , индуктивного x_L и ёмкостного x_C сопротивлений (рис. 5.1,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 определяется следующей формулой в соответствии с векторной диаграммой, представленной на рис. 5.1,б:

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

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

$b = b_L - b_C$ – реактивная проводимость цепи;

y – полная проводимость цепи.

При параллельном соединении нескольких ветвей, содержащих активные и реактивные элементы, их эквивалентные проводимости определяются по формулам:

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

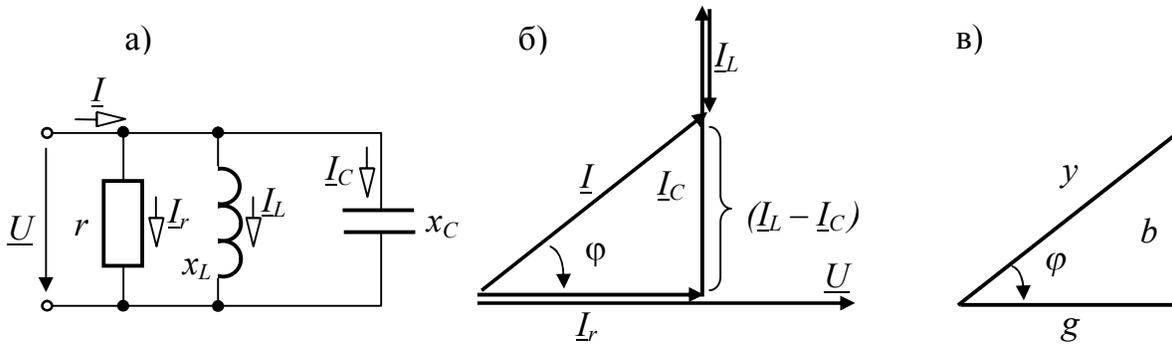


Рис. 5.1. Схема, векторная диаграмма и треугольник проводимостей при параллельном соединении элементов

Полная проводимость цепи y , активная g и реактивная b проводимости образуют прямоугольный треугольник (треугольник проводимостей рис. 5.1,в), для которого справедливы следующие соотношения:

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

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

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где: $I_a = I \cdot \cos \varphi$ – активная составляющая тока;

$I_p = I \cdot \sin \varphi$ – реактивная составляющая тока.

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:

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

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

$b_L = b_C$ – условие возникновения резонанса в цепи с параллельным соединением r, L, C .

При этом 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 принимает минимальное значение и совпадает по фазе с напряжением U , угол сдвига фаз $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$, причём токи в ветвях с реактивными элементами могут многократно превышать ток I .

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

Методические указания по выполнению работы

1. Исследование цепи при параллельном соединении приемников.

- Собрать рабочую схему рис. 5.2.

- Пользуясь тумблерами S_1, S_2 и S_3 , включить в цепь сначала только катушку и, увеличивая воздушный зазор в сердечнике, установить ток $1,5 \div 2$ А. Затем включить только ветвь с конденсатором, и, наконец, только реостат.

В каждом случае измерить напряжение U , ток I , потребляемую мощность P и вычислить: полную S и реактивную Q мощности, коэффициент мощности $\cos \varphi$, активную I_a и реактивную I_p составляющие тока, активную g , реактивную b и полную y проводимости.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

- Включить попарно: а) реостат и катушку (включены тумблеры S_1 и S_3); б) реостат и ветвь с конденсатором (включены тумблеры S_2 и S_3). Опыты провести при тех же значениях токов в ветвях, что и в предыдущих опытах, т.е. при том же воздушном зазоре и тех же положениях ползунков реостатов.

В каждом случае произвести измерения и вычисления величин, указанных в табл. 5.1.

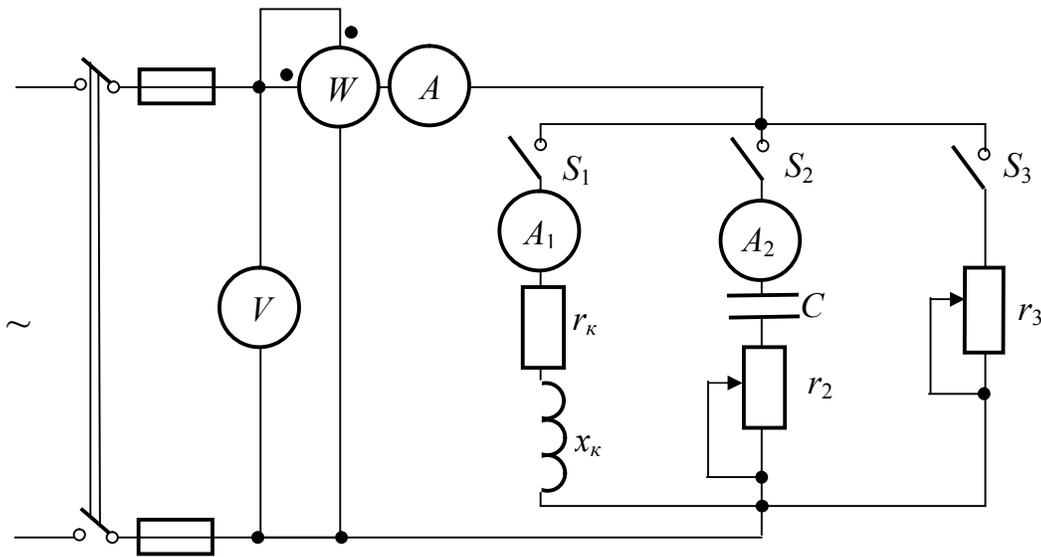


Рис. 5.2. Схема для исследования параллельного соединения приемников энергии

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

- По данным табл. 5.1 построить в масштабе векторные диаграммы цепи для случаев параллельного соединения: а) реостата и катушки; б) реостата и ветви с конденсатором. На векторных диаграммах показать активные и реактивные составляющие токов.

Таблица 5.1 Результаты исследования цепи при параллельном соединении приемников

№ пп	Включено	Измерено			Вычислено								
		$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$S,$ $ВА$	$Q,$ $вар$	$\cos\varphi$	$I_a,$ A	$I_p,$ A	$g,$ $См$	$b,$ $См$	$y,$ $См$	
1	Катушка												
2	Ветвь с конденсатором												
3	Реостат												
4	Реостат и катушка												
5	Реостат и ветвь с конденсатором												

2. Исследование резонанса токов.

- Включить параллельно катушку и ветвь с конденсатором (включены тумблеры S_1 и S_2). Увеличивая воздушный зазор в сердечнике, 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, I_1, I_2, P и P_2 .

Результаты измерений занести в табл. 5.2.

Примечания:

а) т. к. напряжение U практически неизменно, то мощность P_2 ветви с конденсатором можно взять из табл. 5.1;

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

- Для всех случаев измерений по п. 2 вычислить величины, указанные в табл. 5.2

Результаты вычислений занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2 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																

- По данным табл. 5.2, соблюдая масштабы, построить векторные диаграммы и треугольники проводимостей цепи для трёх случаев: а) $b_L > b_C$; б) $b_L = b_C$; в) $b_L < b_C$.

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какие токи называют активными и реактивными?
2. Как определяются активная, реактивная и полная проводимости ветвей?
3. Почему резонанс в параллельном контуре называется резонансом токов? При каких условиях в электрических цепях он возникает?
4. Как практически можно получить резонанс токов?
5. По каким признакам можно судить о наступлении резонанса токов?
6. Чему равна реактивная составляющая тока в общей части цепи при резонансе токов?
7. С какой целью применяются на практике режимы, близкие к резонансу токов?
8. Реостат и катушка включены параллельно, при этом ток реостата $I_R = 2 A$, активный и реактивный токи катушки, соответственно, равны $I_{ак} = 1 A$ и $I_{Lк} = 4 A$. Определить ток в общей части цепи.
9. Реостат и конденсатор включены параллельно на напряжение сети $U = 130 B$. Сопровитления реостата и конденсатора $r = x_C = 100 Ом$. Определите ток в общей части цепи.

10. Определите емкость конденсатора, который нужно подключить параллельно катушке (табл. 5.1) для повышения $\cos \varphi$ до 0,9 ($\varphi > 0$).

11. Может ли ток одной из параллельных ветвей при резонансе токов превышать значение тока в общей части цепи. Ответ обоснуйте.

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы: – экспериментальное определение параметров реальных катушек, имеющих индуктивную связь, их одноимённых зажимов, взаимной индуктивности и величины коэффициента связи; проверка расчётных соотношений для последовательного и трансформаторного включений элементов.

Основные теоретические положения

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 (рис. 6.1) катушки характеризуют взаимной индуктивностью $M_{12} = M_{21} = M$ (сопротивлением $x_M = \omega \cdot M$), которая может быть рассчитана по данным первого (табл. 6.1) или второго (табл. 6.2) опыта лабораторной работы:

$$M = \frac{E_{2M}}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{2x}}{\omega \cdot I_1}; \quad M = \frac{x_{\text{сogl}} - x_{\text{встр}}}{4\omega}.$$

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

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

Здесь:

L_1 и L_2 – индуктивности самоиндукции катушек;

M – взаимная индуктивность катушек, т.е. индуктивность, обусловленная общим потокоцеплением 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 данной лабораторной работе это

можно сделать по результатам опытов табл. 6.2, когда будут известны реактивные сопротивления $x_{\text{согл}}$ при согласном и $x_{\text{встр}}$ при встречном включении катушек. Согласным включением называется такое последовательное соединение катушек, при котором ток направлен относительно одноимённых зажимов катушек одинаково. Соответственно, при встречном включении – по-разному.

При последовательном соединении индуктивно связанных катушек (рис. 6.2) входное сопротивление цепи, ток и напряжения на катушках определяются выражениями:

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

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

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

При параллельном соединении (рис. 6.3) формулы для сопротивлений каждой из катушек и цепи в целом при наличии взаимной индуктивности имеют вид:

$$\underline{z}_{1c} = \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2 - \underline{z}_M^2}{\underline{z}_2}; \quad \underline{z}_{2c} = \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2 - \underline{z}_M^2}{\underline{z}_1}; \quad \underline{z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2 - \underline{z}_M^2}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2 + 2\underline{z}_M}.$$

Здесь $\underline{z}_1 = r_1 + j \cdot x_1$, $\underline{z}_2 = r_2 + j \cdot x_2$ – сопротивления катушек без индуктивной связи, $\underline{z}_M = j \cdot x_M$ – комплексное сопротивление взаимной индуктивности, 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 одноименными зажимами, а нижние знаки – для случая подключения разноименных зажимов к общему узлу.

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

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

Здесь \underline{z}_n – сопротивление нагрузки трансформатора.

Токи \underline{I}_1 и \underline{I}_2 трансформатора можно определить как непосредственным решением этой системы уравнений, так и с применением «развязки» индуктивной связи.

Активная мощность взаимной индукции, передаваемая через магнитное поле из первой катушки во вторую

$$P_{1-2} = \text{Re}(\underline{I}_2 \cdot \underline{I}_1 \cdot j \cdot x_M).$$

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

Методические указания по выполнению работы

1. Определение параметров индуктивно связанных катушек

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

Вторая катушка должна быть разомкнутой.

Воздушный зазор следует строго сохранять неизменным во всех последующих опытах.

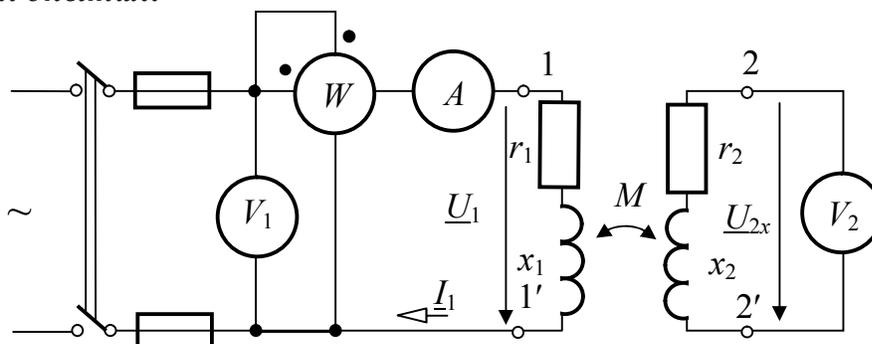


Рис. 6.1. Схема для определения параметров первой катушки и взаимной индуктивности

Измерить все величины, указанные в табл. 6.1.

По результатам измерений рассчитать параметры первой катушки:

$$r_1 = \frac{P}{I_1^2}, \quad z_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}, \quad x_M = \frac{U_{2x}}{I_1}.$$

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:

$$r_2 = \frac{P}{I_2^2}, \quad z_2 = \frac{U_2}{I_2}, \quad x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}, \quad x_M = \frac{U_{1x}}{I_2}.$$

Рассчитать коэффициент связи индуктивно связанных катушек.

Таблица 6.1 Опытное определение параметров индуктивно связанных катушек

Измерено и рассчитано	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$U_x,$ B	$z,$ $Ом$	$r,$ $Ом$	$x,$ $Ом$	$x_M,$ $Ом$	$M,$ $мГн$
1-я катушка									
2-я катушка									

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.

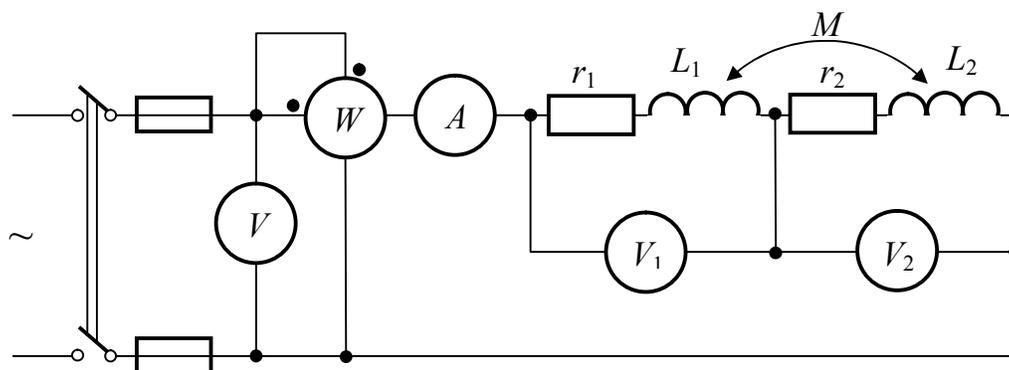


Рис. 6.2. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

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_{ex} , $Ом$
Согласное включение	Опыт						
	Расчёт						
Встречное включение	Опыт						
	Расчёт						

По результатам измерений вычислить полные z_{ex} и индуктивные x_{ex} сопротивления цепи при согласном и при встречном включении элементов. Сопротивления $r_{согл} = r_{встр} = r_1 + r_2$ взять из п. 1. Вычислить значение взаимной индуктивности M катушек и сравнить его со значением, полученным при выполнении п.1.

$$z_{согл} = \frac{U}{I_{согл}}; \quad x_{согл} = \sqrt{z_{согл}^2 - r_{согл}^2};$$

$$z_{встр} = \frac{U}{I_{встр}}; \quad x_{встр} = \sqrt{z_{встр}^2 - r_{встр}^2}.$$

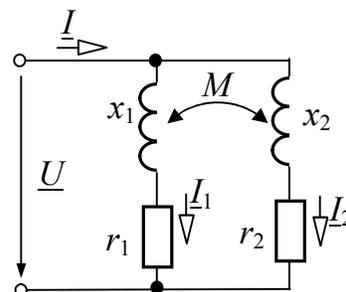


Рис. 6.3. Схема параллельного включения катушек

3. Исследование параллельного соединения индуктивно связанных элементов

Собрать схему рис. 6.3 и выполнить измерения величин для двух случаев (1 – катушки подключены к общему узлу одноимёнными жазимами, 2 – разноимёнными), указанных в табл. 6.3, занести результаты измерений в эту таблицу.

По результатам измерений вычислить сопротивление цепи z_{ex} для двух случаев. Сравнить измеренные значения входного тока для случаев 1 и 2 и сделать вывод о влиянии включения катушек на сопротивление цепи.

Таблица 6.3 Результаты исследования цепи при параллельном соединении катушек

Параллельное соединение	U, B	I, A	$P, Вт$	I_1, A	I_2, A	$z_{ex}, Ом$
1						
2						

4. Исследование трансформаторной схемы включения индуктивно связанных элементов.

Собрать схему цепи по рис. 6.4. Результаты измерений внести в табл. 6.4.

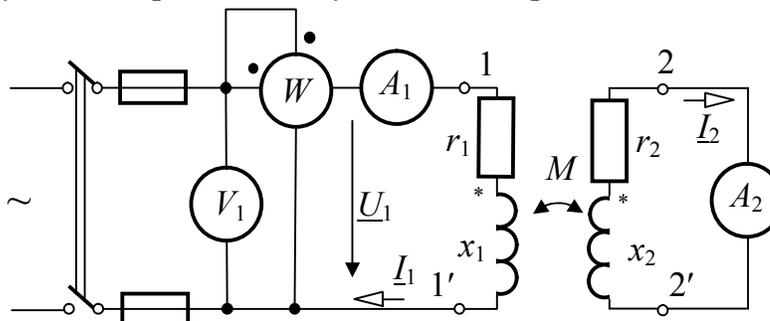


Рис. 6.4. Трансформаторная схема включения катушек при коротком замыкании на зажимах второй катушки

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 включения катушек

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

5. При оформлении отчёта необходимо выполнить расчёт трансформаторной схемы, который следует привести в отчете. С соблюдением масштабов построить векторные диаграммы цепи для последовательного (2 случая) и трансформаторного включения катушек.

Сделать выводы по выполненной работе.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется явлением взаимной индукции и каким выражением определяется ЭДС взаимной индукции?

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

3. Приведите схемы и формулы для определения взаимной индуктивности катушек.

4. Какие расчётные соотношения проверялись при последовательном и трансформаторном включении катушек в лабораторном эксперименте?

5. Сформулируйте условие передачи активной мощности через узел связи.

6. Как по величине тока при последовательном включении индуктивно связанных катушек определить характер включения (согласное или встречное)?

7. Две индуктивно связанные катушки соединены параллельно, их одноименные зажимы катушек подсоединены к одному узлу. Запишите уравнения по законам Кирхгофа для данной схемы. Как изменятся эти уравнения, если катушки соединить разноименными зажимами в одном узле?

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: экспериментальное исследование различных режимов работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии звездой и треугольником.

Основные теоретические положения

Трехфазной называется цепь, которая состоит из трехфазного генератора (источника энергии), соединенного с трехфазным приемником.

Трехфазный генератор представляет собой систему трех источников ЭДС одинаковой величины и частоты, начальные фазы которых сдвинуты на 120° . Различают две схемы соединения источников ЭДС: в звезду и в треугольник. При соединении в звезду все концы фазных обмоток генератора соединяются в общую точку – нулевую точку генератора (O на рис. 7.1). Провода, соединяющие фазы генератора с приемником называются линейными проводами. Напряжения между линейными проводами и нулевой точкой называются фазными напряжениями генератора – U_A, U_B, U_C , а напряжения между линейными проводами называются линейными напряжениями генератора – U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Фазные и линейные напряжения образуют симметричную систему напряжений.

Трехфазный приемник также имеет две схемы соединения: в звезду и в треугольник.

При соединении трехфазного приемника звездой концы фаз приемника соединяются в одной точке, называемой нулевой точкой приемника (O_1). Провод, соединяющий нулевые точки генератора O и приемника O_1 называют нейтральным или нулевым. Напряжения на фазах нагрузки (между линейными проводами и нулевой точкой приемника) называются фазными напряжениями приемника: $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$; а напряжения между линейными проводами – линейными напряжениями приемника: $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$.

При соединении приемника звездой в симметричном режиме работы трехфазной цепи, который имеет место при равенстве комплексов

сопротивлений фаз нагрузки $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$, фазные и линейные напряжения приемника равны соответствующим фазным и линейным напряжениям генератора:

$\underline{U}_a = \underline{U}_A$, $\underline{U}_b = \underline{U}_B$, $\underline{U}_c = \underline{U}_C$, $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$,
линейные токи равны фазным: $I_L = I_\phi$, а линейные и фазные напряжения связаны между собой соотношением $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

На рис. 7.1 представлена схема и векторная диаграмма при симметричном режиме работы трехфазной цепи и соединении приемника звездой для случая активной нагрузки ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = r$).

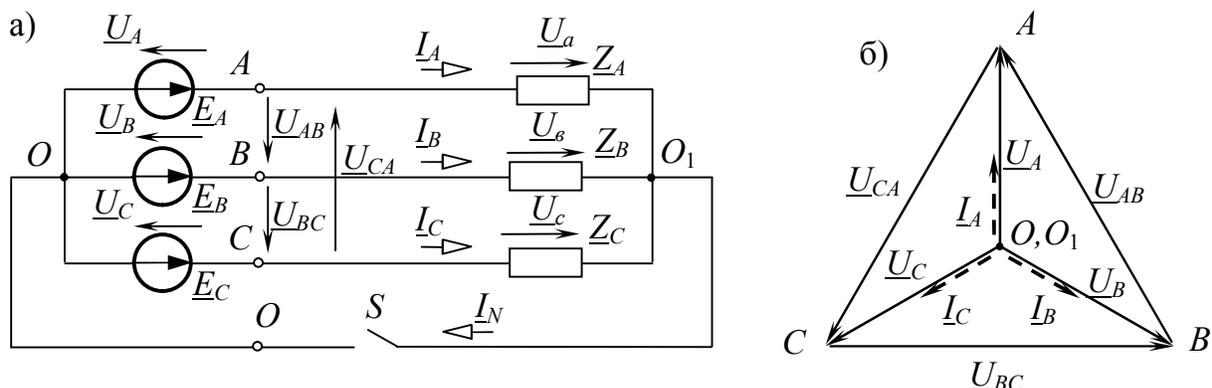


Рис. 7.1. Схема и векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении приемников звездой

В симметричном режиме работы напряжение между нулевыми точками генератора и приемника (смещение нейтрали) равно нулю, токи фаз приемника образуют симметричную систему векторов, и при подключении нулевого провода (ключ S замкнут), ток в нем будет равен нулю:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

Поэтому при симметричной нагрузке нейтральный провод не применяется.

В случае несимметричной нагрузки ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) и отсутствия нулевого провода (ключ S разомкнут) между нейтральными точками приемника и генератора возникает напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали, которое согласно методу двух узлов будет равно:

$$\underline{U}_N = \underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{U}_A \frac{1}{\underline{Z}_A} + \underline{U}_B \frac{1}{\underline{Z}_B} + \underline{U}_C \frac{1}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}},$$

Фазные напряжения приемника при этом изменяются в соответствии с выражениями

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

и образуют несимметричную систему векторов напряжений, что в свою очередь приводит к несимметричной системе векторов тока.

Если же при несимметричной нагрузке замкнуть нулевой провод, то происходит выравнивание фазных напряжений на нагрузке, они становятся

симметричными $\underline{U}_a = \underline{U}_A$, $\underline{U}_b = \underline{U}_B$, $\underline{U}_c = \underline{U}_C$, что приводит к несимметричной системе векторов токов в фазах нагрузки и возникновению тока в нейтральном проводе: $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$.

Векторные диаграммы при несимметричной нагрузке ($\varphi_a > 0$, $\varphi_b < 0$, $\varphi_c = 0$) имеют вид, представленный на рис. 7.2, а и б для схемы без нулевого провода и с нулевым проводом, соответственно.

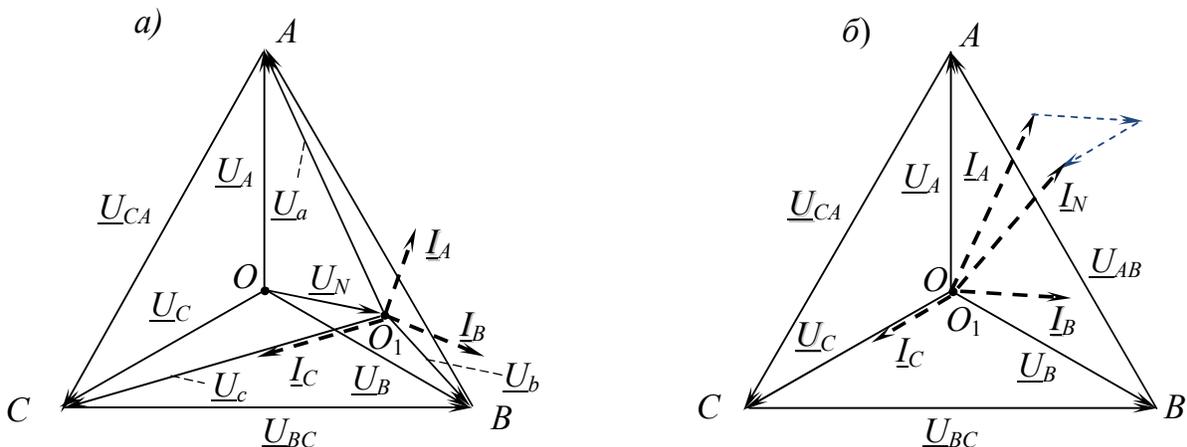


Рис. 7.2. Векторные диаграммы трехфазной цепи при соединении приемников звездой без нулевого провода (а) и с нулевым проводом (б)

При соединении трехфазной нагрузки треугольником (рис. 7.3) линейные напряжения непосредственно воздействуют на сопротивления фаз приемника и равны фазным

$$U_\phi = U_L.$$

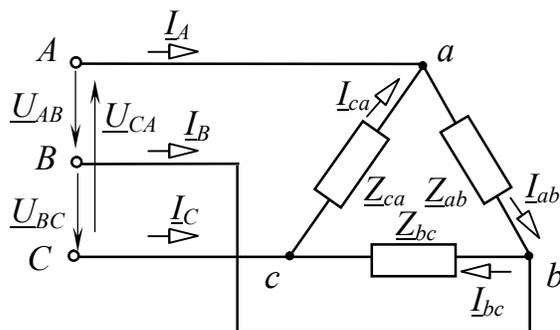


Рис. 7.3. Схема трехфазной цепи при соединении приемников треугольником

Поэтому токи в фазах треугольника определяются по закону Ома, а линейные токи – по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, & \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, & \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}; \\ \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, & \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, & \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \end{aligned}$$

В симметричном режиме линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi}.$$

На рис. 7.4,а и б представлены векторные диаграммы, соответственно, при симметричной ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = r$) и несимметричной нагрузке ($\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$ при $\varphi_{ab} > 0$, $\varphi_{bc} < 0$ и $\varphi_{ca} = 0$).

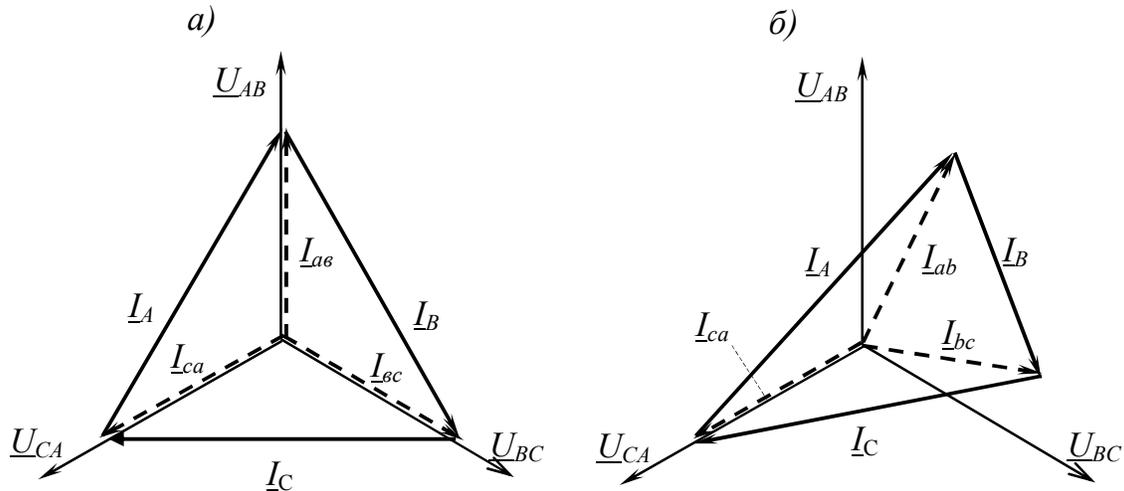


Рис. 7.4. Векторные диаграммы трехфазной цепи при соединении приемников треугольником при симметричной а) и несимметричной б) нагрузке

Методические указания по выполнению работы

Соединение приемников энергии в звезду

1. Выполнить соединение фаз приемника звездой по схеме рис. 7.5.
Параллельное соединение трех резисторов и ёмкости в каждой фазе (рис. 7.5, 7.6) позволяет создавать как симметричную, так и несимметричную нагрузки.
2. При симметричной и несимметричной нагрузке измерить линейные и фазные напряжения и токи, указанные в табл. 7.1 (элементы, включаемые в фазу для строк 3-6, указываются преподавателем для каждой бригады в отдельности), для случаев: а) в схеме без нулевого провода (НП) и б) в схеме с нулевым проводом.
Результаты измерений записать в табл. 7.1.
3. На основании измерений, выполненных для случая симметричной нагрузки проверить соотношение между линейным и фазным напряжениями (взять усредненные значения напряжений) U_{Δ}/U_{ϕ} .
4. Пригласить преподавателя и провести опыт короткого замыкания (КЗ) в одной из фаз (по указанию преподавателя) **при отключенном нулевом проводе**. Произвести при этом измерение напряжений и токов, и записать их в табл. 7.1.

Таблица 7.1 Исследование цепи при соединении приёмника звездой

№	Напряжения						Токи				Включено в фазу			Примечания
	линейные			фазные			$I_A,$ A	$I_B,$ A	$I_C,$ A	$I_N,$ A	ax	by	cz	
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$U_a,$ B	$U_b,$ B	$U_c,$ B								
1											3R	3R	3R	Без НП
2											3R	3R	3R	С НП
3														Без НП
4														С НП
5														Без НП
6														С НП
7											3R	3R	3R	КЗ фазы без НП

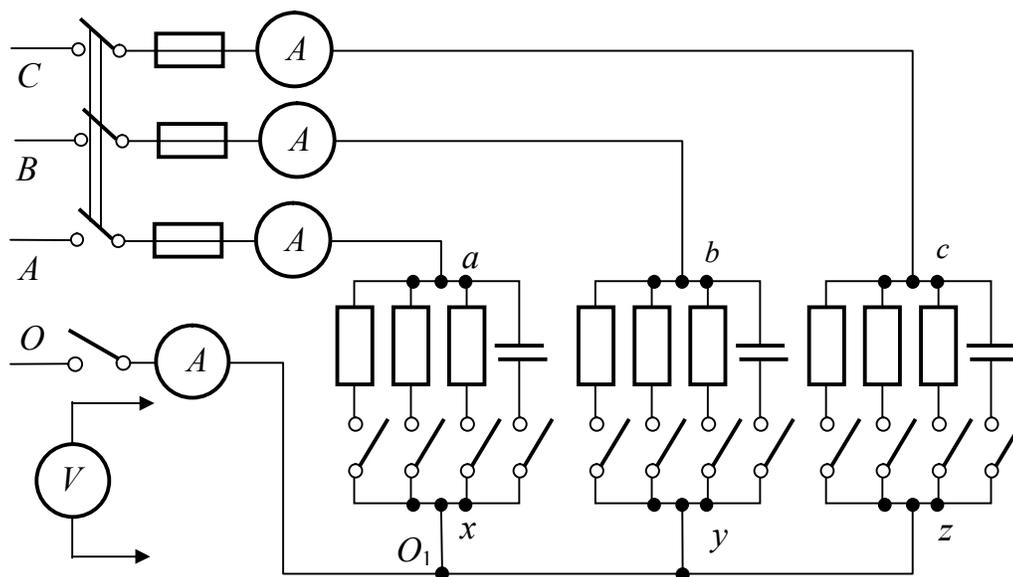


Рис. 7.5. Соединение приемника в звезду

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

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

Примечание. Для определения нулевой точки приемника при построении векторных диаграмм для несимметричных режимов работы рекомендуется воспользоваться циркулем (метод засечек). Нулевая точка располагается в середине криволинейного треугольника, возникающего при пересечении дуг окружностей, центрами которых являются точки A , B и C , а радиусы их равны, соответственно, напряжениям: \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c .

Соединение приемников энергии в треугольник

1. Выполнить соединение фаз приемника по схеме треугольника (рис. 7.6).

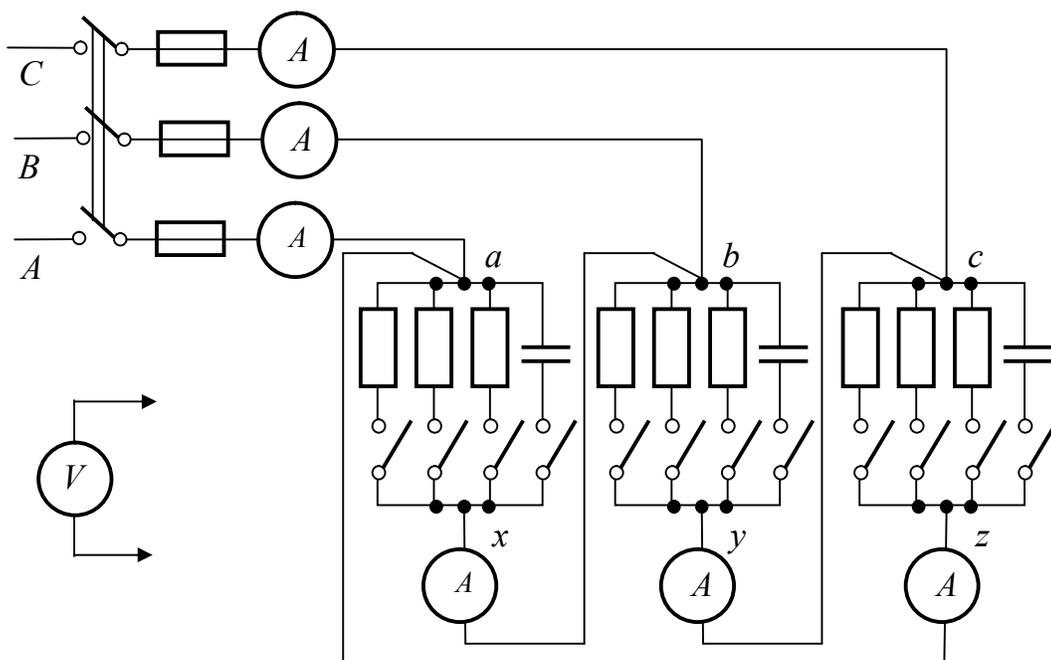


Рис. 7.6. Соединение приемника в треугольник

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

Таблица 7.2 Исследование цепи при соединении треугольником

№	Напряжения			Токи						Включено в фазу			Примечания
				линейные			фазные						
	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{cz},$ А	ax	by	cz	
1										3R	3R	3R	
2													
3													
4										3R	3R	3R	Оборван ЛП

Примечание: для опытов 2, 3 нагрузка фаз, а для опыта 4 (табл. 7.2) фаза, в которой производится обрыв линейного провода (ЛП), задается преподавателем для каждой бригады в отдельности.

3. Для симметричной нагрузки проверить соотношение между линейным и фазным токами (взять усредненные значения токов) $I_{Л}/I_{Ф}$.

4. На основании измерений (табл. 7.2) для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

5. Провести анализ векторных диаграмм.

Вопросы для самопроверки

1. Для симметричного режима работы запишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приемников энергии в звезду и треугольник.
2. Почему на подстанциях в нулевом проводе не устанавливают предохранитель?
3. Почему при симметричной нагрузке в нулевом проводе отсутствует ток?
4. Что такое смещение нейтрали? Как можно определить и измерить напряжение смещения нейтрали?
5. Почему короткое замыкание в одной из фаз приемника энергии разрешается выполнять только при выключенном нулевом проводе?
6. 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 ($I_{L\Delta} / I_{LY}$).
7. В каких случаях, и с какой целью в трёхфазных цепях применяют нулевой провод?
8. В чем заключается преимущество четырехпроводных трехфазных цепей по сравнению с трехпроводными.
9. Чему равна сумма линейных напряжений трехфазной системы?

Лабораторная работа 8

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы: изучение основных схем измерения активной и реактивной мощностей в цепях трехфазного тока.

Основные теоретические положения

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

Схема одного 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

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi,$$

где: U_L и I_L – 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 универсальной и распространенной схемой измерения активной мощности в **трехфазных трехпроводных** цепях является схема двух ваттметров. Эта схема применяется при любой схеме соединения приемников энергии (звезда и треугольник) как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

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 .

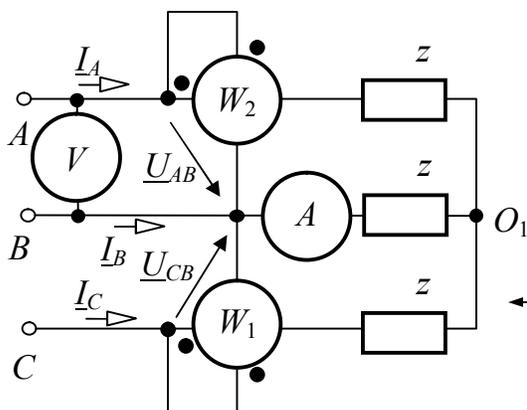


Рис. 8.1. Измерение активной мощности по схеме двух ваттметров

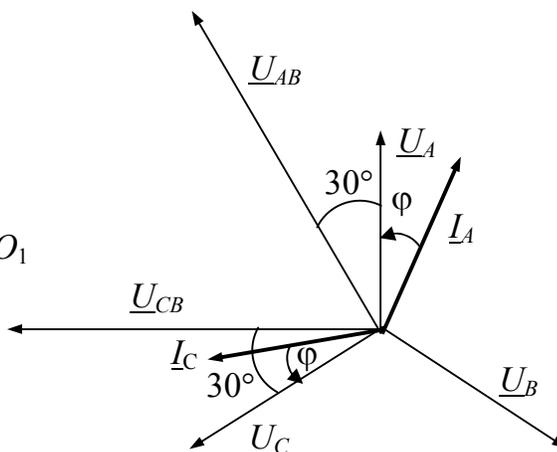


Рис. 8.2. Векторная диаграмма, соответствующая схеме измерения активной мощности

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

$$N_1 = U_{Л} I_{Л} \cos(30^\circ - \varphi),$$

а второго

$$N_2 = U_{Л} I_{Л} \cos(30^\circ + \varphi).$$

Очевидно, показания ваттметров одинаковы только при $\varphi=0$ (чисто активная нагрузка); при $|\varphi|=60^\circ$ имеет место нулевое показание одного из ваттметров, а вся мощность цепи измеряется только другим ваттметром; при $|\varphi|>60^\circ$ один из ваттметров даёт отрицательное показание (его стрелка отклоняется в левую от нуля сторону). Для измерения мощности этим ваттметром надо изменить направление тока в катушке напряжения (поменяв полярность выводов катушки), а мощность считать отрицательной.

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

$$P = N_1 + N_2.$$

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

$$Q = \sqrt{3}N,$$

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.

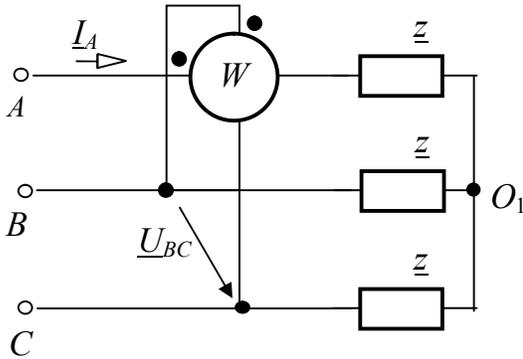


Рис. 8.3. Измерение реактивной мощности одним ваттметром

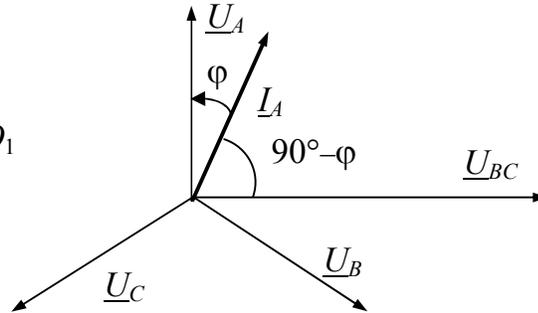


Рис. 8.4. Векторная диаграмма, соответствующая схеме измерения реактивной мощности

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, которая дает более точный результат (рис. 8.5). Реактивная мощность в этом случае

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

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

$$Q = \sqrt{3}(N_1 - N_2),$$

где N_1 и N_2 – мощности, измеренные первым и вторым ваттметрами, соответственно.

В данной работе в качестве активной нагрузки используются резисторы, а в качестве реактивной – конденсаторы.

Схема соединения резисторов и конденсатора для одной фазы нагрузки ax показана на рис. 8.6. Из этой схемы определяются $\cos\varphi$ и $\sin\varphi$.

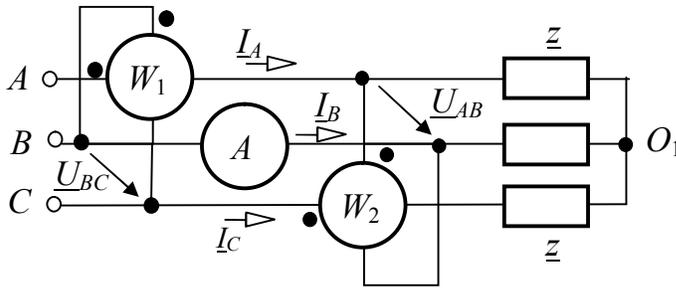


Рис. 8.5. Измерение реактивной мощности с помощью двух ваттметров

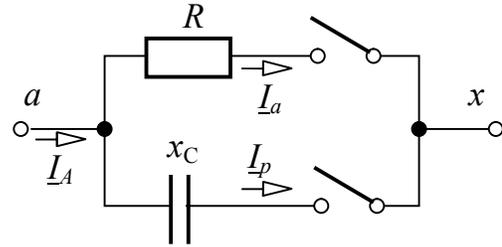


Рис. 8.6. Схема включения резисторов и конденсатора для одной фазы нагрузки

Методические указания по выполнению работы

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

2. Собрать схему для измерения активной мощности двумя однофазными ваттметрами (рис. 8.1).

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

В опыте 4 мощность цепи, которая стала однофазной, 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 Исследование схемы измерения активной мощности

№ п/п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		$U_{\text{Л}}$ В	$I_{\text{Л}}$ А	N_1 , Вт	N_2 , Вт	$\cos \varphi$	$P = N_1 + N_2$, Вт	$P = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos \varphi$, Вт
1	Резисторы							
2	Резисторы и конденсаторы							
3	Конденсаторы							
4	Обрыв линейного провода А							

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

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

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

В опыте 4 мощность цепи, которая стала однофазной, 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 Исследование схемы измерения реактивной мощности

№ п/п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		U_L, B	I_L, A	$N_1, Вт$	$N_2, Вт$	$\sin\varphi$	$Q = \frac{\sqrt{3}}{2} (N_1 + N_2), \text{вар}$	$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi, \text{вар}$
1	Резисторы							
2	Резисторы и конденсаторы							
3	Конденсаторы							
4	Обрыв линейного провода A							

7. По данным табл. 8.2 для случая 2 построить векторную диаграмму цепи рис. 8.5.

8. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

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

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

3. Как влияет порядок чередования фаз на измерение активной и реактивной мощностей трехфазной цепи?

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

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

6. Чем отличается подключение однофазных ваттметров при измерении реактивной мощности индуктивной и емкостной нагрузки?

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

8. В каком случае неприменима схема рис. 8.1?

Лабораторная работа 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

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

Основные теоретические положения

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

$$i(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_1 - \phi_1) + I_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \psi_2 - \phi_2) + \dots + I_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_k - \phi_k) + \dots,$$

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

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

При этом

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

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

$$x_L^{(k)} = k \cdot \omega \cdot L, \quad x_C^{(k)} = \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C}. \quad (9.2)$$

Из (9.2) видно, что индуктивное сопротивление $x_L^{(k)}$ прямо пропорционально угловой частоте ω , а ёмкостное сопротивление $x_C^{(k)}$ – обратно пропорционально.

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

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

где: k – номер гармоники;

n – число гармоник напряжения и тока;

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

Действующие значения напряжения U и тока I определяются из выражений:

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

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

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

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

При графическом разложении в ряд Фурье несинусоидальной функции времени $f(\omega t)$ её период T разбивают на n равных интервалов $\Delta\omega = \frac{2\pi}{n}$ (рис. 9.1), а интегралы, определяющие коэффициенты ряда Фурье, заменяют соответствующими алгебраическими суммами. Постоянная составляющая A_0 ряда Фурье, амплитуда k -той гармоники синусной составляющей A'_{km} и амплитуда k -той гармоники косинусной составляющей A''_{km} этого ряда находятся из выражений:

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

$$\begin{aligned} A'_{km} &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) \cdot d(\omega t) \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k \cdot \omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \\ &= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k \cdot \omega t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A''_{km} &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) \cdot d(\omega t) \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k \cdot \omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \\ &= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k \cdot \omega t), \end{aligned}$$

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

$\sin_p(k \cdot \omega t)$, $\cos_p(k \cdot \omega t)$ – значения синуса и косинуса аргумента в конце p -го интервала, причём аргумент ωt умножен на порядковый номер гармоники k .

Чем больше число интервалов разбиения, тем точнее результаты разложения в ряд Фурье. На практике обычно достаточно разделить период 2π на $n=24$ или $n=48$ интервалов.

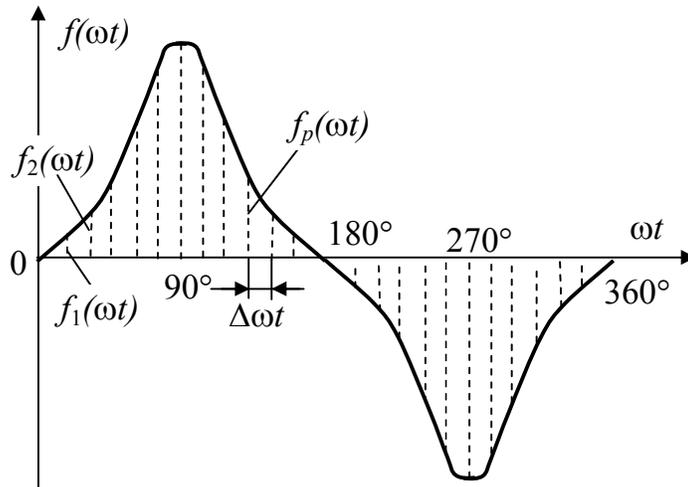


Рис. 9.1. Графоаналитическое разложение несинусоидальной функции времени на гармонические составляющие

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

$$A_{km} = \sqrt{(A'_{km})^2 + (A''_{km})^2}, \quad \operatorname{tg}\psi_k = \frac{A''_{km}}{A'_{km}},$$

где A_{km} и ψ_k – соответственно, амплитуда и начальная фаза k -той гармоники одинарного ряда Фурье.

Если A''_{km} и A'_{km} положительны, то угол ψ_k находится в первой четверти координатной плоскости (то есть в пределах от 0 до $+90^\circ$), если A''_{km} положительно, а A'_{km} отрицательно, то угол находится во второй четверти (то есть в пределах от $+90^\circ$ до $+180^\circ$), если A''_{km} и A'_{km} отрицательны, то угол – в третьей четверти (в пределах от $+180^\circ$ до $+270^\circ$ или, что равносильно, от -90° до -180°), если, наконец, A''_{km} отрицательно, а A'_{km} положительно, то угол – в четвёртой четверти (то есть его величина заключена или от $+270^\circ$ до $+360^\circ$, или от 0° до -90°).

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

При насыщении дросселя ток в последовательной цепи дроссель-резистор r_1 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.

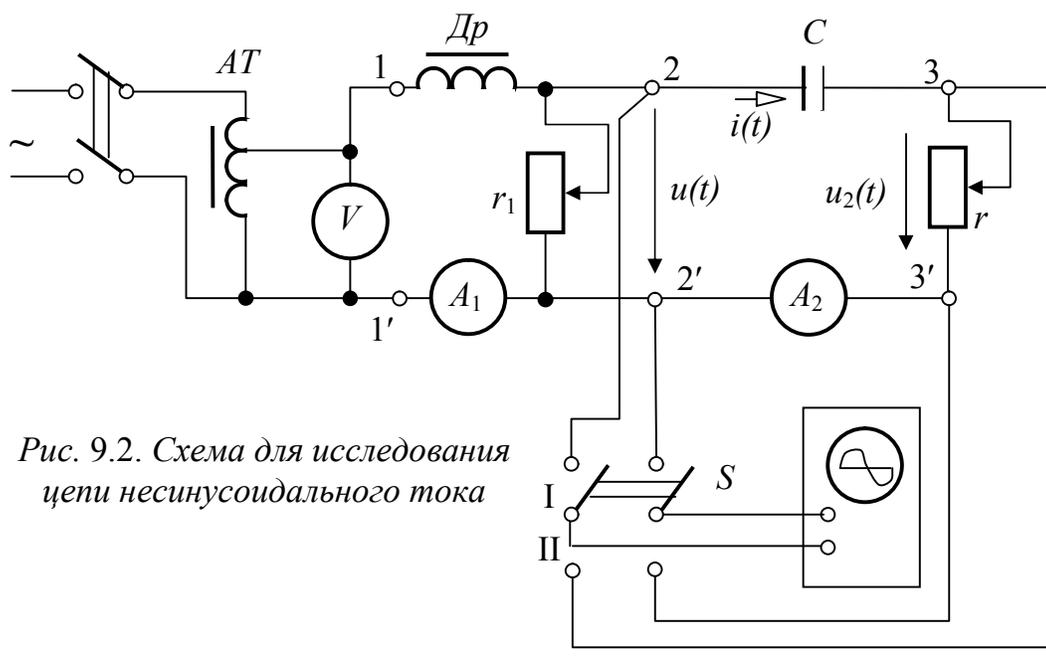


Рис. 9.2. Схема для исследования цепи несинусоидального тока

Методические указания по выполнению работы

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

- 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.

- Записать в табл. 9.1 величину ёмкости C (указана на щитке лабораторного стола), а также величину сопротивления r исследуемой цепи, которая определяется методом вольтметра-амперметра путём подключения вольтметра параллельно r и делением его показания на показание амперметра A_2 .

Таблица 9.1 Параметры исследуемой цепи и ток в ней

$C, \text{ мкФ}$	$r, \text{ Ом}$	$I, \text{ mA}$	
		Расчёт	Эксперимент

- С помощью автотрансформатора AT установить ток в цепи дросселя, равный $1,5 \div 2 \text{ A}$ (значение тока контролируется с помощью амперметра A_1).

- Записать в табл. 8.1 показание амперметра A_2 .

- Снять осциллограммы кривых входного несинусоидального напряжения $u(t)$ исследуемой цепи (переключатель S в положении I) и напряжения $u_2(t)$ на активном сопротивлении r (переключатель S в положении II). Последнее напряжение по форме совпадает с током, что является основанием утверждать,

что эта осциллограмма (с учётом перевода масштаба напряжения, который определяется положением переключателя на передней панели осциллографа, в масштаб тока) является осциллограммой тока исследуемой цепи. Для определения масштаба тока необходимо масштаб напряжения u_2 (в вольтах на деление) разделить на величину сопротивления r .

- Несинусоидальную кривую входного напряжения $u(t)$ разложить на гармонические составляющие ряда Фурье, используя графоаналитический метод разложения (рекомендуется расчёты выполнять с использованием математической системы Mathcad) [4, с.140]. Допускается при разложении ограничиться только первой и третьей гармониками.

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

- Определить действующее значение несинусоидального тока и сравнить его с экспериментальным значением (см. табл. 9.1).

- В одной и той же координатной системе построить графики тока первой гармоники, тока третьей гармоники и тока, полученного путём суммирования этих гармоник. Сравнить полученную кривую тока с осциллограммой тока $i(t)$.

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

2. Заменить в схеме рис. 9.2 конденсатор C на катушку индуктивности и снять осциллограммы кривых входного несинусоидального напряжения $u(t)$ исследуемой цепи и напряжения $u_2(t)$ на активном сопротивлении r . Сравнить форму входного несинусоидального напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$. Сделать выводы о влиянии индуктивности на форму кривой тока.

Вопросы для самопроверки

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

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

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

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

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

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

7. Ответьте на вопрос 6, заменив слово "индуктивность" на слово "ёмкость".

8. Зависит ли действующее значение несинусоидальной величины от начальных фаз и частот отдельных гармоник?

9. Приборами каких систем измеряют действующее и среднее значения тока или напряжения?

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 конденсатора C и резистора r . Исследование переходных процессов в схеме при смешанном соединении сопротивлений и ёмкости.

Основные теоретические положения

При включении цепи рис. 10.1, состоящей из последовательно соединённых ёмкости C и активного сопротивления r , на постоянное напряжение U источника переходный процесс в ней описывается в соответствии с уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа

$$\begin{aligned} ir + u_C &= U, \\ \text{или} \quad C \frac{du_C}{dt} r + u_C &= U, \end{aligned} \quad (10.1)$$

где i – мгновенное значение тока,

u_C – мгновенное значение напряжения на конденсаторе.

Решением линейного неоднородного дифференциального уравнения (10.1) является выражение вида

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

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

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left[U - U e^{-\frac{t}{rc}} \right] = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

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 $t_m = (3 \div 5) \cdot \tau$.

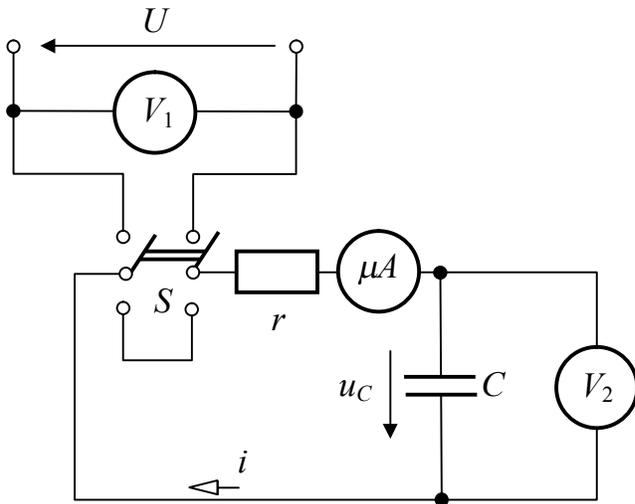


Рис. 10.1. Схема для исследования переходных процессов в цепи с последовательным соединением r, C

При разряде емкости C на сопротивление r переходный процесс в цепи (переключатель S схемы 10.1 в нижнем положении) описывается уравнением

$$C \frac{du_C}{dt} r + u_C = 0.$$

При этом напряжение на емкости и ток определяются выражениями

$$u_C = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad i = -\frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

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 рис. 10.3 при её включении на постоянное напряжение описывается системой уравнений

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_C, \\ i_1 r_1 + i_2 r_2 = U, \\ i_2 r_2 - \frac{1}{C} \int i_C dt = 0. \end{cases} \quad (10.3)$$

Искомые токи имеют принужденные и свободные составляющие:

$$\begin{aligned} i_{1np} &= \frac{U}{r_1 + r_2}; & i_{2np} &= i_{1np}; & i_{Cnp} &= 0; \\ i_{1св} &= A e^{p_1 t}; & i_{2св} &= B e^{p_1 t}; & i_{Cсв} &= D e^{p_1 t}; \\ i_1 &= i_{1np} + i_{1св}; & i_2 &= i_{2np} + i_{2св}; & i_C &= i_{Cnp} + i_{Cсв}. \end{aligned}$$

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

$$Z(p_1) = r_1 + \frac{r_2 \cdot \frac{1}{p_1 C}}{r_2 + \frac{1}{p_1 C}} = 0,$$

откуда
$$p_1 = -\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2 C} = -\frac{1}{\tau},$$

где $\tau = \frac{r_1 r_2 C}{r_1 + r_2}$ – постоянная времени цепи.

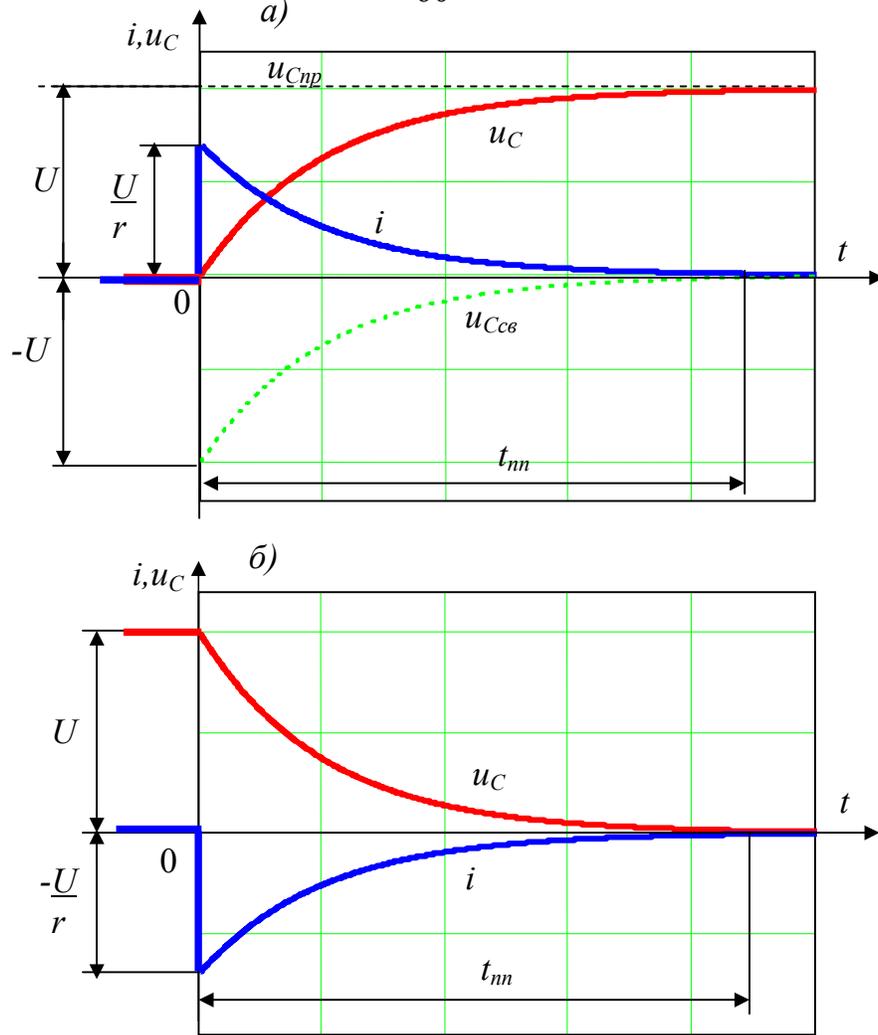


Рис. 10.2. Графики изменения $u_C(t)$ и $i(t)$:
 а – при заряде конденсатора;
 б – при разряде конденсатора

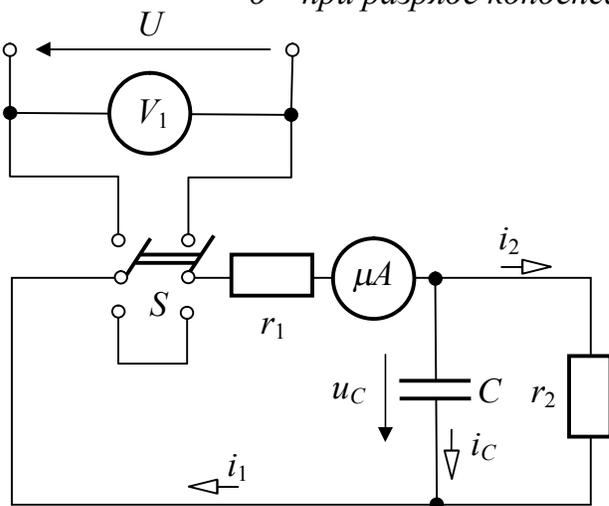


Рис. 10.3. Схема для исследования переходных процессов в цепи со смешанным соединением сопротивлений и емкости

Решением системы уравнений (10.3) являются выражения вида

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

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

$$i_C = D e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где A , B и D – постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий.

При $t=0_+$ выражения для токов имеют вид

$$i_1(0_+) = \frac{U}{r_1 + r_2} + A, \quad i_2(0_+) = \frac{U}{r_1 + r_2} + B, \quad i_C(0_+) = D.$$

До коммутации конденсатор незаряжен, поэтому $u_C(0_-) = 0$. Согласно второму закону коммутации $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$. Тогда значения токов в момент коммутации

$$i_1(0_+) = \frac{U - u_C(0_+)}{r_1} = \frac{U}{r_1}, \quad i_2(0_+) = \frac{u_C(0_+)}{r_2} = 0, \quad i_C(0_+) = i_1(0_+) - i_2(0_+) = \frac{U}{r_1}.$$

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

Окончательные выражения для токов с учетом постоянных интегрирования имеют вид

$$i_1(t) = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(1 + \frac{r_2}{r_1} e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad i_2(t) = \frac{U}{r_1 + r_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad i_C(t) = \frac{U}{r_1} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

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 $t_{mn} = (3 \div 5) \tau$.

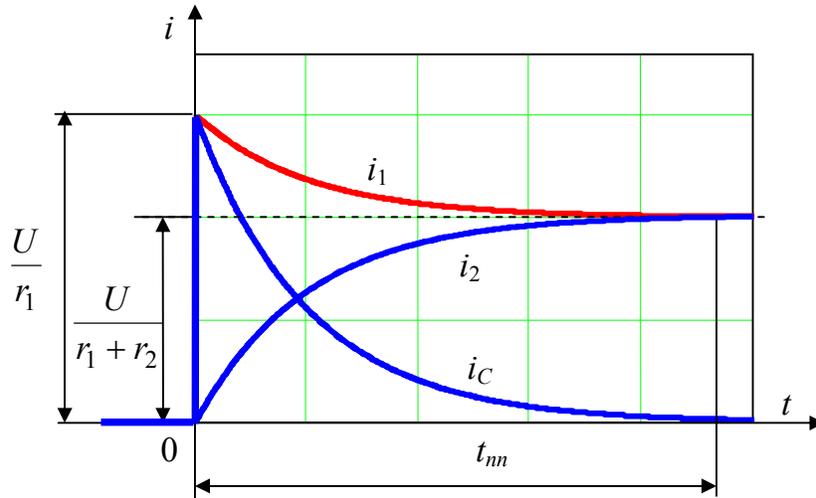


Рис. 10.4. Графики изменения токов в ветвях схемы рис. 10.3 при включении цепи на постоянное напряжение

Методические указания по выполнению работы

1. Собрать исследуемую схему рис. 10.1.

Для измерения напряжения на конденсаторе необходимо использовать вольтметр электростатической системы, имеющий очень большое внутреннее

сопротивление, а для измерения тока – микроамперметр магнитоэлектрической системы.

2. С помощью переключателя S включить цепь рис. 10.1 на постоянное напряжение и снимать отсчеты напряжения на конденсаторе и тока для моментов времени, указанных в табл. 10.1. Результаты измерений свести в табл. 10.1.

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

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	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
u_C, B														
$i, мкА$														

5. Исследовать разряд конденсатора (переключатель S в схеме рис. 10.1 находится в нижнем положении), снимая показания приборов до нулевых значений u_C и i . Результаты измерений свести в табл. 10.2.

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	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
u_C, B														
$i, мкА$														

7. Сделать вывод о выполнении второго закона коммутации при заряде и разряде конденсатора.

8. Собрать схему рис. 10.3 и записать ее параметры в табл. 10.3.

Таблица 10.3 Параметры схемы рис. 10.3

U, B	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$C, мкФ$

9. Включить цепь рис. 10.3 на постоянное напряжение и через каждые 10 с измерять ток той ветви, в которой находится микроамперметр. При последующих включениях цепи, изменив место включения микроамперметра, измерить токи остальных ветвей (перед каждым включением цепи разрядить конденсатор с помощью проводника при обязательном отключении цепи от источника питания).

Результаты измерений свести в табл. 10.4.

Таблица 10.4 Результаты измерения токов

t, c	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$i_1,$ $мкА$													
$i_2,$ $мкА$													
$i_C,$ $мкА$													

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

11. 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

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

12. Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными.

Вопросы для самопроверки

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

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

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

4. Какова практическая и теоретическая продолжительность переходных процессов?

5. По каким признакам судят об окончании переходного процесса?

6. Как определяются принужденные составляющие токов в ветвях схемы рис. 10.3, а также значения токов в момент коммутации?

7. Объясните, как определяется постоянная времени цепи r, C по экспериментальной кривой $u_C(t)$.

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

9. Как составляется характеристическое уравнение?

10. Возможно ли появление положительных корней характеристического уравнения? Ответ обоснуйте с физической точки зрения.

11. Что такое «независимые начальные условия» и как они определяются?

12. Возникают ли переходные процессы в цепях, содержащих только резистивные элементы?

Лабораторная работа 11

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

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

Основные теоретические положения

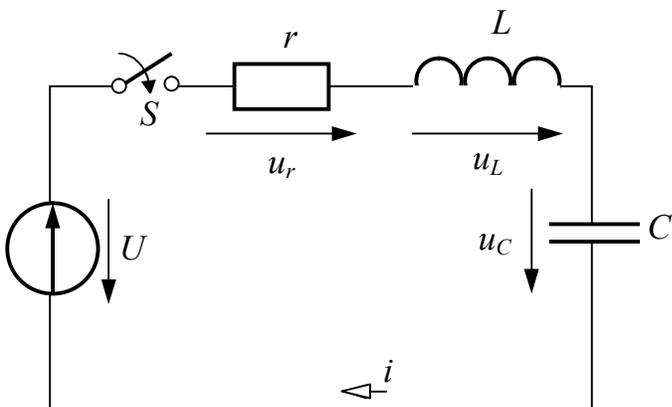


Рис. 11.1. Схема включения цепи r, L, C на постоянное напряжение

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.

Уравнение состояния цепи имеет вид:

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

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

С учетом того, что $i = C \frac{du_C}{dt}$, имеем

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

Для (11.1) характеристическое уравнение имеет вид:

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

а его корни:

$$p_1 = -\frac{r}{2L} + \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}, \quad p_2 = -\frac{r}{2L} - \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Характер переходного процесса зависит от знака подкоренного выражения, т.е. от соотношения 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 аperiodическим.

В этом случае получим

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

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

При аperiodическом 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.

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

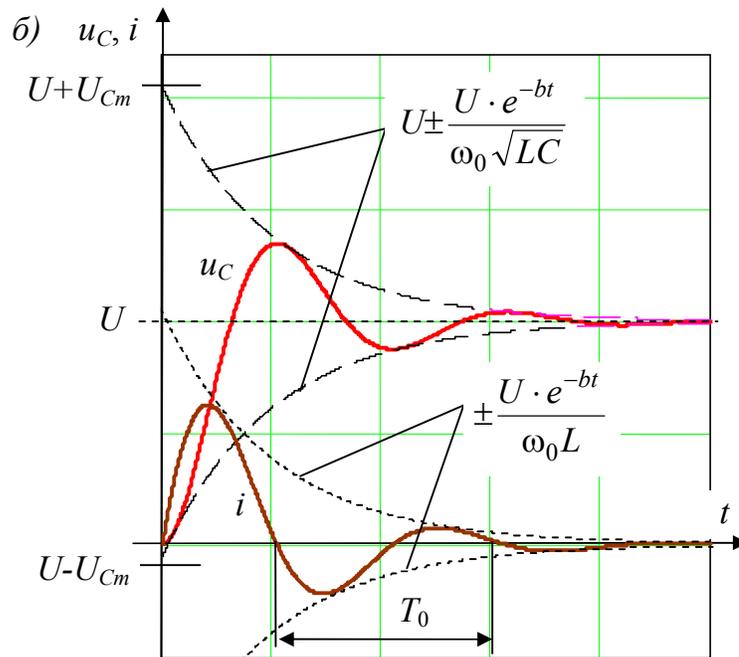
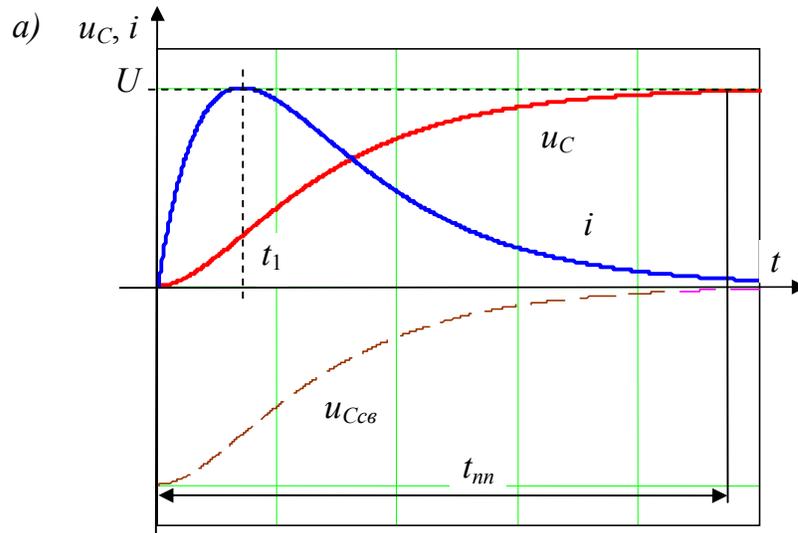


Рис. 11.2. Графики изменения $u_C(t)$ и $i(t)$

Если корни характеристического уравнения комплексные, то они 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 согласно выражениям

$$u_C(t) = U - \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (11.2)$$

$$i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} \cdot e^{-bt} \cdot \sin \omega_0 t, \quad (11.3)$$

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

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

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

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

Из уравнений (11.2) и (11.3) следует, что наибольшее значение напряжения на конденсаторе будет близко к $2U$, а наибольший ток стремится к значению $\frac{U}{\omega_0 L}$. Продолжительность переходного процесса $t_{mn} = (3 \div 5) \tau$, где $\tau = \frac{1}{b}$ – постоянная времени цепи.

На рис. 11.3 изображена схема экспериментальной установки, с помощью которой исследуются 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 ($T = 20 \text{ мс}$). 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 S) или напряжение на сопротивлении магазина r_m (в положении II переключателя S),

которое пропорционально току $i(t)$. Параметры цепи (L и C) подобраны так, что за время $\frac{T}{2}$ процесс заряда конденсатора практически завершается.

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

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

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

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

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

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

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

Как видно из приведенных уравнений, характер переходного процесса, его продолжительность, 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).

Методические указания по выполнению работы

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

Таблица 11.1 Параметры схемы для исследования переходных процессов

r_{κ} , Ом	L_{κ} , Гн	C , мкФ

2. Рассчитать критическое сопротивление цепи $r_{кр} = 2 \sqrt{\frac{L_{\kappa}}{C}}$.

3. Снять осциллограмму напряжения источника и по снятой экспериментальной кривой определить величину напряжения U .

4. Установить с помощью магазина сопротивлений сопротивление цепи $r = 2 \cdot r_{кр}$ ($r = r_{\kappa} + r_{м}$) и при включенном источнике снять осциллограмму напряжения на ёмкости $u_C(t)$ при заряде конденсатора.

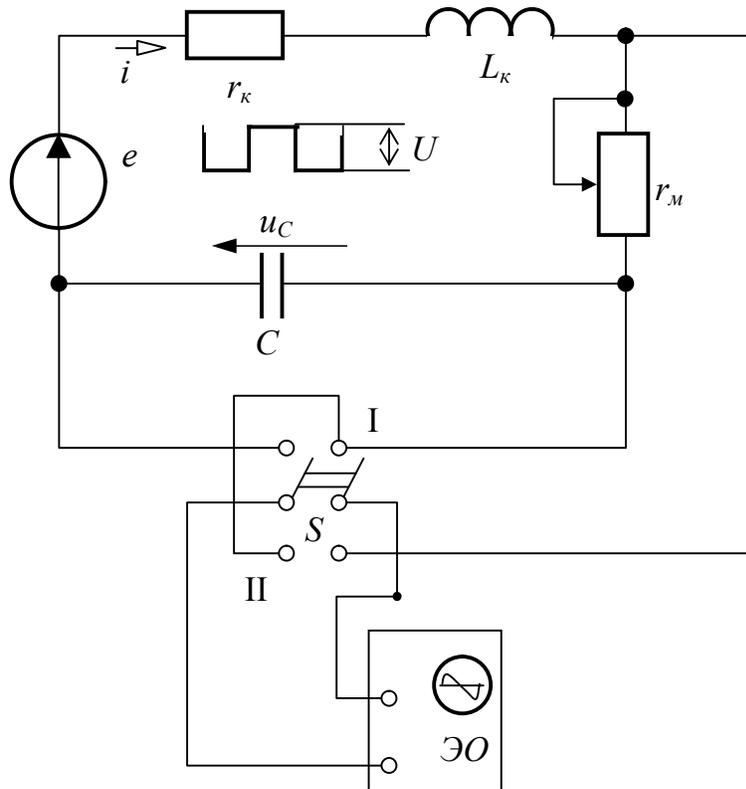


Рис. 11.3. Схема для исследования переходных процессов при включении цепи r, L, C на постоянное напряжение

5. При $r = 2 \cdot r_{кр}$ снять осциллограмму кривой напряжения на сопротивлении магазина r_m , которое пропорционально току $i(t)$, с последующим перерасчетом ее на $i(t)$ (при заряде конденсатора).

6. Установить сопротивление цепи $r = r_k + r_m = 0,2 \cdot r_{кр}$ и снять те же осциллограммы, что и в п.4 и 5.

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

8. Экспериментально определить критическое сопротивление цепи $r_{кр}$; для этого, плавно увеличивая с помощью магазина сопротивлений сопротивление цепи r , зафиксировать то значение сопротивления r_m , при котором колебательный процесс переходит в аperiodический, 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).

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

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

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

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.

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

11. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Каков физический и математический смысл критического сопротивления цепи?

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

3. Какого максимального значения может достигать напряжение на емкости по сравнению с напряжением источника в цепи r, L, C при периодическом характере переходного процесса?

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?

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

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

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

8. Как составляется характеристическое уравнение? Какими могут быть корни характеристического уравнения.

9. Возможен ли колебательный переходный процесс в цепях с одним накопителем энергии? Ответ обоснуйте.

10. От чего зависит количество корней характеристического уравнения.

Лабораторная работа 12

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы: исследование зависимости основных параметров катушки со сталью от длины воздушного зазора и напряжения сети.

Основные теоретические положения

Синусоидальное напряжение на зажимах катушки со стальным сердечником уравнивается ЭДС, индуктируемой основным магнитным потоком в сердечнике, а также падениями напряжения на активном сопротивлении обмотки и индуктивном, обусловленном потоком рассеяния, т.е.

$$\underline{U} = -\underline{E} + r \cdot \underline{I} + jx_s \cdot \underline{I},$$

где: r – активное сопротивление обмотки (сопротивление меди);

x_s – индуктивное сопротивление обмотки, обусловленное магнитным потоком рассеяния;

\underline{E} – ЭДС самоиндукции от основного магнитного потока:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m,$$

где: w – число витков катушки;

f – частота сети;

Φ_m – амплитуда основного магнитного потока.

Для определения значения ЭДС E используется дополнительная обмотка с числом витков w_∂ , расположенная на том же сердечнике, что и основная. По измеренному напряжению на зажимах этой обмотки U_∂ и известным числам витков w и w_∂ определяются ЭДС

$$E = \frac{w}{w_\partial} \cdot U_\partial$$

и амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \frac{U_\partial}{4,44 \cdot f \cdot w_\partial \cdot S_c},$$

где S_c – поперечное сечение сердечника катушки.

Схема замещения катушки со стальным сердечником показана на рис. 12.1.

Здесь: r_0 – активное сопротивление, характеризующее тепловые потери в стали;

x_0 – индуктивное сопротивление, обусловленное основным потоком.

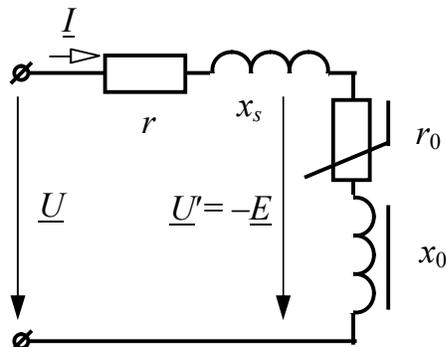


Рис. 12.1. Схема замещения катушки со стальным сердечником

Общее активное сопротивление катушки

$$R = r + r_0,$$

а общее реактивное сопротивление

$$x = x_s + x_0.$$

Тепловые потери в стали

$$P_c = P_2 + P_6,$$

где: P_2 – гистерезисные потери;

P_6 – потери от вихревых токов.

При частоте $f = 50$ Гц потери в стали обычно определяются по формуле

$$P_c = P_{1/50} \cdot B_m^2 \cdot G,$$

где: $P_{1/50}$ – удельные потери (в 1 кг стали) при

$f = 50$ Гц и $B_m = 1$ Тл (зависят от сорта стали и толщины листов шихтованного сердечника);

G – масса сердечника.

В катушке со стальным сердечником обычно падения напряжения на r и x_s по величине значительно меньше ЭДС E . Поэтому можно считать, что $U \approx E$. Следовательно, B_m пропорционально U , и при постоянной частоте потери в стали будут примерно пропорциональны квадрату напряжения сети, т.е. $P_c \sim U^2$. Параметры катушки определяют из выражений:

$$z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2}; \quad P_c = P - I^2 \cdot r; \quad r_0 = \frac{P_c}{I^2} = R - r; \quad z_0 = \frac{E}{I}; \quad x = \sqrt{z^2 - R^2};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}; \quad x_s = x - x_0.$$

Коэффициент мощности катушки $\cos \varphi = \frac{R}{z}$.

При изменении воздушного зазора сердечника l_g или напряжения сети U сопротивления r_0 и x_0 катушки не будут оставаться постоянными, а следовательно, будут изменяться полное сопротивление z , коэффициент мощности $\cos \varphi$, ток I и потребляемая активная мощность P .

Так, например, при увеличении длины воздушного зазора происходит возрастание тока катушки при неизменной величине напряжения сети. Это объясняется тем, что воздушный зазор из-за очень малой, по сравнению со сталью, магнитной проницаемости оказывает большое сопротивление магнитному потоку. В связи с этим, при увеличении длины зазора падает индуктивность L_0 (коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и током) и индуктивное сопротивление x_0 от основного магнитного потока. Это приводит к уменьшению полного сопротивления цепи z , в составе которого x_0 имеет наибольший удельный вес, и, как следствие, к возрастанию тока. Этот факт может быть объяснен и на основании закона полного тока

$$I_{pm} \cdot w = H_m \cdot l + H_{em} \cdot l_g,$$

если учесть, что амплитуда магнитной индукции B_m , а значит и напряженности магнитного поля в сердечнике H_m и в воздухе H_{em} поддерживаются подведенным напряжением и уменьшаются незначительно, а l_g возрастает.

Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником (рис. 12.2) строится следующим образом. В выбранном масштабе произвольно указывают положение вектора амплитуды основного магнитного потока $\underline{\Phi}_m$. ЭДС самоиндукции \underline{E} отстает по фазе на 90° от основного магнитного потока. Активная составляющая тока \underline{I}_a ($I_a = P_c/E$) совпадает по фазе с напряжением $\underline{U}' = -\underline{E}$, а реактивная составляющая тока \underline{I}_p ($I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}$) отстает от

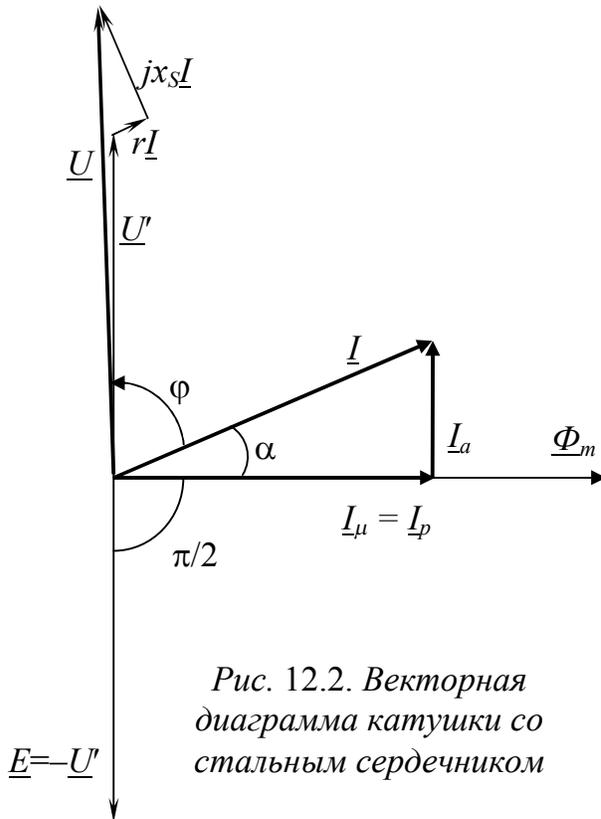


Рис. 12.2. Векторная диаграмма катушки со стальным сердечником

этого напряжения по фазе на 90° (совпадает с $\underline{\Phi}_m$).

После построения вектора тока $\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_p$ находят положение вектора напряжения сети \underline{U} в соответствии с формулой

$$\underline{U} = \underline{U}' + r \cdot \underline{I} + jx_S \cdot \underline{I}.$$

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с конструкцией катушки со стальным сердечником и записать в табл. 12.1 ее основные параметры: число витков основной w и дополнительной w_δ обмоток, поперечное сечение сердечника S_c , и активное сопротивление основной обмотки r .

Таблица 12.1 Основные характеристики катушки со сталью

w	w_δ	$S_c, \text{см}^2$	$r, \text{Ом}$

2. Собрать схему (рис. 12.3).

3. Провести исследования катушки со стальным сердечником при неизменной величине напряжения U на ее зажимах и изменяющемся воздушном зазоре l_g :

- Установить и затем поддерживать в процессе проведения экспериментов неизменным значение напряжения на зажимах катушки $U = 60-80 \text{ В}$.

- Изменяя воздушный зазор l_g в сердечнике катушки от 0 до 50 мм, провести 6-7 измерений тока I , мощности P и напряжения U_δ на дополнительной обмотке. При этом нужно следить за тем, чтобы ток в катушке не превысил 3 А.

- По данным измерений определить параметры катушки R , x , z , r_0 , x_0 , z_0 , x_s , а также P_c , E , $\cos\phi$ и B_m .

- Результаты измерений и вычислений записать в табл. 12.2.

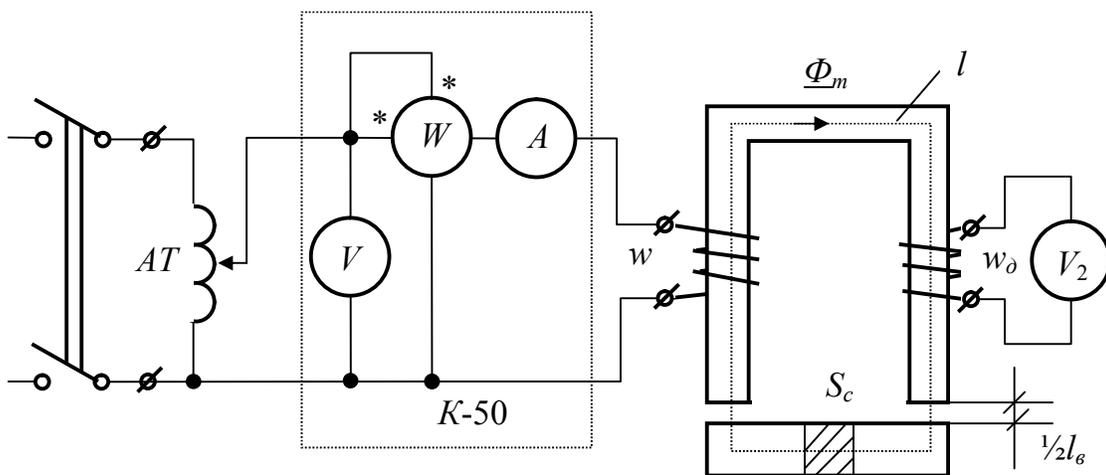


Рис. 12.3. Рабочая схема

Таблица 12.2 Исследование параметров катушки при изменении длины воздушного зазора

№, п/п	Измерено					Вычислено											
	U, B	I, A	$P, Вт$	$U_0, В$	$l_0, мм$	$E, В$	$B_m, Тл$	$z, Ом$	$R, Ом$	$x, Ом$	$P_c, Вт$	$z_0, Ом$	$r_0, Ом$	$x_0, Ом$	$x_s, Ом$	$\cos\varphi$	
1																	
2																	
и т.д.																	

- По данным табл. 12.2 в одной системе координат построить графики зависимостей: $I(l_0)$; $z_0(l_0)$; $B_m(l_0)$ при $U=const$.

4. Исследовать катушку со стальным сердечником при постоянном воздушном зазоре $l_0=0$ и изменяющемся напряжении U :

- Установить постоянный воздушный зазор в сердечнике $l_0=0$;
 - Изменяя с помощью автотрансформатора AT напряжение U от нуля до максимально возможного значения, произвести 5-6 измерений тока I , мощности P и напряжения U_0 .

- По данным измерений рассчитать величины, указанные в табл. 12.3.

- Результаты измерений и вычислений записать в табл. 12.3.

- По данным табл. 12.3 в одной системе координат построить кривые: $P_c(U)$; $I(U)$; $z_0(U)$; $B_m(U)$ при $l_0 = const$.

Таблица 12.3 Исследование параметров катушки при изменении величины напряжения источника

№, п/п	Измерено					Вычислено											
	U, B	I, A	$P, Вт$	$U_0, В$	$l_0, мм$	$E, В$	$B_m, Тл$	$z, Ом$	$R, Ом$	$x, Ом$	$P_c, Вт$	$z_0, Ом$	$r_0, Ом$	$x_0, Ом$	$x_s, Ом$	$\cos\varphi$	
1																	
2																	
и т.д.																	

- Последовательно с основной обмоткой включить реостат, на котором установить небольшое сопротивление (3-5 Ом). К зажимам этого реостата подключить вход электронного осциллографа. При напряжении U , равном 240 В, 160 В и 80 В с снять осциллограмму напряжения на реостате, которая повторяет кривую тока катушки. Указанные осциллограммы привести в отчете.

5. Для одного из отсчетов по данным табл. 12.3 построить векторную диаграмму (с соблюдением масштабов) и привести одну из схем замещения катушки со стальным сердечником.

Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение стальных сердечников трансформаторов и электрических машин?

2. Почему сердечники трансформаторов и электрических машин выполняются шихтованными из отдельных, изолированных друг от друга, тонких листов?

3. Начертите одну из схем замещения и векторную диаграмму катушки со стальным сердечником. Объясните физическую сущность каждого элемента схемы.

4. Как и почему изменяется ток катушки при увеличении воздушного зазора в сердечнике?

5. Объясните характер вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником.

6. Как и почему изменяется реактивное сопротивление катушки при увеличении питающего напряжения?

7. Укажите виды потерь в стали? Как зависят потери в стали от частоты? От подведенного напряжения?

Лабораторная работа 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ И КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: изучение основных свойств цепи переменного тока при последовательном соединении нелинейной индуктивности и емкости: явление феррорезонанса напряжений и стабилизации напряжения.

Основные теоретические положения

Свойства цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки со стальным сердечником и конденсатора (рис. 13.1), следует изучать на основании их вольтамперных характеристик.

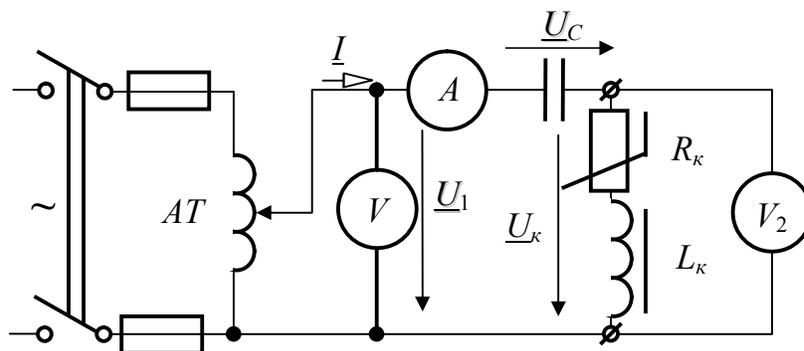


Рис. 13.1. Схема для исследования цепи, состоящей из последовательно включенных катушки со сталью и конденсатора

Для снятия вольтамперных характеристик катушки и конденсатора можно воспользоваться схемой (рис. 13.2).

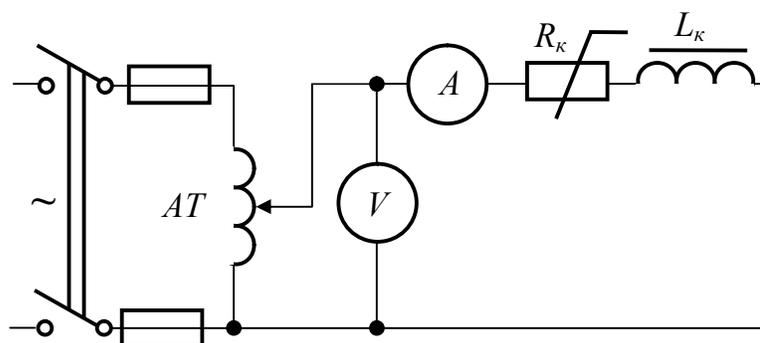


Рис. 13.2. Схема для снятия вольтамперной характеристики катушки

Вольтамперная характеристика катушки с насыщающимся стальным сердечником близка по форме к основной кривой намагничивания. Так как для цепи, состоящей из последовательно включенных катушки и конденсатора, напряжения на индуктивности U_L и на емкости U_C находятся в противофазе, то при построении вольтамперных характеристик значения U_L откладываются вверх относительно оси абсцисс (оси тока I), а значение $-U_C$ – вниз (рис. 13.3).

Напряжение на зажимах этой цепи (для эквивалентных синусоид)

$$\underline{U} = \underline{U}_a + \underline{U}_L + \underline{U}_C,$$

где: U_a и U_L – активное и индуктивное падения напряжений на катушке; U_C – падение напряжения на конденсаторе.

Напряжение на катушке

$$U_k = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Часто в катушках со стальными сердечниками активное сопротивление значительно меньше индуктивного, поэтому в таких случаях можно принять

$$U_k \approx U_L, \quad U \approx U_L - U_C.$$

Вольтамперная характеристика $U(I)$ цепи (рис. 13.3) представляет собой сложную кривую. При увеличении напряжения U от нуля до значения U_A ток будет плавно увеличиваться от нуля до I_A (рис. 13.3).

Как только напряжение U станет больше U_A , режим цепи переходит из точки "A" характеристики $U(I)$ в точку "D", чему соответствует скачок тока от значения I_A до значения I_D . При дальнейшем увеличении напряжения ток будет плавно увеличиваться по кривой DK.

Таким образом, в точке A происходит скачок тока, сопровождающийся "опрокидыванием" его фазы, так как до скачка $U_L > U_C$, а после скачка $U_L < U_C$.

Если теперь начать уменьшать напряжение U , то ток плавно будет уменьшаться до значения I_B (при этом напряжение $U = U_B$).

При дальнейшем, даже незначительном уменьшении напряжения U ток скачкообразно уменьшается до значения I_E . Вместе с обратным скачком тока происходит обратное изменение его фазы. При дальнейшем уменьшении напряжения ток плавно будет уменьшаться до нуля.

В точке "B" характеристики $U(I)$ индуктивное сопротивление катушки становится равным емкостному сопротивлению конденсатора $x_L = x_C$, при этом $U_L \approx U_C$, $U_B = I \cdot R$, $\varphi \approx 0$.

Точка "B" на вольтамперной характеристике $U(I)$ соответствует феррорезонансному режиму (феррорезонанс напряжений).

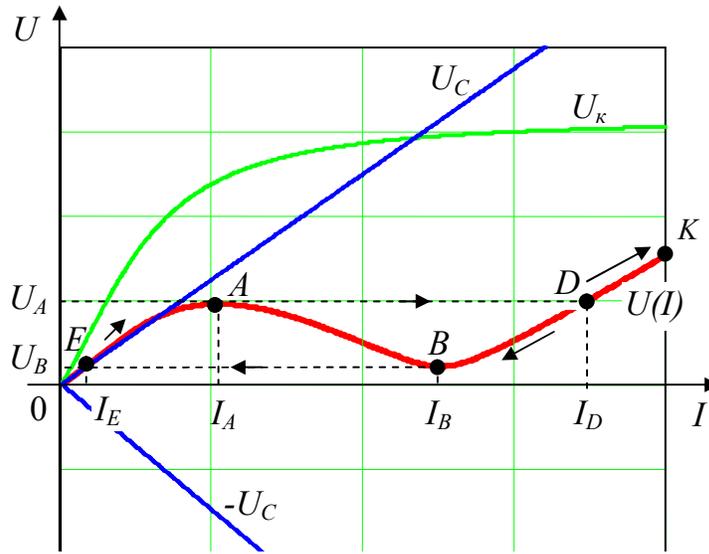


Рис. 13.3. Вольтамперные характеристики для цепи, состоящей из последовательно включенных катушки со сталью и конденсатора

При питании цепи (рис. 13.1) от автотрансформатора (от источника ЭДС) участок ВАХ AB (рис. 13.3) является неустойчивым и не может быть получен экспериментально.

Нелинейные свойства такой цепи (рис. 13.1) позволяют использовать ее как простейший стабилизатор напряжения. Приемник энергии при этом подключается параллельно катушке с насыщающимся стальным сердечником.

На рис. 13.4 пояснен принцип действия стабилизатора напряжения в режиме холостого хода

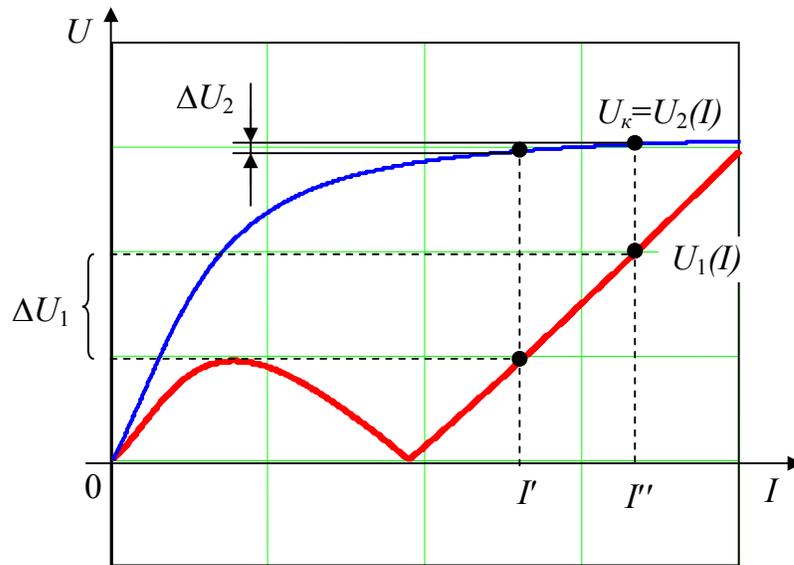


Рис. 13.4. Вольтамперные характеристики стабилизатора напряжения в режиме холостого хода

режиме холостого хода: изменение напряжения на приемнике ΔU_2 оказывается значительно меньшим изменения входного напряжения ΔU_1 . Однако следует заметить, что при увеличении нагрузки стабилизатора его стабилизирующие свойства ухудшаются. Стабилизация выходного напряжения имеет место после "скачка" тока, когда ток достигает значительной величины, что является недостатком такого стабилизатора.

Методические указания по выполнению работы

1. Исследовать феррорезонанс напряжений.

- Собрать схему (рис. 13.2).

- Изменяя напряжение U с помощью автотрансформатора АТ, снять вольтамперную характеристику катушки со стальным сердечником (рекомендуется характеристику снимать при токах 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 А).

- Результаты измерений внести в табл. 13.1.

- Заменив в схеме рис. 13.2 катушку конденсатором, снять вольтамперную характеристику конденсатора. Для этого достаточно взять 2-3 отсчета напряжения и тока, так как конденсатор является линейным элементом.

- Результаты измерений записать в табл. 13.1.

- По данным табл. 13.1 в общей системе координат построить вольтамперные характеристики катушки $U_k(I)$, конденсатора $U_C(I)$ и последовательного соединения катушки со стальным сердечником и конденсатора $U(I)_{расч}$, которая получается в результате алгебраического суммирования характеристик $U_k(I)$ и $U_C(I)$. U_k принять равным U_L .

- Собрать схему (рис. 13.1).

- Снять ВАХ последовательного соединения катушки и конденсатора $U(I)_{экл}$. Делать это рекомендуется в таком порядке: начиная с нуля, с помощью автотрансформатора АТ повысить напряжение U и определить, при каком напряжении (U_A) происходит прямой скачок тока. При этом напряжении определить токи I_A и I_D (рис. 13.3). Затем, снижая напряжение, определить, при каком U происходит обратный скачок тока (U_B), и при этом напряжении определить токи I_B и I_E . Кроме того, снять еще по две точки на участках ВАХ EA , DK и BD .

- Результаты измерений внести в табл. 13.1.

Таблица 13.1 Вольтамперные характеристики цепи и составляющих ее элементов

Катушка		Конденсатор		Последовательное соединение катушки и конденсатора	
$U_k, В$	$I, А$	$U_C, В$	$I, А$	$U_{экл}, В$	$I_{экл}, А$

- По данным измерений построить экспериментальную характеристику $U(I)_{\text{экс}}$ и сравнить ее с расчетной характеристикой $U(I)_{\text{расч}}$, для чего указанные характеристики должны быть построены в одной и той же системе координат. Неустойчивый участок экспериментальной характеристики изобразить пунктирной линией.

- На характеристиках цепи $U(I)$ четко обозначить точку, характеризующую феррорезонансный режим.

- Объяснить причины некоторого несовпадения характеристик $U(I)_{\text{расч}}$ и $U(I)_{\text{экс}}$.

2. Выполнить исследование стабилизатора напряжения.

- Параллельно катушке (рис. 13.1) подключить вольтметр электромагнитной системы.

- Изменяя входное напряжение U_1 , снять зависимость между U_1 и U_2 . При этом следить, чтобы ток в цепи не превышал 3 А.

- Результаты измерений записать в табл. 13.2.

Таблица 13.2 Исследование стабилизатора напряжения

U_1, B						
U_2, B						

- Построить графическую зависимость $U_2 (U_1)$.

- Сделать выводы о стабилизирующих свойствах схемы (рис. 13.2).

Вопросы для самопроверки

1. Чем объясняется нелинейность характеристики $U_k(I)$?

2. Каково принципиальное отличие способа достижения феррорезонанса напряжений от способов достижения резонанса в линейной цепи r, L, C ?

3. Какой участок ВАХ последовательного соединения катушки и конденсатора является неустойчивым и как его можно получить экспериментально?

4. Как изменяется угол сдвига фаз при прямом, а также при обратном скачках тока?

5. Каковы причины отличия теоретической ВАХ последовательного соединения катушки со сталью и конденсатора от экспериментальной?

6. Начиная с какой величины напряжения U_1 , имеет место стабилизация напряжения на нагрузке в случае простейшего стабилизатора напряжения?

Лабораторная работа 14

ИССЛЕДОВАНИЕ УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Цель работы: исследование свойств нелинейных трехфазных цепей на примере ферромагнитного утроителя частоты.

Основные теоретические положения

Если к зажимам катушки со стальным сердечником приложить синусоидальное напряжение достаточной величины, то вследствие нелинейного характера ее сопротивления ток, протекающий через обмотку катушки, принимает несинусоидальную форму. В составе тока появляются высшие нечетные гармоники, из которых наиболее ярко выделяется третья гармоника. Кривая тока имеет, в сравнении с синусоидой, заостренную форму, что свидетельствует о совпадении по времени максимумов первой и третьей гармоник. Магнитный поток в сердечнике имеет синусоидальную форму вследствие того, что наводимая им ЭДС самоиндукции в обмотке катушки должна уравновесить приложенное к катушке синусоидальное напряжение сети.

Если же катушка со стальным сердечником питается от источника синусоидального тока, то поток в сердечнике принимает несинусоидальную, уплощенную форму из-за насыщения сердечника, поэтому наводимая магнитным потоком ЭДС, а значит, и напряжение на зажимах катушки в этом случае также имеют несинусоидальную форму.

Это явление положено в основу работы электромагнитного утроителя частоты. Он представляет собой три одинаковых насыщенных однофазных трансформатора, первичные обмотки которых соединены в звезду. Выходное напряжение снимается со вторичных обмоток, соединенных в открытый (разомкнутый) треугольник (рис. 14.1). При таком способе соединения вторичных обмоток сумма напряжений всех гармоник, не кратных трем, равна нулю, а третья гармоника образует нулевую последовательность, и поэтому напряжение на вторичных зажимах u_{az} равно сумме напряжений третьей гармоники каждой фазы.

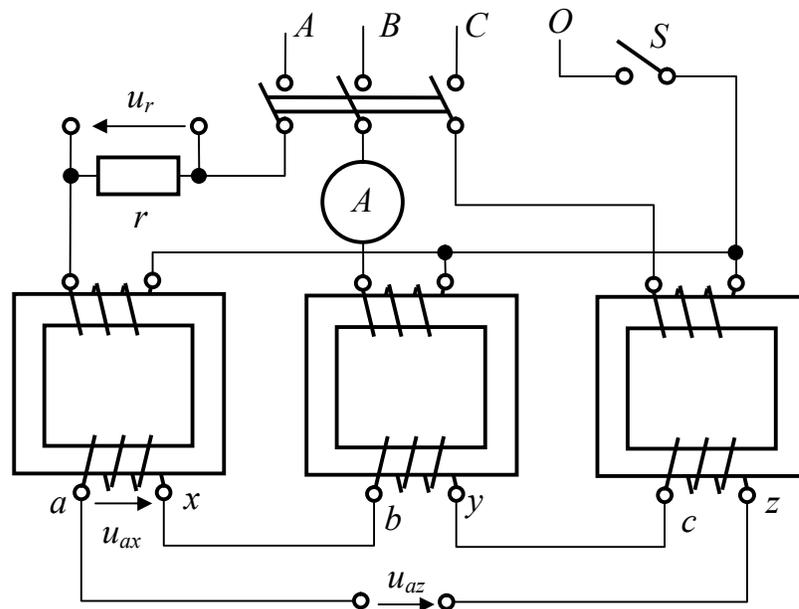


Рис. 14.1. Схема ферромагнитного утроителя частоты

При наличии нулевого провода (S на рис. 14.1 замкнут) к каждой первичной обмотке приложено синусоидальное фазное напряжение сети (рис. 14.2,а – u_{AX}). При этом магнитные потоки в сердечниках будут синусоидальными (рис. 14.2,а – Φ), а токи, протекающие через обмотки, – несинусоидальными

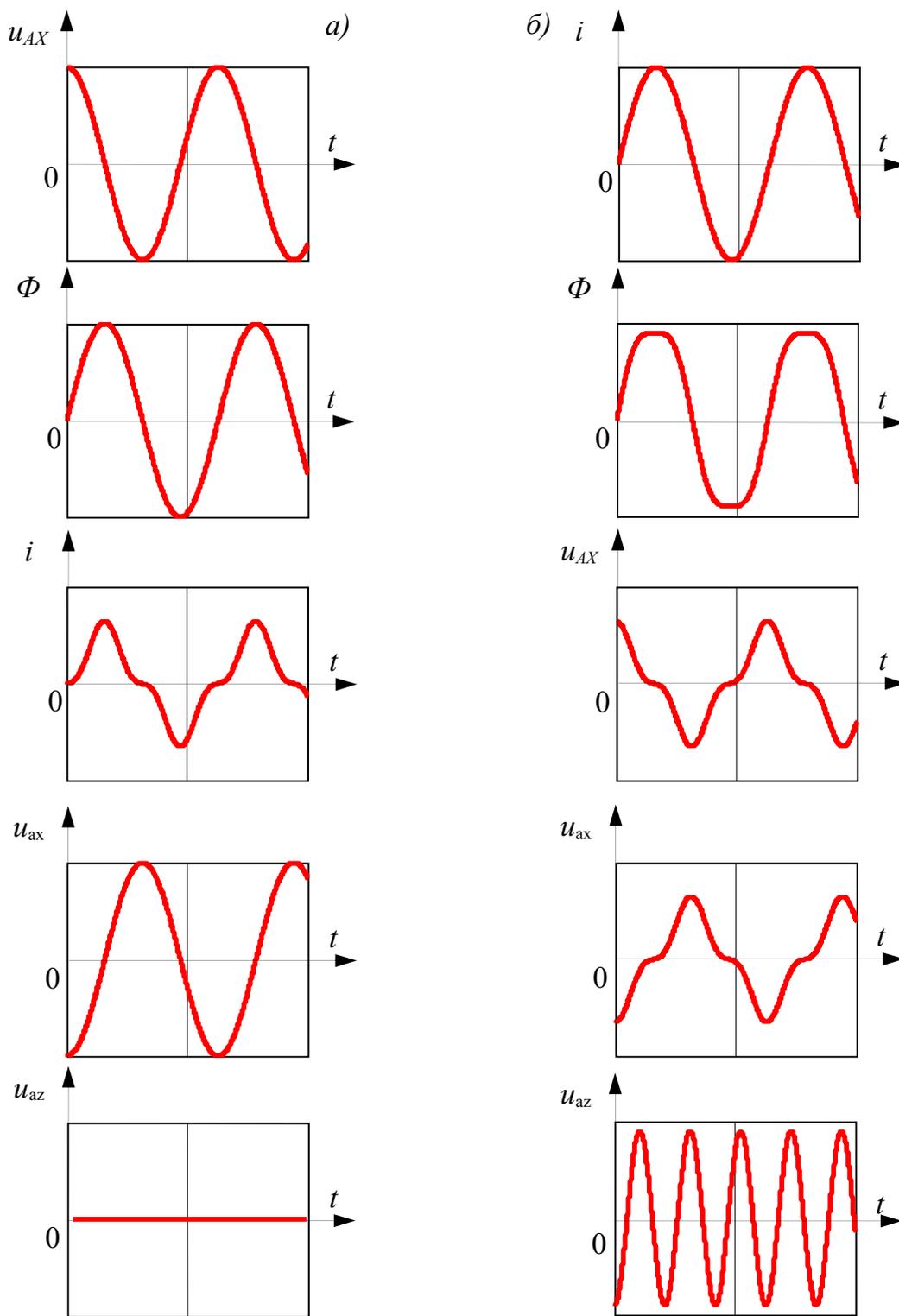


Рис. 14.1. Осциллограммы, иллюстрирующие работу устройства: а) при наличии нулевого провода; б) при отсутствии нулевого провода

(рис. 14.2,а – i). ЭДС, наводимые синусоидальными магнитными потоками во вторичных обмотках, (напряжения u_{ax} на рис. 14.2,а) будут синусоидами, сдвинутыми друг по отношению к другу на 120° . В сумме они дают ноль (рис. 14.2,а – u_{az}). По нулевому проводу замыкаются токи третьей и кратных трем гармоник каждой фазы.

Если же отключить нулевой провод, то фазные токи станут практически синусоидальными (рис. 14.2,б – i), так как третья гармоника токов образует систему нулевой последовательности и для неё отсутствует путь замыкания. Следовательно, магнитные потоки всех катушек примут несинусоидальную форму (рис. 14.2,б – Φ), поэтому и фазные ЭДС катушек (рис. 14.2,б – u_{ax}) будут несинусоидальными и содержать ярко выраженную третью гармонику.

При этом и напряжения на первичных обмотках, компенсируемые фазными ЭДС, также будут несинусоидальными (рис. 14.2,б – u_{AX}). Выходное напряжение (рис. 14.2,б – u_{az}), равное сумме напряжений третьей гармоники каждой фазы, окажется синусоидой с утроенной частотой.

Если звезда, составленная из нелинейных элементов, питается от трехфазного источника с выведенной нулевой точкой, то утроение частоты можно получить, не прибегая к трансформации напряжений. При синусоидальных ЭДС источника питания с частотой f между нейтральными точками источника питания и трансформаторов возникает напряжение, изменяющееся с частотой $3f$, амплитуда которого тем больше, чем сильнее насыщение сердечника.

Методические указания по выполнению работы

1. Собрать схему рис. 14.1.
2. Снять осциллограммы кривой фазного тока первичной цепи утроителя, подключив вход осциллографа параллельно зажимам реостата r :
 - а) при включенном нулевом проводе;
 - б) при выключенном нулевом проводе.
 Дать объяснение различию форм полученных кривых.
3. При одном и том же масштабе по напряжению снять осциллограммы кривых фазного напряжения $u_{\phi} = u_{ax}$, подключив вход осциллографа к зажимам ax :
 - а) при выключенном нулевом проводе;
 - б) при включенном нулевом проводе.
4. При выключенном нулевом проводе снять осциллограмму кривой напряжения u_{az} , подключив вход осциллографа к зажимам az . Объяснить форму полученной кривой.
5. При том же масштабе по напряжению, что и в п.4, снять осциллограмму кривой напряжения u_{az} при включенном нулевом проводе.
 Дать краткую характеристику формы полученной кривой.

Указание: на каждой из осциллограмм должны быть приведены масштабы по напряжению m_U и по времени m_t , определяемые положением переключателей осциллографа.

6. По осциллограмме (п.3а) графо-аналитическим методом рассчитать амплитуду третьей гармоники напряжения U_{axm} и сравнить ее с амплитудой напряжения U_{azm} (осциллограмма п.4).

Вопросы для самопроверки

1. На чём основан принцип действия ферромагнитного утроителя частоты?
2. Какие гармоники содержат токи первичных обмоток исследуемой схемы утроителя частоты:
 - а) при включенном нулевом проводе;
 - б) при выключенном нулевом проводе.
3. Какие гармоники тока замыкаются по нулевому проводу рассматриваемого утроителя?
4. Какие гармоники содержатся в фазных напряжениях вторичных обмоток утроителя?
5. Присутствует ли на выходе утроителя напряжение первой гармоники? Если нет, то почему?
6. Каково назначение стальных сердечников в утроителе частоты?

Лабораторная работа 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКОВ

Цель работы: экспериментальное определение основных соотношений напряжений, токов и мощностей в схемах неуправляемых выпрямителей переменного тока (в том числе с подключением сглаживающего конденсатора СК) и анализ временных зависимостей напряжений на различных участках цепи.

Основные теоретические положения

Выпрямление переменного тока производится с помощью диодов (электрических вентилях), обладающих ярко выраженной несимметричной ВАХ вследствие односторонней проводимости. В большинстве случаев диод можно считать идеальным, т.е. обладающим нулевым сопротивлением в проводящем направлении и бесконечно большим сопротивлением в непроводящем состоянии.

Простейшей схемой выпрямления является однополупериодная (рис. 15.1). В этой схеме напряжение на нагрузке содержит постоянную составляющую:

$$U_{Hcp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{1m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_{1m}}{\pi} \approx 0,45U_1 = k_{cx}U_1,$$

где k_{cx} – коэффициент схемы выпрямления.

Значительно более близкими к постоянному являются выпрямленные напряжения в мостовых схемах – однофазной (рис. 15.2) и трехфазной (рис. 15.3), для которых, соответственно:

$$U_{Hcp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{1m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{\pi} U_{1m} \approx 0,9 U_1 = k_{cx} U_1;$$

$$U_{Hcp} = \frac{6}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} U_{1m} \cdot \sin \omega t \cdot dt \approx 1,35 U_{1\phi} \approx 2,35 U_{\phi} = k_{cx} U_{\phi},$$

где $U_{1\phi}, U_{\phi}$ – линейное и фазное напряжения источника.

Для выпрямителей коэффициент мощности $\cos \varphi$ определяется по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI},$$

где: P, S – активная и полная мощности источника.

Постоянная составляющая мощности нагрузки:

$$P_H = U_{Hcp} \cdot I_{Hcp}.$$

Методические указания по выполнению работы

1. Исследовать цепь однофазного однополупериодного выпрямления переменного тока, для чего:

- Собрать схему (рис. 15.1). Для измерения напряжения U , тока I использовать приборы электромагнитной системы, а для напряжения U_{Hcp} и тока I_{Hcp} нагрузки – приборы магнитоэлектрической системы, реагирующие на средние значения величин. В качестве нагрузки использовать реостат с сопротивлением 100 Ом, а в качестве диода – один из вентилях трехфазной мостовой схемы.

- Включить цепь на линейное напряжение трёхфазного источника и записать в табл. 15.1 показания измерительных приборов.

Таблица 15.1 Результаты исследования схемы однофазного однополупериодного выпрямления переменного тока

Измерено						Вычислено			
$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_{Hcp},$ B	$I_{Hcp},$ A	$U_{Dm},$ B	k_{cx}	$\frac{U_{Dm}}{U_{Hcp}}$	$\frac{I}{I_{Hcp}}$	$\cos \varphi$

- В одном масштабе снять осциллограммы трех напряжений $u(t)$, $u_D(t)$ и $u_H(t)$. Из осциллограммы $u_D(t)$ определить величину максимального обратного напряжения на диоде U_{Dm} и занести в табл. 15.1.

- Вычислить отношения напряжений и токов $\frac{U_{Dm}}{U_{Hcp}}$, $\frac{I}{I_{Hcp}}$, а также $k_{сх}$,

$\cos\varphi$.

Результаты вычислений записать в табл. 15.1.

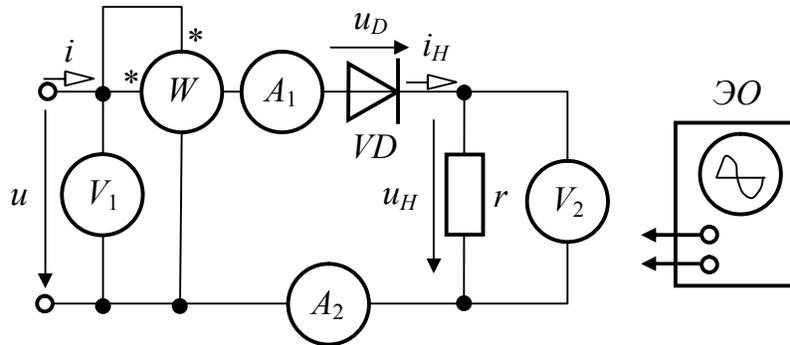


Рис. 15.1. Схема однофазного однополупериодного выпрямления

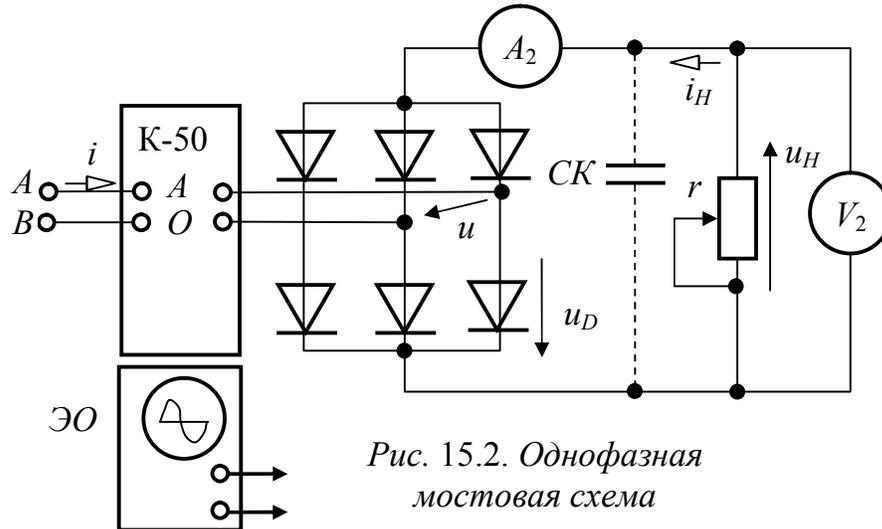


Рис. 15.2. Однофазная мостовая схема

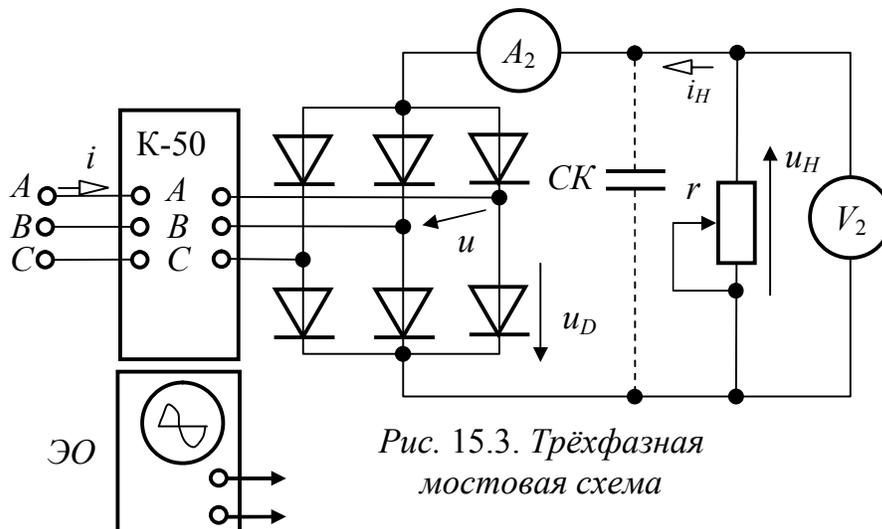


Рис. 15.3. Трёхфазная мостовая схема

2. Исследовать цепь однофазного мостового выпрямления переменного тока.

- Собрать схему (рис. 15.2) (комплект К-50 включить по однофазной схеме измерения). Приборы A_2 и V_2 должны быть магнитоэлектрической системы. В качестве нагрузки используется реостат с сопротивлением 100 Ом.

- Включить источник и записать в табл. 15.2 показания измерительных приборов.

- В одном масштабе снять осциллограммы трех напряжений $u(t)$, $u_D(t)$ и $u_H(t)$. Из осциллограммы $u_D(t)$ определить величину максимального обратного напряжения на диоде U_{Dm} и занести в табл. 15.2.

- Вычислить коэффициент схемы k_{cx} , коэффициент мощности выпрямителя $\cos \varphi$ и отношения напряжений и токов в схеме. Результаты вычислений занести в табл. 15.2.

Таблица 15.2 Результаты исследования мостовых схем выпрямления переменного тока

Схема выпрямления	Измерено						Вычислено			
	$\frac{U}{B}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{P}{Вт}$	$\frac{U_{Hcp}}{B}$	$\frac{I_{Hcp}}{A}$	$\frac{U_{Dm}}{B}$	k_{cx}	$\frac{U_{Dm}}{U_{Hcp}}$	$\frac{I}{I_{Hcp}}$	$\cos \varphi$
Однофазная мостовая без СК										
Однофазная мостовая с СК										
Трехфазная мостовая без СК										
Трехфазная мостовая с СК										

3. Исследовать трехфазную мостовую схему выпрямления переменного тока.

- Собрать схему рис. 15.3 (комплект К-50 включить по трехфазной схеме).

- Выполнить те же исследования, что и в п.2 и результаты занести в табл. 15.2. При этом следует иметь в виду, что для трехфазной схемы выпрямления

$$\cos \varphi = \frac{P_{\phi}}{U_{\phi} I_{\phi}}$$

Здесь P_{ϕ} – активная мощность одной фазы источника, U_{ϕ} – фазное напряжение источника. Следует также учесть, что К-50 измеряет фазное напряжение источника.

Примечание: п. 2 и 3 выполнить при отсутствии и наличии СК.

Вопросы для самопроверки

1. Какие системы приборов используются для измерения действующих, а какие – средних величин напряжений и токов?

2. Изобразите ВАХ реального и идеального вентилялей.
3. Как рассчитать выпрямленное напряжение в схемах однополупериодного, однофазного мостового и трехфазного мостового выпрямления?
4. Нарисуйте графики выпрямленного напряжения для схем однополупериодного, однофазного мостового и трехфазного мостового выпрямления.

Лабораторная работа 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы: определение коэффициентов основных уравнений пассивного четырехполюсника по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания, расчет параметров схем его замещения и характеристических параметров, экспериментальная проверка правильности определения коэффициентов четырехполюсника при активной и ёмкостной нагрузке.

Основные теоретические положения

Четырехполюсником называется часть электрической цепи, имеющая два входных (1-1') и два выходных (2-2') зажима (рис. 16.1).

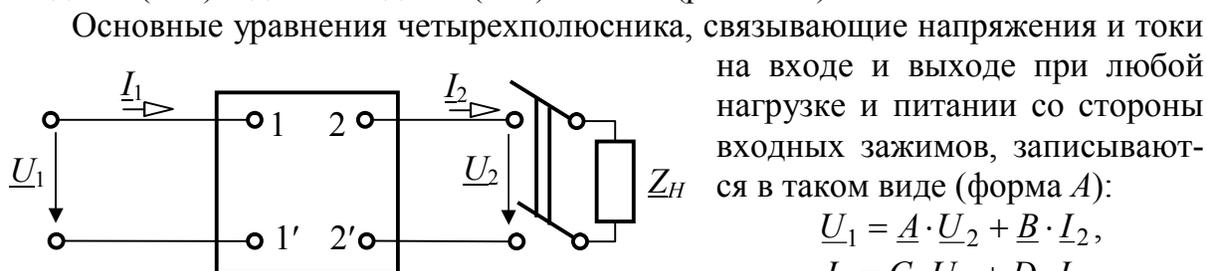


Рис. 16.1. Схема четырёхполюсника

на входе и выходе при любой нагрузке и питании со стороны входных зажимов, записываются в таком виде (форма A):

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2,$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2.$$

Здесь коэффициенты \underline{A} , \underline{B} ,

\underline{C} и \underline{D} являются в общем случае комплексными числами и связаны между собой соотношением:

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1.$$

Коэффициенты четырехполюсника \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} можно вычислить по его входным сопротивлениям, определяемым в режимах холостого хода и короткого замыкания. Вычисление коэффициентов производится по формулам:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{2к} (\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1к})}};$$

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2к}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x}}; \quad \underline{D} = \underline{A} \frac{\underline{Z}_{2к}}{\underline{Z}_{1к}},$$

где $\underline{Z}_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}} = r_{1x} + jx_{1x} = Z_{1x} \cdot e^{j\varphi_{1x}}$ – комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме холостого хода при питании его со стороны входных зажимов (рис. 16.1),

$\underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = r_{1k} + jx_{1k} = Z_{1k} \cdot e^{j\varphi_{1k}}$ – комплекс входного сопротивления в режиме короткого замыкания четырехполюсника при питании его со стороны входных зажимов,

$\underline{Z}_{2k} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} = r_{2k} + jx_{2k} = Z_{2k} \cdot e^{j\varphi_{2k}}$ – комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме короткого замыкания при питании его со стороны выходных зажимов.

В каждом опыте (табл. 16.1) комплекс сопротивления определяется по формулам:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad r = \frac{P}{I^2}; \quad x = \sqrt{Z^2 - r^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{x}{r}.$$

Для определения знака угла сдвига фаз φ в схеме рис. 16.3 предусмотрен фазометр.

Таким образом, по данным опыта холостого хода и двум опытам короткого замыкания могут быть найдены комплексы входных сопротивлений четырехполюсника \underline{Z}_{1x} , \underline{Z}_{1k} и \underline{Z}_{2k} , а по ним вычислены коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} .

Так как пассивный четырехполюсник характеризуется тремя независимыми коэффициентами, его можно заменить эквивалентной Т-образной или П-образной схемой (рис. 16.2).

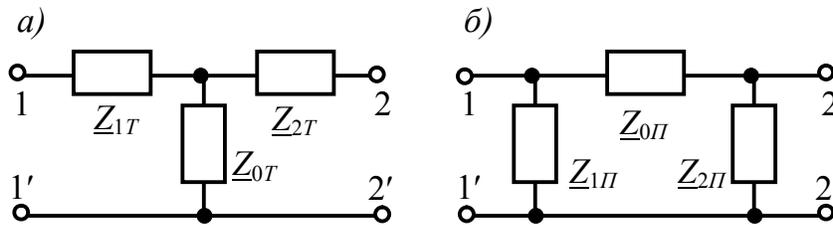


Рис. 16.2. Эквивалентные схемы замещения четырёхполюсников: а) Т-образная, б) П-образная

Связь между параметрами этих схем и коэффициентами четырёхполюсника выражается соотношениями:

для Т-образной схемы

$$\underline{Z}_{1T} = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{2T} = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{0T} = \frac{1}{\underline{C}};$$

для П-образной схемы

$$\underline{Z}_{1\Pi} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}; \quad \underline{Z}_{2\Pi} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}; \quad \underline{Z}_{0\Pi} = \underline{B}.$$

Характеристические параметры четырехполюсника (\underline{Z}_{1C} , \underline{Z}_{2C} , $\underline{\Gamma}$) могут быть рассчитаны по его коэффициентам

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{A \cdot B}{C \cdot D}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{D \cdot B}{C \cdot A}}; \quad th\underline{\Gamma} = \sqrt{\frac{B \cdot C}{A \cdot D}};$$

$$e^{2\underline{\Gamma}} = \frac{1 + th\underline{\Gamma}}{1 - th\underline{\Gamma}} = Me^{j\delta}; \quad a = \frac{1}{2} \ln M; \quad b = \delta \pm 2\pi;$$

$$\underline{\Gamma} = a + jb$$

или по опытам холостого хода и короткого замыкания

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\underline{Z}_{1x} \underline{Z}_{1k}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\underline{Z}_{2x} \underline{Z}_{2k}}; \quad th\underline{\Gamma} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{1x}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_{2x}}}.$$

Исследуемый четырехполюсник выполнен в виде сложной цепи, состоящей из катушек индуктивности, резисторов и емкостей (схему см. на панели рабочего стола).

Методические указания по выполнению работы

1. Определить коэффициенты четырехполюсника.

- Собрать схему рис. 16.3 и выполнить опыт холостого хода четырехполюсника (табл. 16.1).

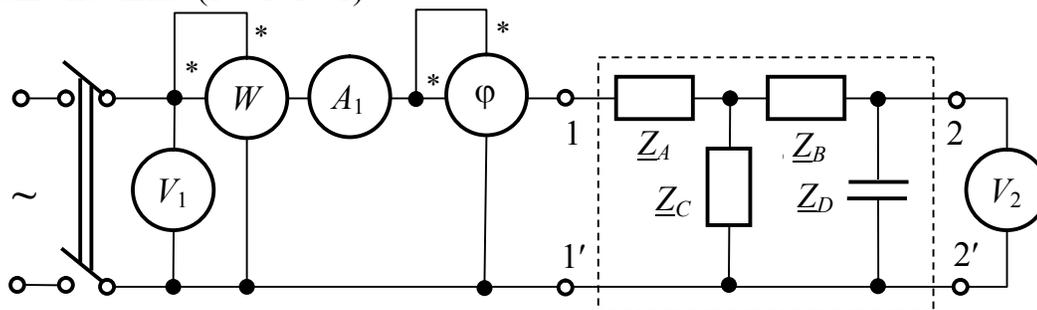


Рис. 16.3. Схема четырёхполюсника в режиме холостого хода при питании его со стороны входных зажимов

- В схеме рис. 16.3 вольтметр V_2 заменить амперметром A_2 , и выполнить опыт короткого замыкания (табл. 16.1).

- Выполнить опыт обратного короткого замыкания, для чего в схеме опыта короткого замыкания зажимы 1-1' и 2-2' поменять местами (табл. 16.1).

- В предыдущей схеме амперметр A_2 заменить на вольтметр V_2 и выполнить опыт обратного холостого хода.

- По опытным данным определить сопротивления четырехполюсника при холостом ходе и коротком замыкании.

- Результаты измерений и вычислений занести в табл. 16.1.

- Убедиться в справедливости соотношения

$$\frac{\underline{Z}_{1x}}{\underline{Z}_{1k}} = \frac{\underline{Z}_{2x}}{\underline{Z}_{2k}}.$$

- По найденным значениям комплексных сопротивлений \underline{Z}_{1x} , $\underline{Z}_{1к}$ и $\underline{Z}_{2к}$ вычислить коэффициенты четырехполюсника \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} и по ним определить параметры Т- и П-образной схем замещения.

- Рассчитать характеристические параметры четырехполюсника \underline{Z}_{1C} , \underline{Z}_{2C} и $\underline{\Gamma}$.

Таблица 16.1 Исследование четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого замыкания

Питание подведено к зажимам	Режим	Измерено				Вычислено				
		B	A	Bm	B,A	Om	Om	Om	Om	град. с учетом знака угла
1-1'	Холостой ход	U_{1x}	I_{1x}	P_{1x}	U_{2x}	Z_{1x}	r_{1x}	x_{1x}	Z_{1x}	φ_{1x}
1-1'	Короткое замыкание	$U_{1к}$	$I_{1к}$	$P_{1к}$	$I_{2к}$	$Z_{1к}$	$r_{1к}$	$x_{1к}$	$Z_{1к}$	$\varphi_{1к}$
2-2'	Обратное короткое замыкание	$U_{2к}$	$I_{2к}$	$P_{2к}$	$I_{1к}$	$Z_{2к}$	$r_{2к}$	$x_{2к}$	$Z_{2к}$	$\varphi_{2к}$
2-2'	Обратный холостой ход	U_{2x}	I_{2x}	P_{2x}	U_{1x}	Z_{2x}	r_{2x}	x_{2x}	Z_{2x}	φ_{1x}

2. Экспериментально проверить точность определения коэффициентов четырёхполюсника.

- Восстановить схему прямого питания четырёхполюсника и нагрузить его проволочным реостатом. Для измерения выходного напряжения U_2 и выходного тока I_2 включить соответствующие приборы.

- Результаты измерений записать в табл. 16.2.

- Вычислить комплексы входных напряжения и тока, используя уравнения формы A .

- Сравнить полученные значения вычисленных и измеренных напряжения и тока на входе четырёхполюсника и сделать вывод о точности определения коэффициентов четырёхполюсника.

- Вместо реостата нагрузить четырёхполюсник конденсатором и повторить измерения и вычисления, предусмотренные п.2.

Таблица 16.2 Экспериментальная проверка точности определения коэффициентов четырёхполюсника

Характер нагрузки	Измерено				Вычислено	
	I_1, A	I_2, A	U_1, B	U_2, B	U_1, B	I_1, A
R						
C						

Вопросы для самопроверки

1. Что называется четырехполюсником?
2. Напишите основные уравнения четырехполюсника в форме А.
3. Сколько опытов и каких именно нужно выполнить для экспериментального определения коэффициентов четырехполюсника?
4. Как связаны между собой коэффициенты четырехполюсника?
5. Как можно определить параметры Т-, П-образных схем четырехполюсника, если известны его коэффициенты?
6. Как в данной лабораторной работе определяется знак угла сдвига фаз между входным напряжением и током?
7. Как рассчитываются характеристические параметры четырехполюсника?

Лабораторная работа 17

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Цель работы: изучение основных свойств и частотных характеристик П-образного низкочастотного и Т-образного высокочастотного фильтров.

Основные теоретические положения

Любой фильтр характеризуется следующими параметрами: характеристическим сопротивлением \underline{Z}_C и постоянной передачи $\Gamma = a + jb$ (a – коэффициент затухания фильтра, b – коэффициент фазы фильтра). Коэффициенты a и b определяются параметрами фильтра и не зависят от величины сопротивления нагрузки, но экспериментально они могут быть определены только при согласованной нагрузке, т.е. когда сопротивление нагрузки \underline{Z}_2 равно характеристическому сопротивлению фильтра \underline{Z}_C .

При согласованной нагрузке фильтра

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^\Gamma = e^a \cdot e^{jb}, \quad (17.1)$$

поэтому, зная комплексы напряжений или токов, легко определить коэффициенты a и b .

Из выражений (17.1) следует, что

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2}, \quad b = \psi_1 - \psi_2.$$

Коэффициент a измеряется в Неперах ($a = \ln \frac{U_1}{U_2}$, Нп) или децибелах ($a = 20 \lg \frac{U_1}{U_2}$, дБ), а коэффициент b измеряется в градусах или радианах. Угол b

считается положительным, если напряжение на входе фильтра \underline{U}_1 опережает напряжение на выходе \underline{U}_2 , в противном случае угол b считается отрицательным.

Определение фильтрующих свойств тех или иных фильтров (четырёхполюсников) сводится к исследованию зависимости их коэффициентов a , b и характеристического сопротивления \underline{Z}_C от частоты ω .

Для низкочастотного (НЧ) П-образного фильтра (рис. 17.1) примерный вид этих зависимостей приведен на рис. 17.3. Угловая частота $\omega_0 = 2/\sqrt{LC}$ носит название угловой частоты среза; она является границей между зонами затухания и пропускания (прозрачности).

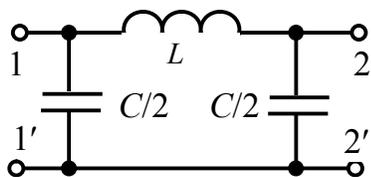


Рис. 17.1. Схема низкочастотного электрического фильтра

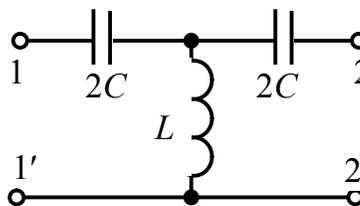


Рис. 17.2. Схема высокочастотного электрического фильтра

Для высокочастотного (ВЧ) Т-образного фильтра ($\omega_0 = 1/(2\sqrt{LC})$) (рис. 17.2) зависимости $a = F_1(\xi)$, $b = F_2(\xi)$, $\underline{Z}_C = F_3(\xi)$ приведены на рис. 17.4, а, б.

Так как при практическом использовании фильтра невозможно осуществить его согласование с нагрузкой во всем диапазоне частот, то при несогласованных режимах по кривым $a(\xi)$ и $b(\xi)$ уже нельзя судить о величине и фазе напряжения \underline{U}_2 при некотором заданном напряжении \underline{U}_1 .

Для оценки затухания фильтра в таких рабочих условиях, кроме собственного затухания, вводят еще понятие затухания вследствие несогласованности (вносимое затухание четырехполюсника), которое включает в себя собственное затухание a . Но чаще всего для оценки фильтров в рабочих условиях используют амплитудно-фазовые характеристики, которые представляют собой отношения $\underline{U}_2/\underline{U}_1$ или $\underline{I}_2/\underline{I}_1$ в функции частоты. Модули этих отношений являются амплитудно-частотными характеристиками, а их аргументы – фазо-частотными характеристиками.

В работе производится качественное исследование низкочастотного и высокочастотного фильтров по схеме рис. 17.5. Дроссель Dp в схеме является генератором высших нечетных гармоник тока. При насыщенном дросселе напряжение на активном сопротивлении R (реостат) содержит ярко выраженные первую и третью гармоники. Сопротивление r_H (магазин сопротивлений) является нагрузочным сопротивлением фильтра. С помощью электронного осциллографа исследуется форма кривых напряжения на входных и выходных зажимах фильтра.

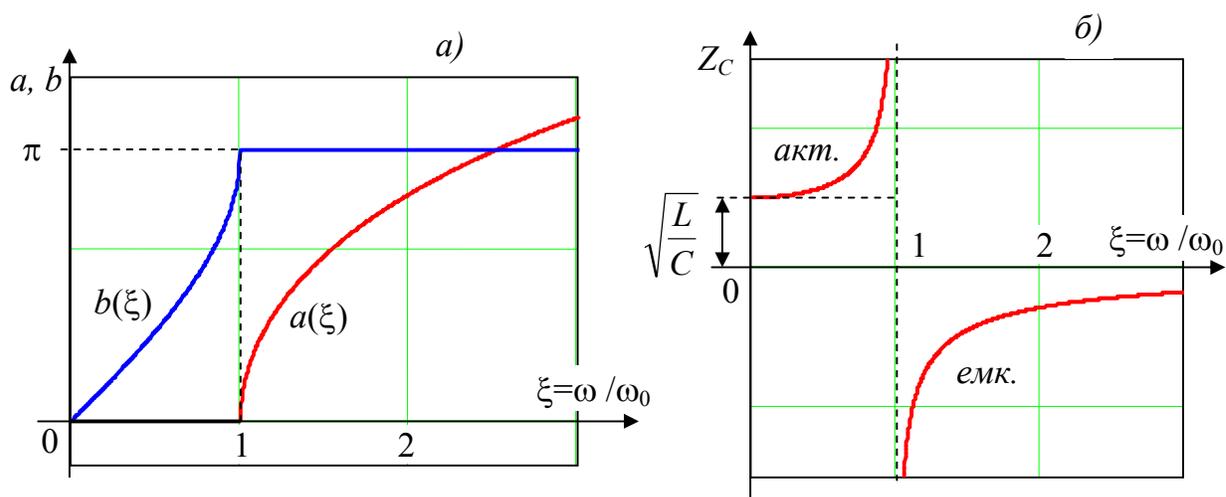


Рис. 17.3. Зависимости коэффициента затухания a , коэффициента фазы b и характеристического сопротивления Z_C от относительной частоты ξ для низкочастотного Π -образного фильтра

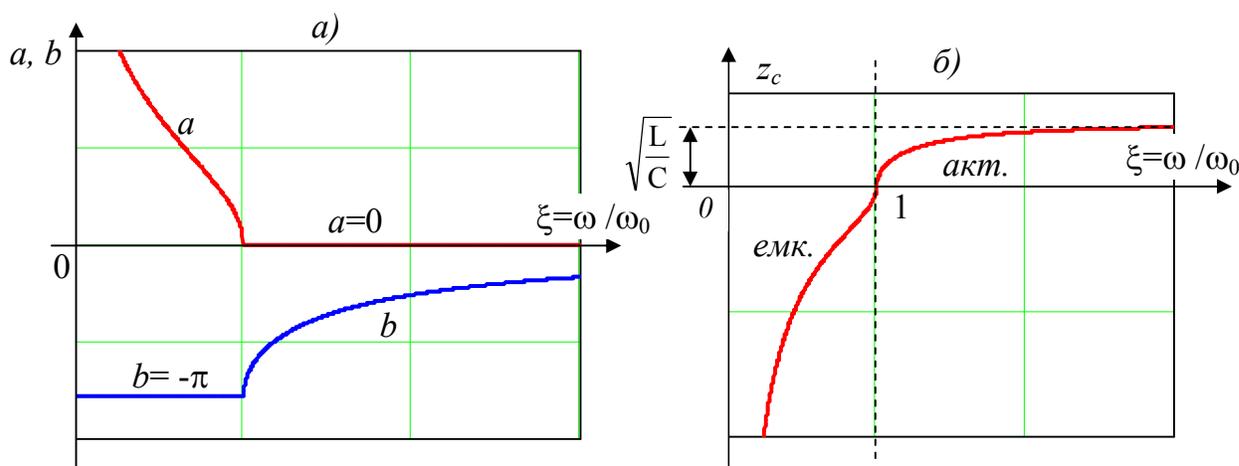


Рис. 17.4. Зависимости a , b и Z_C для высокочастотного T -образного фильтра

Методические указания по выполнению работы

Произвести качественное исследование электрических фильтров, для чего:

1. Собрать схему рис. 17.5 с низкочастотным Π -образным фильтром. По параметрам элементов фильтра, указанным на стенде, определить частоту среза и характеристическое сопротивление при частоте $f=50$ Гц:

$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}, \quad Z_{C\Pi} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad \xi = \frac{f}{f_0}.$$

2. Установить с помощью магазина сопротивление нагрузки r_H , равное Z_C . Снять с экрана осциллографа кривые напряжений на входных и выходных зажимах фильтра и объяснить их форму.

3. Заменить в схеме рис. 17.5 низкочастотный фильтр высокочастотным T -образным фильтром и по параметрам его элементов, указанным на щитке, определить f_0 и Z_C при частоте $f=150$ Гц:

$$f_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \sqrt{LC}}, \quad Z_{CT} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}.$$

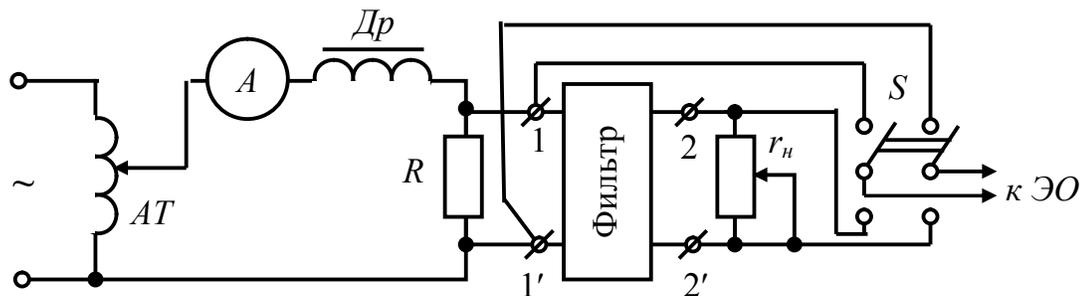


Рис. 17.5. Схема для исследований частотных электрических фильтров

4. Сопротивление r_H установить равным Z_C , и снять с экрана осциллографа кривые напряжений на входе и выходе фильтра. Объяснить форму напряжений.

Указание: на каждой из осциллограмм должны быть приведены масштабы по напряжению m_u и по времени m_t , определяемые положением переключателей осциллографа.

5. По осциллограмме входного напряжения низкочастотного фильтра рассчитать амплитуду его первой гармоники и сравнить ее с амплитудой выходного напряжения НЧ-фильтра.

6. По осциллограмме входного напряжения высокочастотного фильтра рассчитать амплитуду его третьей гармоники и сравнить ее с амплитудой выходного напряжения ВЧ-фильтра.

7. Привести в отчете качественно построенные зависимости $a(\xi)$, $b(\xi)$, $Z_C(\xi)$ для НЧ- и ВЧ-фильтров.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие четырехполюсники называются фильтрами типа K ?
2. Какими параметрами характеризуется четырехполюсник именно как фильтр?
- 3 Какой интервал частот называется полосой пропускания фильтра?
4. Почему на практике нельзя осуществить согласование фильтра с нагрузкой во всем диапазоне частот?
5. Как с помощью векторной диаграммы для исследуемого фильтра можно определить знак угла b ?
6. В каких единицах измеряются a и b ?

Литература

1. Рибалко, М. П. Теоретичні основи електротехніки: лінійні електричні кола: підручник / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко, В. І. Костенко. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513с.
2. Рибалко, М. П. Нелінійні електричні та магнітні кола в усталених і перехідних режимах / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко. – Київ, 1994. – 196с.
3. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
4. Теоретические основы электротехники. Применение современных вычислительных средств: учеб. пособие / А. В. Корощенко, В. Ф. Денник, Е. А. Журавель [и др.] – Донецк: ДонНТУ, 2015 – 186с. Режим доступа: <http://ed.donntu.org/books/cd3210.pdf>.

Приложение. Бланки отчётов о лабораторных работах

Группа	Отчёт	ФИО
--------	-------	-----

о лабораторной работе №1 «Исследование передачи энергии постоянного тока по двухпроводной линии»

Цель работы: экспериментальное 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.

Выбрав необходимые приборы, собираю схему для исследования потерь напряжения и мощности в проводах линии передачи в зависимости от тока нагрузки (рис. 1).

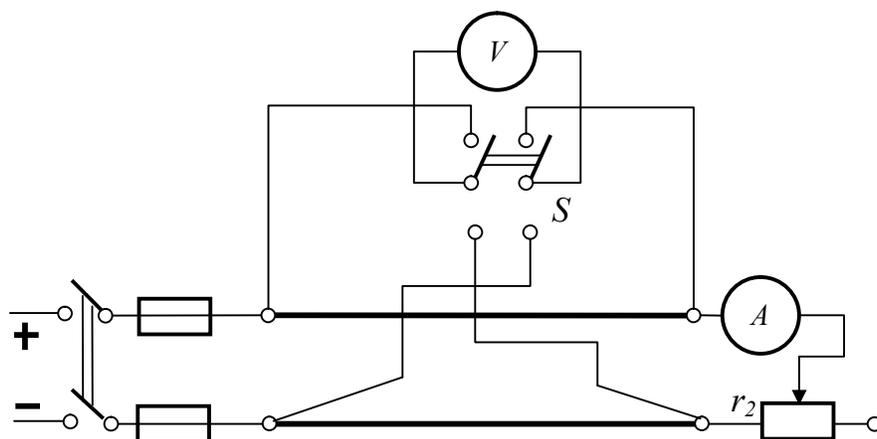


Рис. 1. Схема для исследования потерь напряжения и мощности в проводах линии передачи в зависимости от тока нагрузки

Изменяя сопротивление реостата r_2 , измеряю потерю напряжения в каждом проводе линии, вычисляю ΔU , ΔP , $r_{л}$. Результаты измерений и вычислений занесу в табл. 1.

Таблица 1 Результаты измерений и вычислений ΔU , ΔP и $r_{л}$

Измерено			Вычислено		
I, A	$\Delta U', B$	$\Delta U'', B$	$\Delta U = \Delta U' + \Delta U'', B$	$\Delta P, Вт$	$r_{л}, Ом$
0,5					
1					
1,5					
2					
2,5					
3					

Расчёты выполнены по формулам:

В общей системе координат строю графики $\Delta U(I)$ и $\Delta P(I)$. Здесь же, используя среднее значение сопротивления $r_{л}$, строю теоретические зависимости $\Delta U(I)$ и $\Delta P(I)$. Графики прилагаются.

По среднему значению сопротивления $r_{л}$ определяю эквивалентную длину двухпроводной линии из медных проводов сечением $S = 6 \text{ мм}^2$. Удельное сопротивление меди $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

Собираю схему для исследования передачи энергии по двухпроводной ЛЭП (рис. 2).

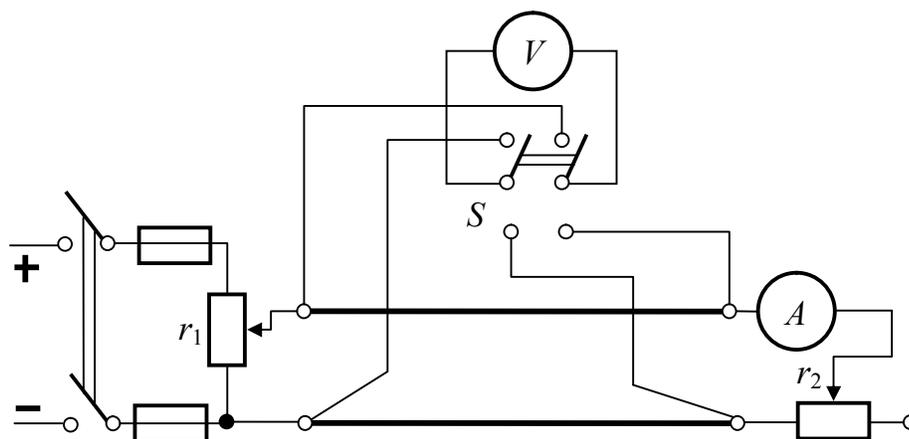


Рис. 1.2. Исследование передачи энергии при постоянном напряжении в начале линии

Изменяя сопротивление нагрузки r_2 , а значит, регулируя ток I в цепи, измеряю напряжение в конце линии U_2 при неизменном напряжении U_1 в начале линии.

Результаты измерений, а также вычислений P_1 , P_2 , КПД и r_2 заносу в табл. 2. Расчеты выполнены по формулам:

Таблица 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	$\eta, \%$	$r_2, Ом$
0,5						
1						
1,5						
2						
2,5						
(XX) I=						
(K3) I=						

При заданном напряжении U_1 расчетным путем определяю значения I , U_2 , P_1 , P_2 и КПД при холостом ходе и коротком замыкании ЛЭП, которые также заносу в табл. 2.

По данным табл. 2 в общей системе координат строю графики зависимостей U_2 , P_1 , P_2 , КПД и r_2 от тока I . Графики зависимостей $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$, $r_2(I)$ прилагаются.

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе №2 «Исследование сложной цепи постоянного тока»

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

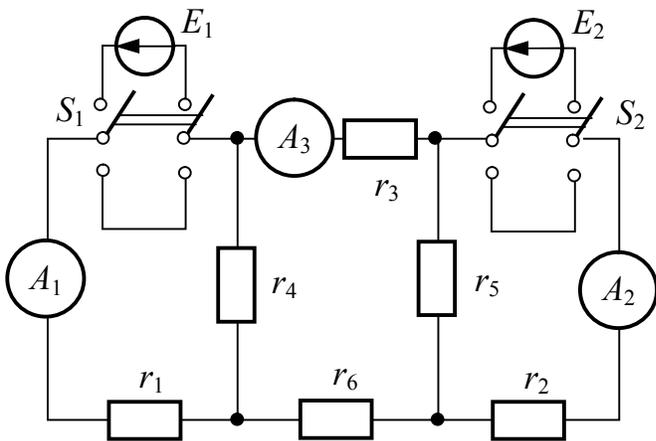


Схема исследуемой цепи

Параметры цепи записываю в табл. 1.

Выбираю положительные направления токов во всех ветвях схемы. Выполняю расчёт токов методом наложения. Расчёт прилагается.

Измеряю токи в ветвях и их составляющие. Результаты измерений и расчёта заносу в табл. 2.

Таблица 1 ЭДС источников напряжения и сопротивления

элементов цепи

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

Таблица 2 Результаты проверки принципа наложения

		I_1, mA	I_2, mA	I_3, mA
Токи при действии только ЭДС E_1	Эксперим.			
	Расчёт			
Токи при действии только ЭДС E_2	Эксперим.			
	Расчёт			
Токи, полученные путем суммирования составляющих токов	Эксперим.			
	Расчёт			
Измеренные токи при включенных ЭДС E_1 и E_2				

Методом эквивалентного генератора рассчитываю ток I_3 . Расчёт прилагается. Результаты расчёта заносу в табл. 3.

Таблица 3 Результаты исследования цепи методом эквивалентного генератора

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

Измеряю напряжение холостого хода и определяю r_{ex} по формуле $r_{ex} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}$.

Результаты измерений помещаю в табл. 3.

Для контура
потенциальную диаграмму:

вычисляю потенциалы точек и строю

Потенциальная диаграмма прилагается.
Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 3 «Исследование нелинейных цепей постоянного тока»

Цель работы: исследование вольтамперных характеристик нелинейных сопротивлений и проверка графического метода расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы (НЭ).

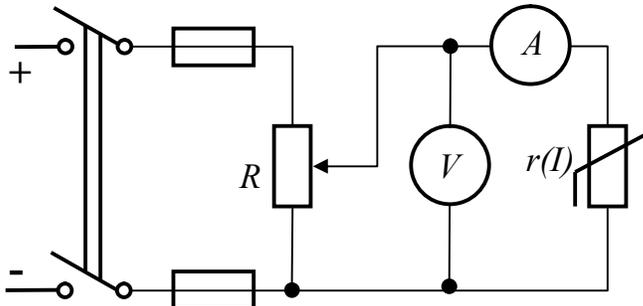


Рис. 1. Схема для снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов

Снимаю вольтамперные характеристики каждого нелинейного элемента (результаты заносу в табл. 1) с помощью схемы (рис. 1).

Таблица 1 Вольтамперные характеристики резистивных элементов

№ п/п	Нелинейное полупроводниковое сопротивление $U_{ном} =$			Лампа накаливания $U_{ном} =$			Линейное сопротивление $U_{ном} =$		
	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, мА$	$r_{ст}, Ом$
1	0	0		0	0		0	0	
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									

Для каждого опыта вычисляю величину статического сопротивления элемента (табл. 1) и по данным этой таблицы в общей системе координат строю ВАХ исследованных НЭ. В той же системе координат расчетным путем строю вольтамперные характеристики:

а) последовательного соединения нелинейного полупроводникового сопротивления (НПС) и лампы накаливания;

б) параллельного соединения НПС и лампы накаливания;
 в) смешанного соединения трех НЭ (в неразветвленной части цепи включен по указанию преподавателя).

Расчетные вольтамперные характеристики прилагаются.

Результаты графического расчета свожу в табл. 2.

Таблица 2 Вольтамперные характеристики цепи при различных схемах соединения нелинейных элементов

№ пп	Последовательное соединение НЭ			Параллельное соединение НЭ			Смешанное соединение НЭ		
	$U, В$	Расчет	Экспе- римент	$U, В$	Расчет	Экспе- римент	$U, В$	Расчет	Экспе- римент
		$I_p, мА$	$I_3, мА$		$I_p, мА$	$I_3, мА$		$I_p, мА$	$I_3, мА$
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Собираю упомянутые выше схемы последовательного, параллельного и смешанного соединений и экспериментально проверяю результаты графического расчета, причем измеряю токи при тех же значениях напряжения, при которых эти токи рассчитывались. Результаты также заносу в табл. 2.

В общей системе координат строю зависимости статических сопротивлений исследованных элементов от напряжения. Графики зависимостей прилагаются.

Выводы:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе №4 «Исследование неразветвлённых 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 основных признаков.

Для исследования цепи, состоящей из последовательно соединённых реостата и катушки индуктивности я собираю следующую схему (рис. 1).

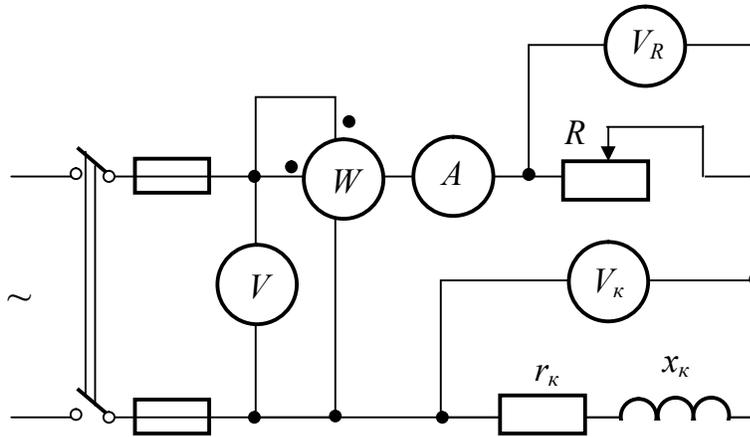


Рис. 1 Последовательное соединение реостата и катушки

Результаты измерений и расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1 Результаты исследования цепи с последовательным соединением 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	$\cos\varphi_K$	$L,$ H	$\cos\varphi$	$U_{ак},$ B	$U_{Lк},$ B

Расчеты выполнены по следующим формулам:

По данным табл. 1 я строю в масштабе векторную диаграмму цепи и треугольник сопротивлений. Векторная диаграмма и треугольник сопротивлений прилагаются.

Заменяю катушку конденсатором с емкостью $C = \text{мкФ}$. Рассчитываю ток в цепи I , напряжение на реостате U_R и конденсаторе U_C , потребляемую мощность P и коэффициент мощности $\cos\varphi$. Расчет прилагается.

Затем я измеряю U, I, U_R, U_C, P .

Результаты вычислений и измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2 Результаты исследования цепи при последовательном соединении реостата и конденсатора

Расчет											Эксперимент				
Исходные данные				Вычислено											
$U,$ B	$R,$ Ом	$C,$ мкФ	$f,$ Гц	$x_C,$ Ом	$z,$ Ом	$I,$ A	$P,$ Вт	$U_R,$ B	$U_C,$ B	$\cos\varphi$	$U,$ B	$I,$ A	$U_R,$ B	$U_C,$ B	$P,$ Вт

Сравниваю результаты расчета и измерений и прихожу к следующему заключению:

Я строю в масштабе векторную диаграмму цепи и треугольник сопротивлений для случая последовательного соединения реостата и конденсатора. Векторная диаграмма и треугольник сопротивлений прилагаются.

Для исследования цепи, состоящей из последовательно соединенных реостата, катушки индуктивности и конденсатора, я собираю схему (рис. 2).

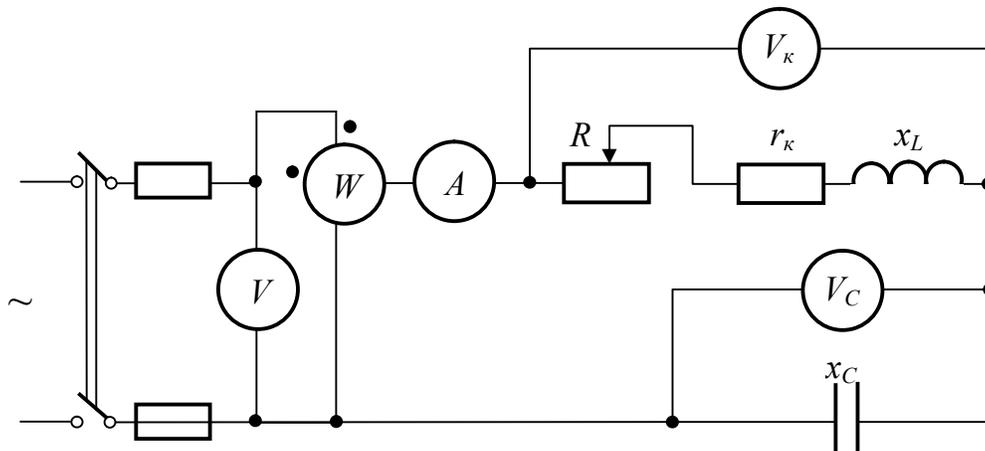


Рис. 2 Цепь для исследования резонанса напряжений

Результаты измерений сведены в табл. 3.

Таблица 3 Результаты исследования резонанса напряжений

№ пп	Измерено					Вычислено								
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Bт$	$U_{к},$ B	$U_{с},$ B	$r,$ $Ом$	$z,$ $Ом$	$z_{к},$ $Ом$	$x_L,$ $Ом$	$L,$ $Гн$	$x_C,$ $Ом$	$U_L,$ B	$U_a,$ B	$\cos\varphi$
1														
2														
3														

По результатам измерений я вычисляю: $r, Z, Z_{к}, x_L, L, x_C, U_L, U_a=r \cdot I, \cos\varphi$ для всех экспериментов. Результаты вычислений помещены в табл. 3. Вычисления выполнены по формулам:

По данным табл. 3 я строю в масштабе векторные диаграммы для трёх случаев: 1) $x_L < x_C$; 2) $x_L = x_C$; 3) $x_L > x_C$. Диаграммы прилагаются.

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 5 «Исследование цепей синусоидального тока при параллельном соединении ветвей и резонанса токов»

Цель работы: экспериментальное определение параметров и проверка основных расчётных соотношений для цепей при параллельном соединении ветвей с активными и реактивными элементами. Исследование условий возникновения резонанса токов и его признаков.

Для исследования цепи при параллельном соединении ветвей собираю схему

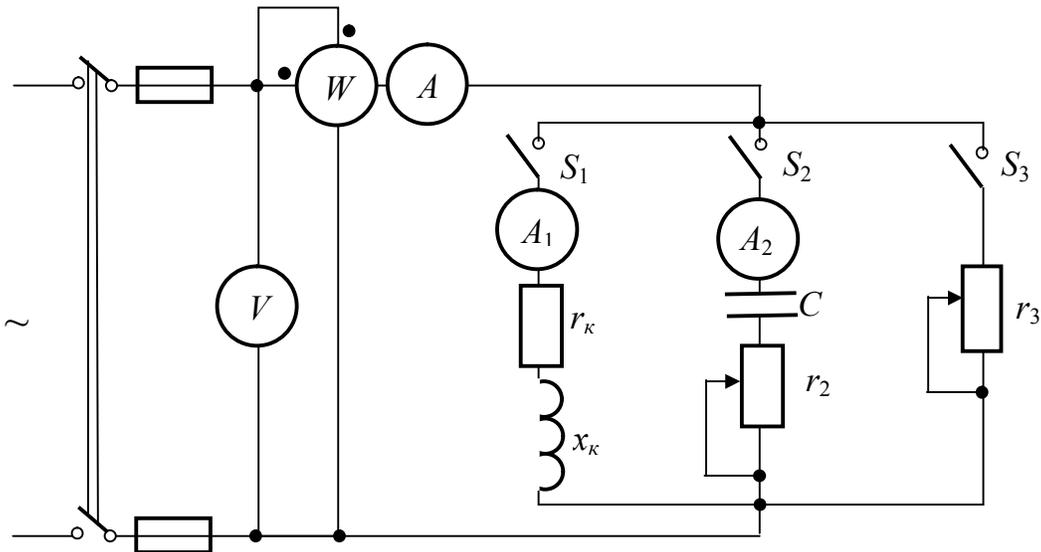


Рис. 5.2. Схема для исследования параллельного соединения приемников энергии

Пользуясь тумблерами S_1 , S_2 и S_3 включаю в цепь сначала только катушку индуктивности и, выдвигая сердечник, устанавливаю ток в ней $1,5 - 2 \text{ A}$. Затем включаю только ветвь с конденсатором, и наконец, только реостат. В каждом случае измеряю напряжение U , ток I , потребляемую мощность P и вычисляю: полную S и реактивную Q мощности, коэффициент мощности $\cos \varphi$, активную I_a и реактивную I_p составляющие тока, активную g , реактивную b и полную y проводимости. Расчеты выполнены по формулам:

Результаты измерений и вычислений занесу в табл. 1.

Включаю попарно: а) реостат и катушку (при тех же значениях токов в них, что и ранее); б) реостат и ветвь с конденсатором. Произвожу подобные предыдущим измерения и вычисления и также заносу их в табл. 1.

По данным табл. 1 строю векторные диаграммы цепи для случаев параллельного соединения: а) реостата и катушки; б) реостата и ветви с конденсатором. Векторные диаграммы прилагаются.

Таблица 1

№ пп	Включено	Измерено			Вычислено											
		$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$S,$ $ВА$	$Q,$ $вар$	$\cos\varphi$	$I_a,$ A	$I_p,$ A	$g,$ $См$	$b,$ $См$	$y,$ $См$				
1	Катушка															
2	Ветвь с конденсатором															
3	Реостат															
4	Реостат и катушка															
5	Реостат и ветвь с конденсатором															

Произвожу исследование резонанса токов, для чего включаю параллельно катушку и ветвь с конденсатором и, выдвигая сердечник из катушки от его полностью вдвинутого положения, нахожу его положение, при котором в цепи имеет место резонанс токов. В этом режиме измеряю и заносу в табл. 2 указанные в ней величины. Произвожу еще 2 эксперимента: один до резонанса ($b_L > b_C$) и один после резонанса ($b_L < b_C$). Результаты измерений в этих опытах также заносу в табл. 2. Для всех случаев измерений вычисляю все величины, указанные в табл. 2. Расчеты выполнены по формулам:

Таблица 2

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

По данным табл. 2 строю векторные диаграммы и треугольники проводимостей для трех случаев: а) $b_L > b_C$; б) $b_L = b_C$; в) $b_L < b_C$. Диаграммы прилагаются.

Выводы:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе №6 «Исследование цепей синусоидального тока с индуктивно связанными элементами»

Цель работы: экспериментальное определение параметров реальных катушек, имеющих индуктивную связь, их одноимённых зажимов, взаимной индуктивности и величины коэффициента связи; проверка расчётных соотношений для последовательного и трансформаторного включений элементов.

Для определения параметров первой катушки я собираю схему рис. 1.

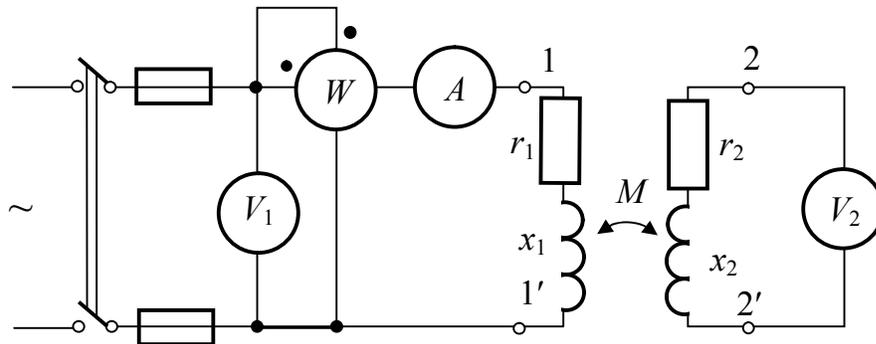


Рис. 1. Схема для определения параметров первой катушки и взаимной индуктивности

Я измеряю и вычисляю все величины, указанные в табл. 1. Затем я меняю местами выводы 1-1' и 2-2' и определяю параметры второй катушки. Результаты я помещаю в табл. 1.

Таблица 1 Опытное определение параметров индуктивно связанных катушек

Измерено и рассчитано	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ $Вт$	$U_{x_1},$ B	$z,$ $Ом$	$r,$ $Ом$	$x,$ $Ом$	$x_M,$ $Ом$	$M,$ $мГн$
1-я катушка									
2-я катушка									

Расчеты в табл. 1 выполнены по формулам:

Сравниваю M_{12} и M_{21} :

Я измеряю напряжение сети. По известному напряжению сети и параметрам катушек (табл. 1), я вычисляю значения тока I , напряжений U_1 и U_2

и мощность P цепи, состоящей из последовательно соединенных катушек для двух случаев:

- а) согласное включение,
- б) встречное включение.

Расчет прилагается. Результаты вычислений помещены в табл. 2.

Таблица 2 Результаты исследования цепи при согласном и встречном соединении катушек

Последовательное соединение		Измерено					Вычислено	
		U, B	I, A	$P, Вт$	U_1, B	U_2, B	$z_{ex}, Ом$	$x_{ex}, Ом$
Согласное включение	Опыт							
	Расчёт							
Встречное включение	Опыт							
	Расчёт							

Собираю цепь с последовательным соединением катушек (рис. 2).

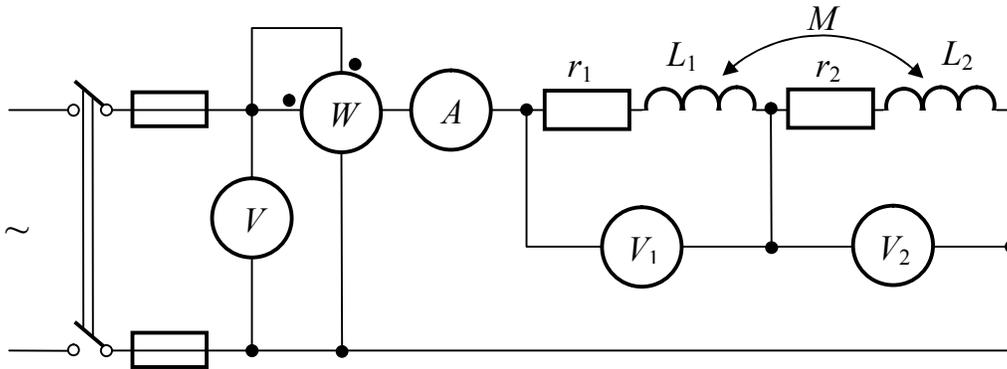


Рис. 2. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

Я измеряю и вычисляю все величины, указанные в табл. 2, при согласном и встречном соединениях катушек. Результаты измерений помещены в табл. 2.

Сравниваю экспериментальные и вычисленные значения всех величин при согласном и встречном включениях катушек:

По известному напряжению сети и параметрам катушек (табл. 1) для первой схемы с короткозамкнутыми выводами второй катушки я вычисляю токи катушек I_1 и I_2 , а также потребляемую из сети мощность P . Расчет прилагается. Результаты вычислений помещены в табл. 3.

Таблица 3 Расчётные и измеренные значения величин в трансформаторной схеме

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

Собираю соответствующую цепь и измеряю все величины, указанные в табл. 3. Результаты измерений помещены в табл. 3. Сравниваю расчётные и экспериментальные данные:

В масштабе строю векторные диаграммы для последовательного соединения двух катушек (для согласного и встречного включения) и для трансформаторной схемы. Диаграммы прилагаются.

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе №7 «Исследование трёхфазных цепей»

Цель работы: экспериментальное исследование различных режимов работы трехфазной цепи при соединении приемников энергии звездой и треугольником.

Выполняю соединение фаз приемника по схеме звезды (рис. 1). Измеряю фазные и линейные напряжения и токи при симметричной нагрузке в случаях отключенного и включенного нулевого провода (НП) и результаты заново в табл. 1.

Таблица 1 Исследование цепи при соединении приёмника звездой

№	Напряжения						Токи				Включено в фазу			Примечания
	линейные			фазные			I_A	I_B	I_C	I_N	AX	BY	CZ	
	U_{ab} B	U_{bc} B	U_{ca} B	U_a B	U_b B	U_c B								
1											3R	3R	3R	Без НП
2											3R	3R	3R	С НП
3														Без НП
4														С НП
5														Без НП
6														С НП
7											3R	3R	3R	КЗ фазы без НП

На основании измерений вычисляю соотношение между линейным и фазным напряжениями (беру усредненные значения напряжений):

$$U_{л}/U_{ф} =$$

Повторяю измерения для случаев несимметрии, указанных в табл.1, в том числе и при КЗ фазы , назначенной преподавателем (в его присутствии и при отключенном НП). Результаты измерений записываю в табл. 1.

На основании измерений строю в масштабе векторные диаграммы для опытов № 1, 3, 5, 7. Векторные диаграммы прилагаются.

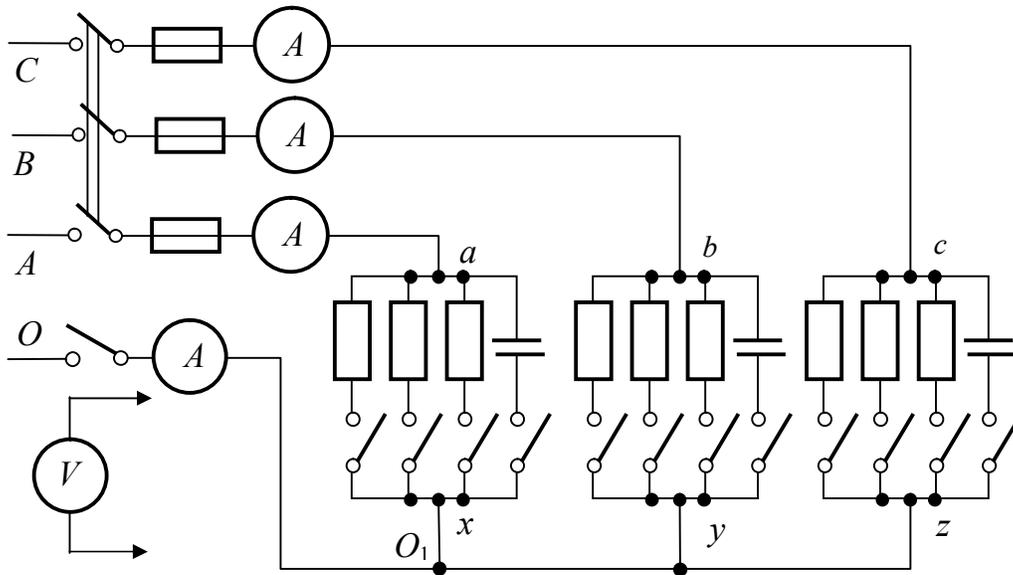


Рис. 1. Соединение приемника в звезду

Вывод о назначении нейтрального провода:

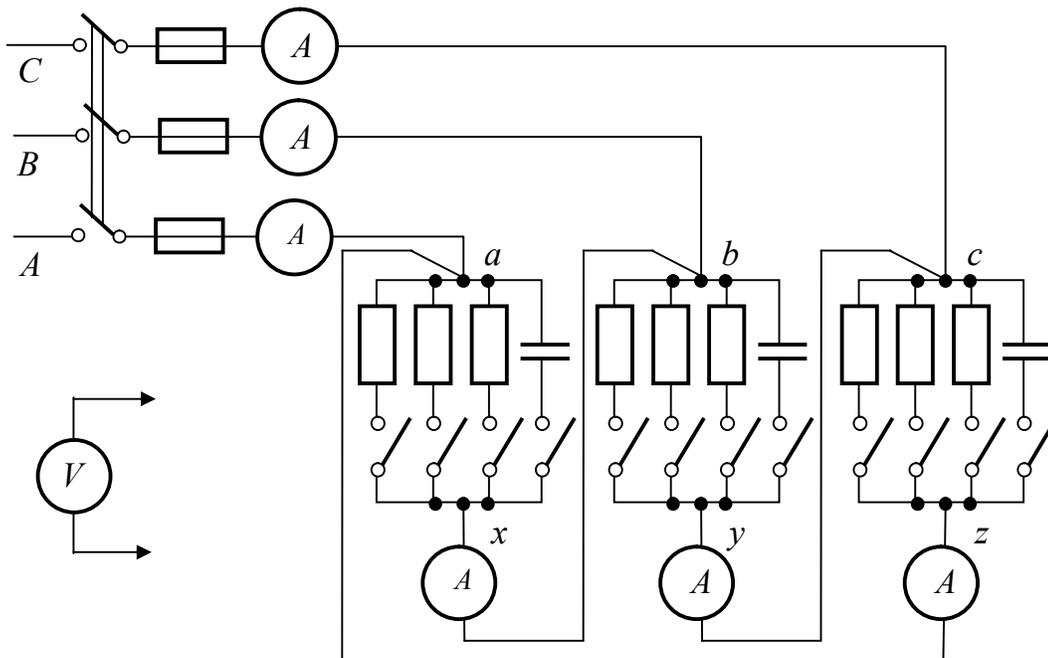


Рис. 2. Соединение приемника в треугольник

Выполняю соединение фаз приемника по схеме треугольника (рис. 2) и измеряю линейные и фазные напряжения и токи как в случае симметричной нагрузки, так и в нескольких случаях неравномерной нагрузки (см. табл. 2).

Для симметричной нагрузки проверяю соотношение между линейным и фазным токами (беру усредненные значения токов):

$$I_L/I_\phi =$$

По данным табл. 2 в масштабе строю векторные диаграммы для опытов № 1-4. Векторные диаграммы прилагаются.

Таблица 2 Исследование цепи при соединении треугольником

№	Напряжения			Токи						Включено в фазу			Примечания
				линейные			фазные						
	$U_{ab},$ B	$U_{bc},$ B	$U_{ca},$ B	$I_A,$ A	$I_B,$ A	$I_C,$ A	$I_{ax},$ A	$I_{by},$ A	$I_{cz},$ A	AX	BY	CZ	
1										3R	3R	3R	
2													
3													
4										3R	3R	3R	Оборван линейный провод

Выводы:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 8 «Измерение активной и реактивной мощностей трехфазного тока»

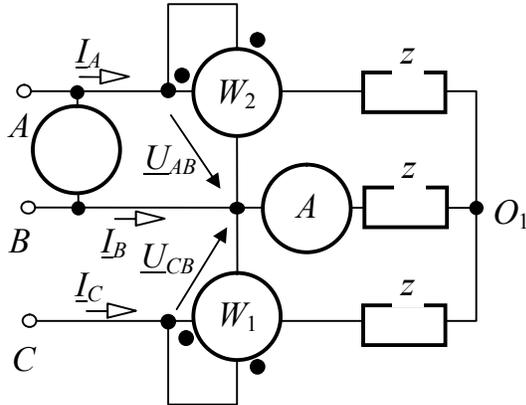


Рис. 1. Измерение активной мощности по схеме двух ваттметров

Цель работы: изучение основных схем измерения активной и реактивной мощностей в цепях трехфазного тока.

Проверив с помощью фазоуказателя последовательность фаз, собираю схему для измерения активной мощности двумя однофазными ваттметрами (рис. 1).

Выполняю измерения и вычисления в опытах, указанных в табл. 1.

Таблица 1 Исследование схемы измерения активной мощности

№ п/п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		$U_{Л, B}$	$I_{Л, A}$	$N_1, Вт$	$N_2, Вт$	$\cos\varphi$	$P=N_1+N_2, Вт$	$P=\sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \times \cos\varphi, Вт$
1	Резисторы							
2	Резисторы и конденсаторы							
3	Конденсаторы							
4	Резисторы и конденсаторы при обрыве провода A							$P=U_{Л} I_{Л} \cos\varphi$

По данным табл. 1 в масштабе строю векторные диаграммы для опытов № 1 и № 3. Диаграммы прилагаются.

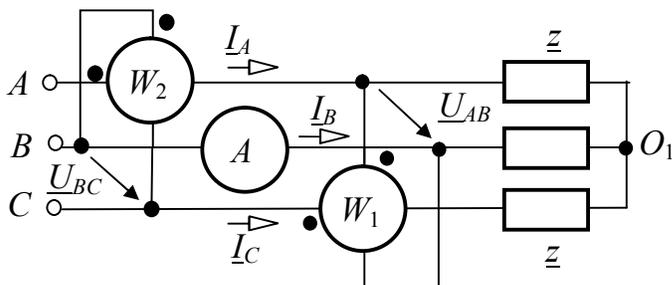


Рис. 2 Измерение реактивной мощности с помощью двух ваттметров

Собираю схему для измерения реактивной мощности с помощью двух однофазных ваттметров и измеряю, а также вычисляю все величины, указанные в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Характер нагрузки	Измерено				Вычислено		
		$U_{Л,В}$	$I_{Л,А}$	$N_{1,Вт}$	$N_{2,Вт}$	$\sin\varphi$	$Q = \sqrt{3} (N_1 + N_2) / 2,$ <i>вар</i>	$Q = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \times$ $\times \sin\varphi,$ <i>вар</i>
1	Резисторы							
2	Резисторы и конденсаторы							
3	Конденсаторы							
4	Резисторы и конденсаторы при обрыве провода <i>A</i>							$Q = U_{Л} I_{Л} \sin\varphi$

По данным табл. 2 для опыта № 2 строю векторную диаграмму измерительной схемы. Диаграмма прилагается.

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 9 «Исследование цепей несинусоидального тока»

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

Для проверки влияния емкости на величину и форму тока в цепи собираю схему.

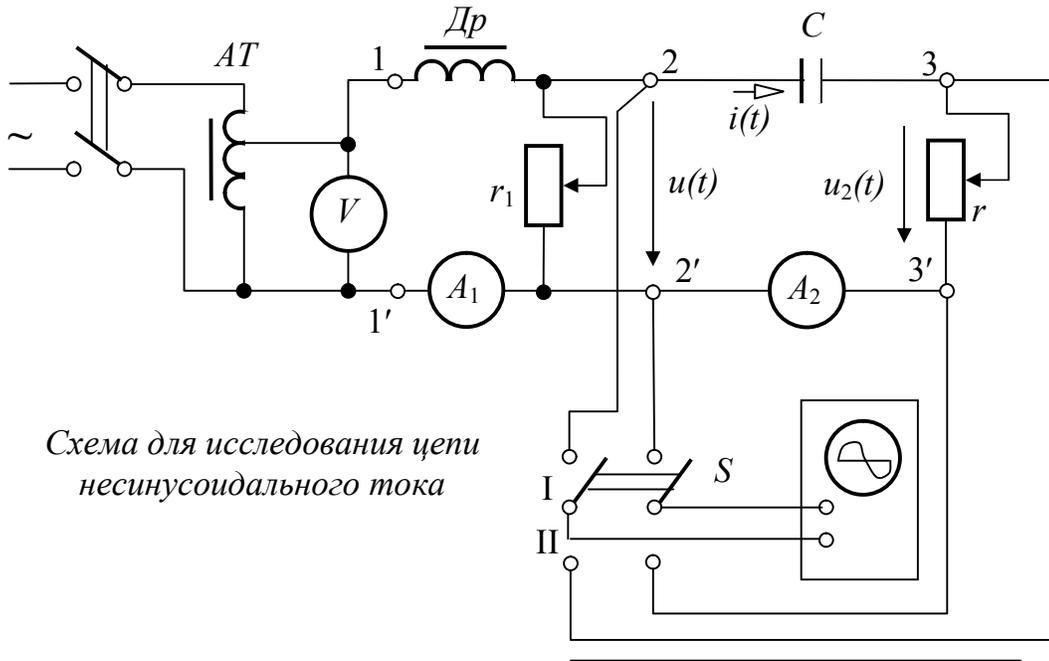


Схема для исследования цепи несинусоидального тока

Параметры исследуемой цепи заносю в таблицу

Таблица Параметры исследуемой цепи и ток в ней

$r, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$I, \text{ мА}$	
		Расчет	Эксперимент

С помощью автотрансформатора АТ устанавливаю ток в цепи дросселя Dp ток от 1,5 до 2 А и показание амперметра A_2 записываю в таблицу.

С экрана осциллографа ЭО снимаю кривые входного несинусоидального напряжения $u(t)$ исследуемой цепи (переключатель S в положении I) и напряжения $u_r(t)$ на активном сопротивлении (переключатель S в положении II). Осциллограммы прилагаются.

Масштабы:

$m_u =$

$m_i =$

Несинусоидальную кривую входного напряжения $u(t)$ раскладываю на гармонические составляющие ряда Фурье, используя графоаналитический метод разложения (расчёт прилагается).

По входному напряжению, полученному в виде ряда Фурье, и известным параметрам цепи рассчитываю первую и третью гармоники тока и с их помощью строю его график (расчёт и график прилагаются). Сравниваю расчетную и экспериментальную кривые тока. По первой и третьей гармоникам тока рассчитываю его действующее значение и заносу его в таблицу, сравниваю с экспериментальным значением.

Сравнивая осциллограммы входного несинусоидального напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ делаю следующий вывод о влиянии емкости на форму кривой тока:

Заменяю в схеме конденсатор на катушку индуктивности, снимаю снова осциллограммы $u(t)$ и $i(t)$ (осциллограммы прилагаются) и, сравнивая их, делаю следующее заключение о влиянии индуктивности на форму кривой тока:

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 10 «Исследование переходных процессов в линейных цепях постоянного тока, содержащих сопротивление и емкость»

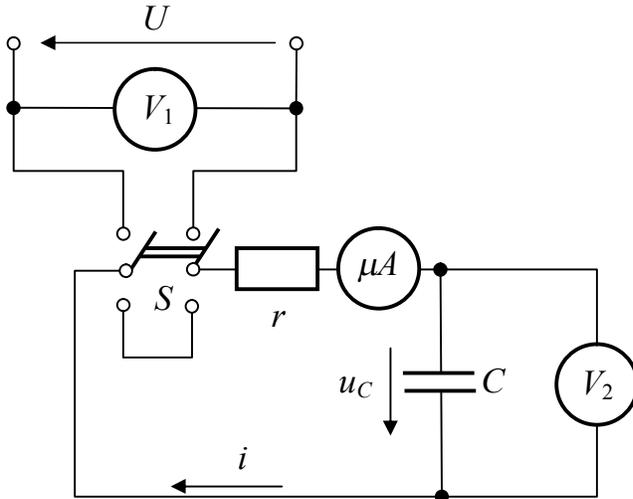


Рис. 1. Схема для исследования переходных процессов в цепи с последовательным соединением r , C

Цель работы: изучение заряда и разряда конденсатора в цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора C и резистора r . Исследование переходных процессов в схеме при смешанном соединении сопротивлений и емкости.

Собираю схему последовательного соединения (рис. 1) $r = \quad \text{кОм}$ и $C = \quad \text{мкФ}$ и с помощью переключателя S включаю ее на напряжение $U_0 = \quad \text{В}$.

Снимаю отсчеты напряжения на конденсаторе и тока в цепи и результаты заносю в табл. 1.

Таблица 1 Результаты исследования цепи r , C при заряде конденсатора $U_0 = \quad \text{В}$

$t, \text{с}$	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
$u_C, \text{В}$														
$i, \text{мкА}$														

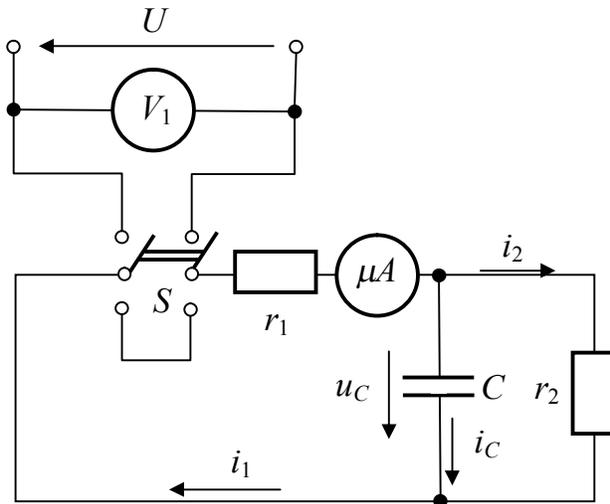
Рассчитываю практическое время протекания переходного процесса t_{mn} и сравниваю его с экспериментальным значением:

По данным табл. 1 в общей системе координат строю графики $u_C(t)$ и $i(t)$. Графики прилагаются.

Переключив переключатель S , исследую разряд конденсатора, снимая показания приборов до нулевых значений u_C и i . Результаты измерения свожу в табл. 2.

Таблица 2 Результаты измерений напряжения u_C и тока i при разряде конденсатора

t, c	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200
u_C, B														
$i, мкА$														



По данным табл. 2 в общей системе координат строю графики $u_C(t)$ и $i(t)$ при разряде конденсатора. Графики прилагаются.

Собираю схему (рис. 2) и, включив ее с помощью переключателя S , через каждые 10 с измеряю по очереди токи ветвей схемы. Результаты измерений свожу в табл. 3.

Рис. 2. Схема для исследования переходных процессов в цепи со смешанным соединением сопротивлений и емкости

Таблица 3 Результаты измерения токов

t, c														
$i_1, мкА$														
$i_2, мкА$														
$i_C, мкА$														

В общей системе координат строю графики $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_C(t)$. Графики прилагаются.

Для последней схемы рассчитываю принужденные токи, значения всех токов в момент коммутации и постоянную времени цепи. Результаты свожу в табл. 4.

Таблица 4 Результаты измерения токов

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

Выводы:

Группа

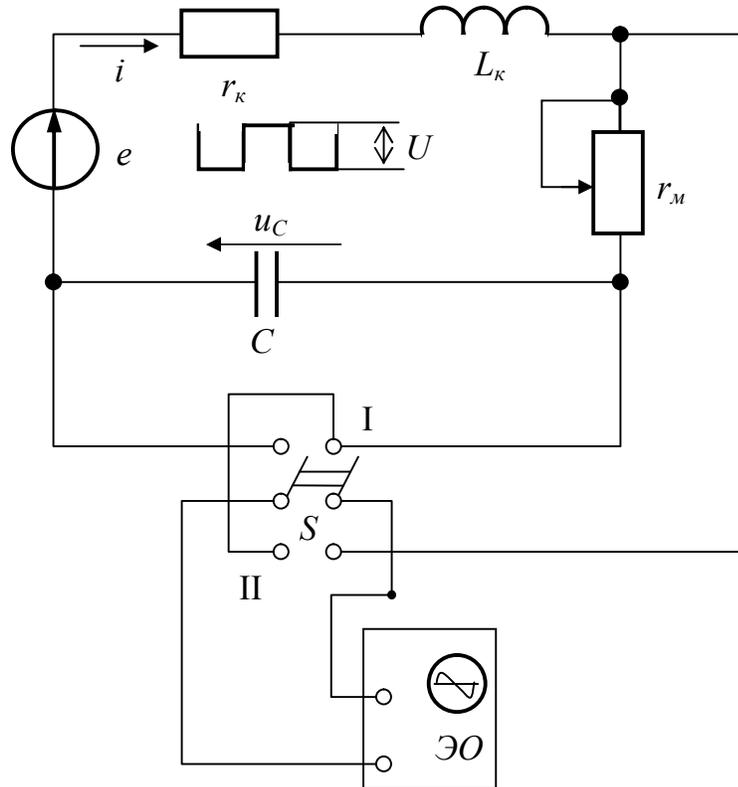
Ф.И.О.

Отчет

о лабораторной работе № 11 «Исследование переходных процессов при включении цепи r, L, C на постоянное напряжение»

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

Для исследования переходных процессов в цепи r, L, C собираю схему.



Рабочая схема для исследования переходных процессов при включении цепи r, L, C на постоянное напряжение

Параметры этой схемы:

$$r_k = \text{ Ом}; \quad L_k = \text{ Гн}; \quad C = \text{ мкФ}.$$

Определяю критическое сопротивление цепи:

По осциллограмме напряжения источника питания определяю, что $U = B$.

Устанавливаю с помощью магазина сопротивлений сопротивление цепи $r = 2 \cdot r_{кр}$ ($r = r_k + r_m$) и при включенном источнике снимаю осциллограмму напряжения на ёмкости $u_C(t)$ при заряде конденсатора и напряжение на магазине сопротивлений, которое повторяет (в другом масштабе) кривую тока в цепи $i(t)$.

Устанавливаю сопротивление цепи $r = r_k + r_m = 0,2 \cdot r_{кр}$ и снимаю осциллограммы кривых $u_C(t)$ и $i(t)$ при заряде конденсатора. Графики прилагаются.

По осциллограмме $i(t)$ определяю период T_0 свободных колебаний и декремент колебаний Δ .

Произвожу расчет T_0 и Δ по параметрам цепи и сравниваю их с экспериментальными значениями. Расчет прилагается.

Плавно увеличивая сопротивление r_m , замечаю его значение, при котором колебательный процесс переходит в апериодический. Сумма r_m и r_k даёт экспериментальное значение $r_{кр} = r_m + r_k =$

Сравниваю его с расчетным значением:

Зная величину U и параметры цепи, произвожу расчет кривой $i(t)$ для случая $r =$. Расчет прилагается.

Расчетную кривую $i(t)$ накладываю на экспериментальную (осциллограмму).

Выводы:

По данным табл. 2 в общей системе координат строю графики зависимостей: $I(\delta)$, $z_0(\delta)$, $r_0(\delta)$, $x_0(\delta)$, $B_m(\delta)$ при $U=const$. Графики зависимостей прилагаются.

Далее исследую зависимость параметров схемы замещения катушки от величины напряжения питания. Для этого при неизменном воздушном зазоре ($l_g=0$) изменяю с помощью автотрансформатора AT напряжение U от 50 В до максимально возможного значения и результаты измерений и вычислений заносу в табл. 3.

Таблица 3

№ п п	Измерено					Вычислено										
	$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_0,$ B	$l_g,$ mm	$E,$ B	$B_m,$ $Tл$	$z,$ Om	$R,$ Om	$x,$ Om	$P_c,$ Bm	$z_0,$ Om	$r_0,$ Om	$x_0,$ Om	$x_s,$ Om	$cos\varphi$
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																

По данным табл. 3 в общей системе координат строю графики зависимостей: $P_c(U)$; $I(U)$; $z_0(U)$; $B_m(U)$ при $l_g = const$. Графики зависимостей прилагаются.

Изображаю схемы замещения катушки со стальным сердечником:

С соблюдением масштабов строю векторную диаграмму катушки со сталью для опыта № (табл. 3). Векторная диаграмма прилагается.

Выводы:

Заменяю в схеме катушку конденсатором, снимаю его характеристику (результаты - в табл. 1).

По данным табл. 1 в общей системе координат строю вольтамперные характеристики катушки $U_K(I)$, конденсатора $U_C(I)$ и последовательного соединения катушки со стальным сердечником и конденсатора $U(I)_{расч}$. При расчете U_K принято равным U_L . Графики прилагаются.

Собираю схему последовательного соединения конденсатора и катушки со сталью (рис. 2) и снимаю ВАХ этой цепи $U(I)_{эксп}$. Результаты измерений заночу в табл. 1.

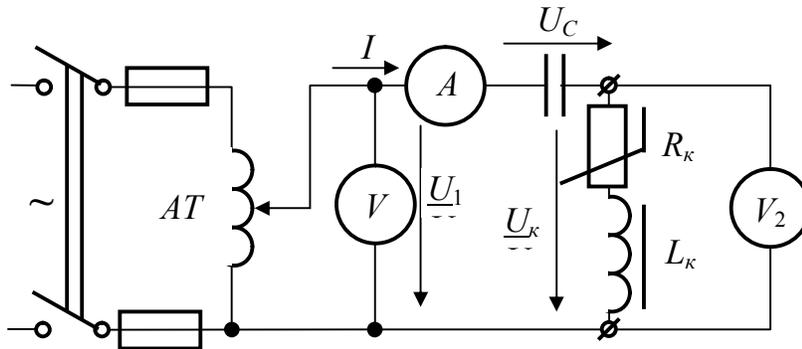


Рис. 2. Схема для исследования цепи, состоящей из последовательно включенных катушки со сталью и конденсатора

По данным табл. 1 на предыдущем графике строю экспериментальную характеристику последовательного соединения конденсатора и катушки.

Причины некоторого несовпадения характеристик $U(I)_{расч}$ и $U(I)_{эксп}$:

- 1.
- 2.
- 3.

В последней схеме параллельно катушке подключаю вольтметр электромагнитной системы и, изменяя входное напряжение U_1 , снимаю зависимость $U_2(U_1)$, где U_2 – напряжение вольтметра V_2 . Результаты измерений заночу в табл. 2.

Таблица 2 Исследование стабилизатора напряжения

U_1, B						
U_2, B						

По данным табл. 2 строю графическую зависимость $U_2(U_1)$. График прилагается.

Выводы:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

по лабораторной работе № 14 «Исследование утрителя частоты»

Цель работы: исследование свойств нелинейных трехфазных цепей на примере ферромагнитного утрителя частоты.

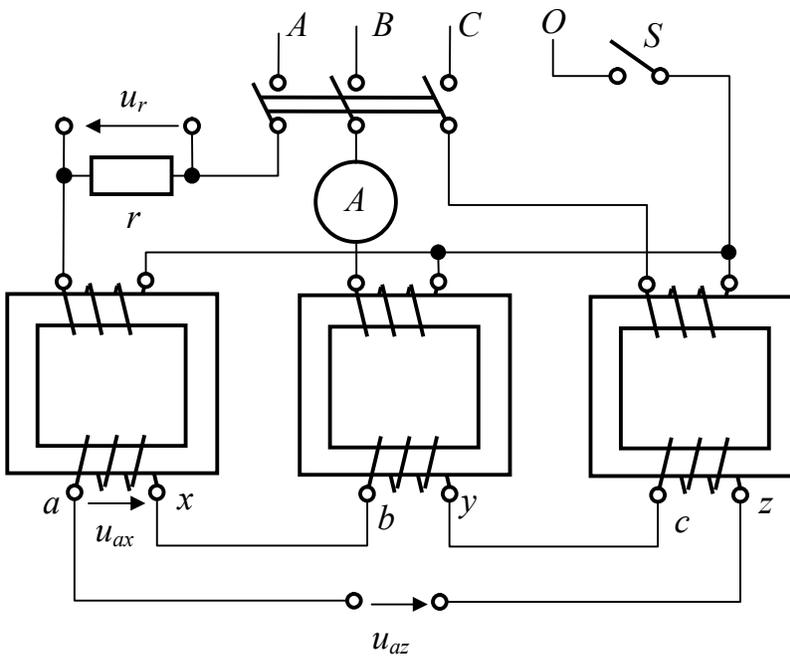


Схема ферромагнитного утрителя частоты

осциллограммы фазного напряжения u_{ax} и выходного напряжения утрителя u_{az} .

Осциллограммы прилагаются.

Для случая выключенного нулевого провода по осциллограмме напряжения u_{ax} графо-аналитическим методом рассчитываю третью гармонику этого напряжения и сравниваю ее с амплитудой напряжения u_{az} , определенной по осциллограмме последнего. Расчёты прилагаются.

Выводы:

Собираю схему утрителя частоты и, подключив вход осциллографа параллельно зажимам реостата r , при включенном и выключенном нулевом проводе снимаю осциллограммы фазного тока первичной цепи утрителя.

При одном и том же усилении осциллографа при включенном и выключенном нулевом проводе снимаю

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 15 «Исследование выпрямителей однофазного и трехфазного токов»

Цель работы: экспериментальное определение основных соотношений для напряжений, токов и мощностей в схемах неуправляемых выпрямителей переменного тока (в том числе с подключением сглаживающего конденсатора *СК*) и анализ временных зависимостей напряжений на различных участках цепи.

Для измерения напряжения, тока и мощности источника использую стандартную комбинацию измерительных приборов – вольтметр, амперметр, ваттметр (комплект К-50). Для измерения выпрямленного напряжения и тока используются приборы магнитоэлектрической системы. Осциллограммы напряжений получены с помощью осциллографа С1-76.

Собираю схему однофазного однополупериодного выпрямления (рис. 1).

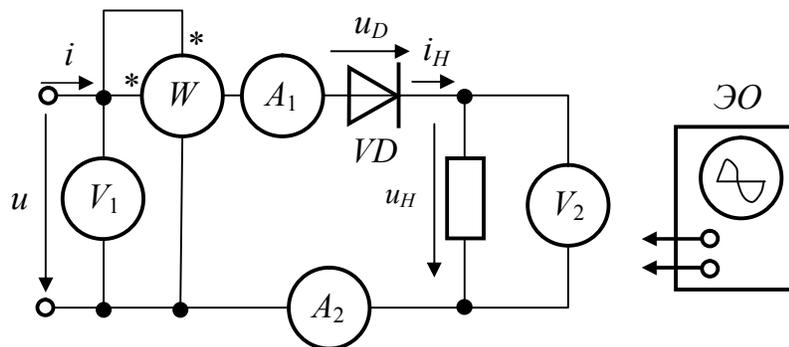


Рис. 1. Схема однофазного однополупериодного выпрямления

Снимаю осциллограммы напряжений источника, на нагрузке и на диоде. Осциллограммы прилагаются. Результаты измерений и вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1 Результаты исследования схемы однофазного однополупериодного выпрямления переменного тока

Измерено						Вычислено			
$U,$ B	$I,$ A	$P,$ Bm	$U_{Hcp},$ B	$I_{Hcp},$ A	$U_{Dm},$ B	k_{cx}	$\frac{U_{Dm}}{U_{Hcp}}$	$\frac{I}{I_{Hcp}}$	$\cos \varphi$

Вычисления в табл. 1 выполнены по формулам: $k_{cx} = U_{Hcp}/U$; $\cos \varphi = P/(U \cdot I)$.

Результаты исследований однофазной (рис. 2) и трехфазной (рис. 3) мостовых схем выпрямления тока сведены в табл. 2. Осциллограммы прилагаются.

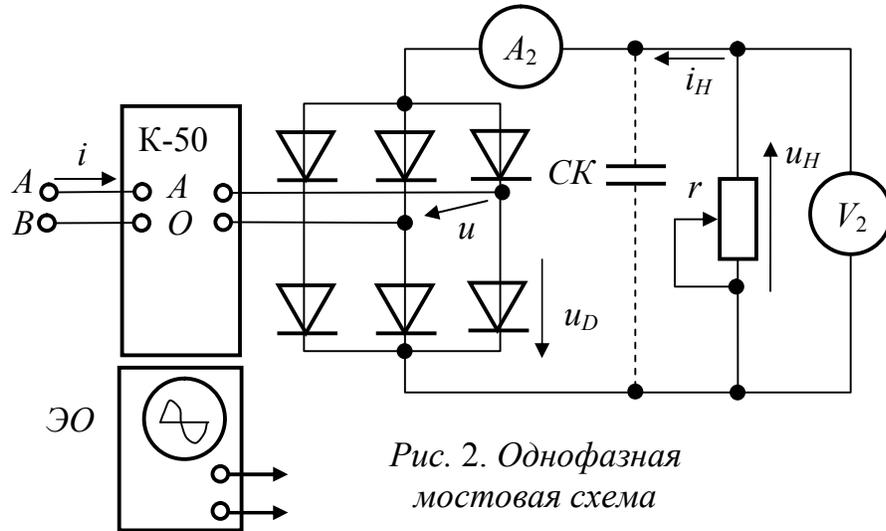


Рис. 2. Однофазная мостовая схема

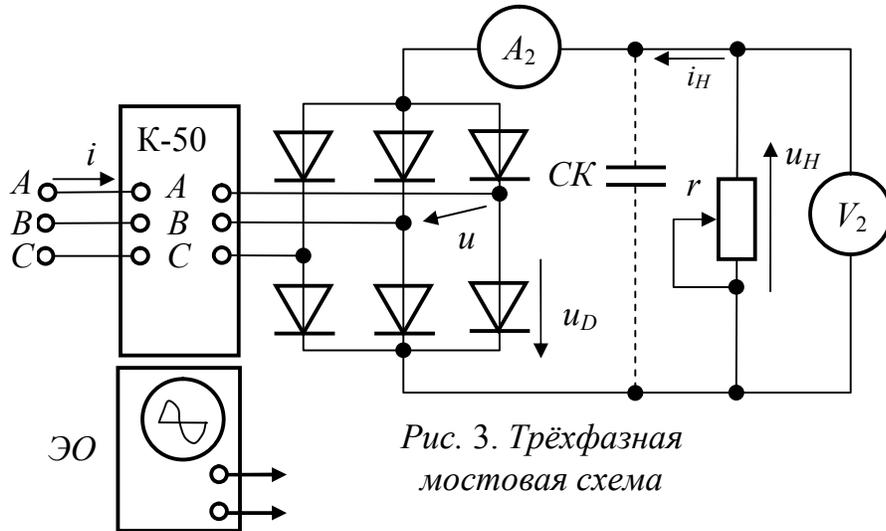


Рис. 3. Трёхфазная мостовая схема

Таблица 2 Результаты исследования мостовых схем выпрямления переменного тока

Схема выпрямления	Измерено						Вычислено			
	U, B	I, A	$P, Вт$	$U_{Нсп}, B$	$I_{Нсп}, A$	U_{Dm}, B	$k_{сх}$	$\frac{U_{Dm}}{U_{Нсп}}$	$\frac{I}{I_{Нсп}}$	$\cos \varphi$
Однофазная мостовая без СК										
Однофазная мостовая с СК										
Трёхфазная мостовая без СК										
Трёхфазная мостовая с СК										

Выводы по работе:

Группа

Отчет

Ф.И.О.

о лабораторной работе № 16 «Исследование четырехполосника»

Цель работы: определение коэффициентов основных уравнений пассивного четырехполосника по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания, расчет параметров схем его замещения и характеристических параметров, экспериментальная проверка правильности определения коэффициентов четырехполосника при активной и ёмкостной нагрузке.

Собираю схему и выполняю опыт холостого хода четырехполосника.

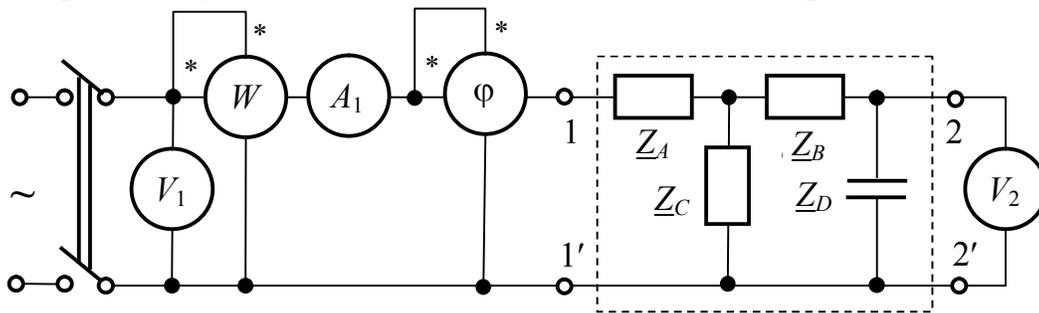


Схема четырёхполосника в режиме холостого хода при питании его со стороны входных зажимов

Таблица 1 Исследование четырехполосника в режимах холостого хода и короткого замыкания

Питание подведено к зажимам	Режим	Измерено				Вычислено				
		B	A	Bm	B, A	Om	Om	Om	Om	град. с учетом знака угла
1-1'	Холостой ход	U_{1x}	I_{1x}	P_{1x}	U_{2x}	Z_{1x}	r_{1x}	x_{1x}	Z_{1x}	Φ_{1x}
1-1'	Короткое замыкание	$U_{1к}$	$I_{1к}$	$P_{1к}$	$I_{2к}$	$Z_{1к}$	$r_{1к}$	$x_{1к}$	$Z_{1к}$	$\Phi_{1к}$
2-2'	Обратное короткое замыкание	$U_{2к}$	$I_{2к}$	$P_{2к}$	$I_{1к}$	$Z_{2к}$	$r_{2к}$	$x_{2к}$	$Z_{2к}$	$\Phi_{2к}$
2-2'	Обратный	U_{2x}	I_{2x}	P_{2x}	U_{1x}	Z_{2x}	r_{2x}	x_{2x}	Z_{2x}	Φ_{1x}

	холостой ход								
--	-----------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Заменяю в схеме вольтметр V_2 амперметром A_2 , выполняю опыт короткого замыкания.

Поменяв местами зажимы 1-1' и 2-2', при том же напряжении питания U_1 выполняю опыт обратного короткого замыкания, а снова заменив амперметр A_2 вольтметром V_2 , выполняю опыт обратного холостого хода.

Результаты измерений занесу в табл.1.

По опытным данным определяю параметры четырехполюсника (табл.1).

Убеждаюсь в справедливости соотношения $\frac{Z_{1x}}{Z_{1k}} = \frac{Z_{2x}}{Z_{2k}}$:

По комплексным сопротивлениям Z_{1x} , Z_{1k} и Z_{2k} вычисляю коэффициенты четырехполюсника и с их помощью определяю параметры Т- и П-образных схем замещения. Расчёт прилагается.

Рассчитываю характеристические параметры четырехполюсника. Расчёт прилагается.

Восстанавливаю схему прямого питания четырехполюсника и на его выход кроме вольтметра V_2 включаю реостат и амперметр A_2 . Результаты измерений и вычислений занесу в табл. 2.

Вместо реостата нагружаю четырёхполюсник конденсатором и повторяю измерения и вычисления, предусмотренные табл. 2.

Сравниваю экспериментальные и расчётные значения напряжения и тока на входе четырёхполюсника для двух опытов табл. 2 и делаю вывод о точности экспериментального определения коэффициентов четырёхполюсника.

Таблица 2 Экспериментальная проверка точности определения коэффициентов четырёхполюсника

Характер нагрузки	Измерено				Вычислено	
	I_1, A	I_2, A	U_1, B	U_2, B	U_1, B	I_1, A
R						
C						

Выводы по работе: