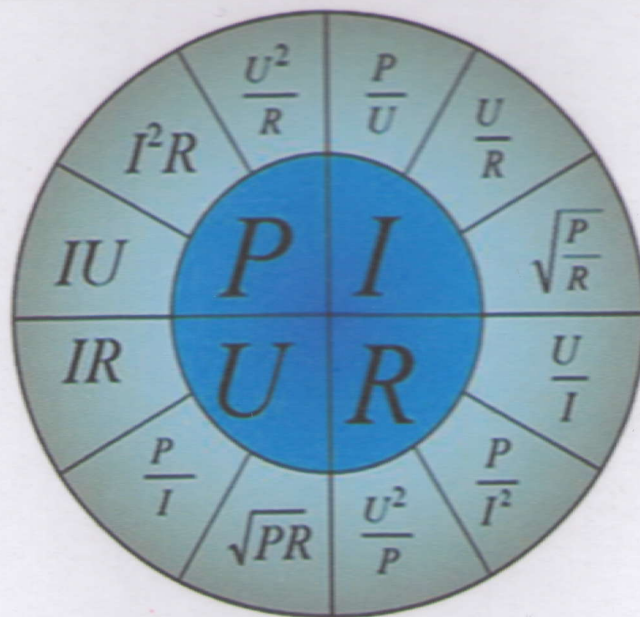


А.Б. БАКАСОВА
Н.Т. НИЯЗОВ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методическое пособие к выполнению
лабораторных работ



Бишкек 2019

УДК 621.3.013 (078.5)

ББК 31.21

Б 19

Утверждена в печать редакционно – издательским советом секции технических наук Министерства образования и культуры Кыргызской Республики и Ученым Советом КГТУ им. И. Раззакова

Рецензенты: канд.техн.наук., профессор КГТУ К.А. Сатаркулов
д-р.техн.наук., профессор И.В. Брякин
глав. инженер «Камбаратинские ГЭС» С.Б. Абдырасулов

А.Б. Бакасова, Н.Т. Ниязов

Б 19 Теоретические основы электротехники. Учебное пособие к выполнению лабораторных работ по предмету «Теоретические основы электротехники» предназначено для студ. вузов техн. спец. по направлению 640200 «Электроэнергетика и электротехника». / Кырг. государ. технический университет. – Б.: Технологический парк, ИЦ «Текник», 2019. – 90с.

ISBN 978-9967-467-89-7

Приведены описания 12 лабораторных работ. Дана подробная информация о необходимом лабораторном оборудовании, применительно к которому составлены описания. Порядок выполнения каждой работы сопровождается краткими теоретическими сведениями, необходимыми для понимания цели работы, способов ее достижения и смысла полученных результатов, а также список необходимой литературы.

Б 2202010000-18

ISBN 978-9967-467-89-7

УДК 621.3.013 (078.5)

ББК 31.21

©Бакасова А.Б.,
Ниязов Н.Т., 2019

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Лабораторные работы являются неотъемлемой составной частью курса теоретических основ электротехники.

Они ставят своей целью:

1. Ознакомить студентов с элементами реальных электрических цепей и процессами, происходящими в них;
2. Обучить умению и навыкам обращения с измерительной аппаратурой и техники эксперимента;
3. Научить обобщать и оформлять результаты эксперимента, связать теорию с практикой – подтвердить опытом положение теории;
4. Привить навыки лабораторных исследований на производстве и умение разбираться в их результатах;
5. Воспитывать навыки в научно – исследовательской работы и обучить её методике.

Лабораторные занятия требуют от студентов ещё большей самостоятельности и активности, чем практические.

До начала лабораторных работ каждый студент обязан усвоить правила техники безопасности и строго соблюдать их.

При подготовке к выполнению лабораторной работы студент должен:

1. Ознакомиться с теорией исследуемого вопроса.
2. Четко представить себе методику проведения эксперимента.
3. Заготовить себе бланк протокола проведения лабораторной работы.

К очередной лабораторной работе допускаются студенты, представившие оформленный отчёт по предыдущей работе и показавшие достаточную подготовленность к предстоящей.

Выполнение лабораторной работы

Проведение лабораторной работы студентом начинается со знакомства с оборудованием лабораторной установки.

Перед тем, как приступить к сборке схемы, необходимо убедиться в том, что сеть отключена. Измерительные приборы и оборудование соответствует указаниям описания.

При сборке электрической цепи и работе с нею необходимо придерживаться следующего порядка:

1. Сборка цепи должна проводиться *при разомкнутых* рубильниках и отключенных автоматах.
2. Вначале необходимо выполнить сборку силовой – токовой части цепи (источники питания, сопротивления, амперметры, токовые обмотки ваттметров и фазометров), затем подключить вольтметры, обмотки напряжения ваттметров или фазометров и т.д.
3. По окончанию сборки цепи необходимо:
 - вывести движки ЛАТРа на нулевое положение;
 - движки регулируемых реостатов поставить в положение, соответствующее наибольшим сопротивлениям (за исключением случаев, специально оговоренных в описаниях лабораторных работ);
 - проверить соответствие пределов измерения измерительных приборов ожидаемым величинам токов и напряжений, откорректировать нулевое положение стрелок.
4. Источники питания можно подключить только *после проверки собранной цепи преподавателем работ*.
5. Всекие пересоединения в цепи в ходе работ должны выполняться при отключенном питании. После каждого пересоединения электрическая цепь должна быть заново проверена преподавателем.
6. При любой неисправности, замеченной в работе оборудования, следует *немедленно отключить питание* и сообщить об преподавателю.
7. В ходе работы **запрещается** покидать рабочее место, не отключив цепь от источника питания.

Проведение эксперимента начинается с предварительного испытания. При этом, изменяя в заданных пределах напряжение источника, сопротивления нагрузки и т.д., необходимо проследить за качественным характером исследуемого процесса, проверить правильность включения и выбора измерительных приборов, реостатов, ёмкостей и т.д.

После предварительного проверочного испытания необходимо провести окончательный эксперимент с записью результатов измерений.

Замеры рекомендуется проводить через равные промежутки, на которые делится весь диапазон измерений исследуемой величины.

По окончании каждого этапа лабораторной работы до разборки или изменения цепи следует показать преподавателю результаты с тем, чтобы при необходимости можно было повторить эксперимент.

Разборку цепи следует производить с разрешения преподавателя и при полном подключении цепи от источника питания.

Оформление отчёта

Отчет по выполненной работе составляется каждым студентом в тетради для лабораторных работ или на отдельных листах. В последнем случае возможно оформление отчета на компьютере.

Отчет должен включать в себя:

- титульный лист, на котором указывается наименование института и лаборатории, номер и наименование лабораторной работы, фамилия и инициалы студента, номер его группы;
- цель работы;
- схемы исследуемых в работе электрических цепей, расчетные формулы, таблицы с результатами измерений и вычислений, графики и диаграммы, иллюстрирующие результаты эксперимента.

Схемы и таблицы должны быть вычерчены аккуратно. Таблицы должны иметь необходимое число столбцов и строк, определяемое заданием. В таблицах указываются принятые обозначения измеряемых и вычисляемых величин и их размерность в системе СИ (таблица 1).

Таблица 1

Измерено					Вычислено				
U_0	I	U_1	U_2	φ	Z	R	X	L	C
B	A	B	B	град.	Ω	Ω	Ω	$гн$	ϕ

Силовые цепи на схемах вычерчиваются толстыми линиями, цепи напряжения и ваттметров – тонкими (рис. 1).

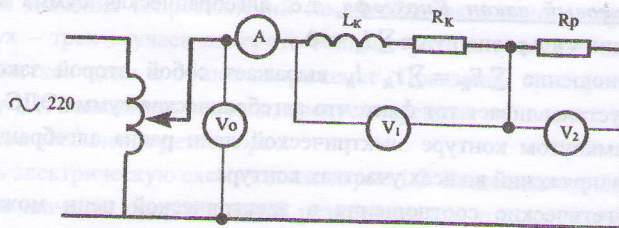


Рис. 1 Испытательная схема

Графики и векторные диаграммы следует вычерчивать на миллиметровой бумаге. В конце отчета необходимо провести краткие выводы, сделанные на основании полученных экспериментальных данных.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЫХ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: Исследование распределения напряжений и токов при последовательном, параллельном и смешанном соединении сопротивлений, опытная проверка законов Ома и Кирхгофа.

Теоретические сведения

Основная задача анализа работы электрической цепи заключается в определении токов, напряжений и мощностей ветвей цепи по заданному их сопротивлению или проводимостям и напряжению источника питания.

Резистор – это структурный элемент электрической цепи, основное назначение которого оказывать известное (номинальное) сопротивление электрическому току, например, для регулирования тока и напряжения. В электроустановках резисторы применяются в качестве нагрузочных и пускорегулируемых реостатов добавочных сопротивлений к некоторым электроприемникам, электроизмерительным приборам и др. Электрические цепи и их участки могут состоять из соединенных различно между собой электроприемников или резисторов: последовательно, параллельно и смешанно.

Токи и напряжения в ветвях электрической цепи определяются составлением и решением системы уравнений по законам Кирхгофа.

Для любого узла на основании принципа непрерывности тока может быть записан первый закон Кирхгофа, т.е. алгебраическая сумма токов ветвей образующих узел равно нулю $\sum I_k = 0$.

Соотношение $\sum E_k = \sum r_k \cdot I_k$ выражает собой второй закон Кирхгофа, который устанавливает тот факт, что алгебраическая сумма ЭДС источников в любом замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений во всех участках контура.

Энергетические соотношения в электрической цепи можно получить, применяя закон Джоуля – Ленца. В цепи источник расходует энергию, переходящую в сопротивлениях в тепло. При переносе количества электричества за время dt источником совершается работа $dA = U \cdot dq$. Мощность $P = dA/dt = U \cdot dq/dt = U \cdot I = r \cdot I^2 = q \cdot U^2$ (закон Джоуля – Ленца).

Помимо этого, общего метода применяются вытекающие из тех же законов другие методы, дающие в некоторых случаях менее громоздкие решения за счет упрощения цепи или расчленения задачи на ряд более простых задач.

В частности, при расчете электрической цепи с одним источником электрической энергии при смешанном соединении приемников, представляющим собой сочетание последовательного и параллельного соединения, применяется *метод преобразования*. Этот метод заключается в замене участков сложной цепи более простыми, или эквивалентными, т.е. не вызывающими изменения напряжения и токов в остальной части цепи.

Рассмотрим применение этого метода к различным видам соединения приемников.

Приборы и оборудование

1. Источник постоянного тока на номинальное напряжение 12 и 24В и ток до 12А.
2. Лабораторные проволочные реостаты – 3 шт.
3. Амперметр магнитоэлектрической системы типа М109 до 5А – 3 шт.
4. Вольтметры – 3 шт.
5. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

Последовательное соединение резисторов.

1. Собрать электрическую схему согласно рис.1.1 и представить ее на проверку. Установить движки реостатов в положение наибольших сопротивлений. Включить питание.
2. Изменяя значения сопротивлений так, чтобы ток в цепи не превышал 5А, для двух – трех случаев измерить вольтметром напряжение на каждом из двух участков цепи и общее напряжение. Показания приборов записать в таблицу 1.1. Выполнить расчеты, предусмотренные таблицей 1.1

Параллельное соединение резисторов.

1. Собрать электрическую схему согласно рис.1.2. Включить питание.
2. Изменяя значения сопротивлений резисторов для трех случаев, наблюдать показания амперметров и вольтметра, соблюдая условие, чтобы общий ток в цепи не превышал 5А. Показания приборов записать в таблицу 1.2. Выполнить расчеты, предусмотренные таблицей 1.2.

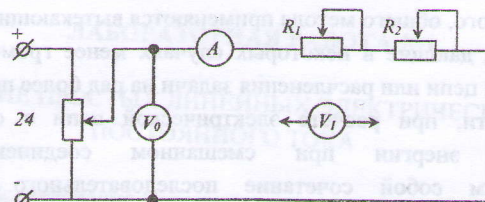


Рис 1.1 Последовательное соединение резисторов

Таблица 1.1

№ п/п	Данные наблюдений				Данные расчетов				
	I	U_1	U_2	$U_{\text{общ}}$	R_1	R_2	$R_{\text{об.расч}}$	$R'_{\text{об.расч}}$	$U_{\text{об.расч}}$
1									
2									
3									

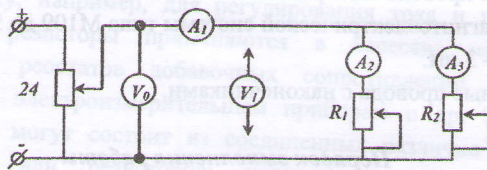


Рис 1.2 Параллельное соединение резисторов

Таблица 1.2

№ п/п	Данные наблюдений				Данные расчетов				
	I_1	I_2	$I_{\text{общ}}$	U_0	$I_{\text{об.расч}}$	R_1	R_2	$R_{\text{об.расч}}$	$R'_{\text{об.расч}}$
1									
2									
3									

Смешанное соединение резисторов.

- Используя все три резистора, собрать электрическую схему согласно рис.1.3. Включить питание.

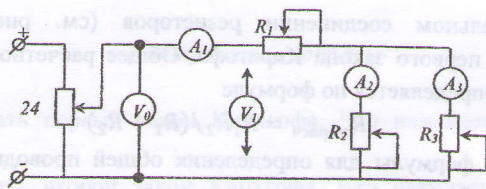


Рис 1.3 Смешанное соединение резисторов

2. Изменяя значения сопротивлений резисторов, для трех случаев записать в таблицу 1.3, показания амперметров и вольтметра. Выполнить расчеты, предусмотренные таблицей 1.3.

Таблица 1.3

№ п/п	Данные наблюдений							Данные расчетов				
	I_1	I_2	$I_3 = I_{\text{общ}}$	U_1	U_2	U_3	$U_{\text{об}}$	R_1	R_2	R_3	$R_{\text{эquiv}}$	$R_{\text{об,расч}}$
1												
2												
3												

Методические указания к проведению работы и выполнению расчетно – графической части

1. Сопротивление каждого участка цепи определяется по закону Ома $R = U/I$, сопротивление всей цепи – по формуле $R'_{\text{об,расч}} = U_{\text{об}}/I$. Расчетное сопротивление всей цепи при последовательном соединении определяется по формуле

$$R_{\text{об,расч}} = R_1 + R_2$$

Общее напряжение определяется по формуле

$$U_{\text{об,расч}} = U_1 + U_2$$

При последовательном соединении резисторов (см. рис.1.1) проверяется справедливость второго закона Кирхгофа

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2$$

Полученные расчетом значения $R_{\text{об,расч}}$ и $U_{\text{об,расч}}$ должны совпадать с величинами $R'_{\text{об,расч}}$ и $U_{\text{об}}$. Небольшое различие может быть вследствие погрешностей при измерениях.

2. При параллельном соединении резисторов (см. рис.1.2) проверяется справедливость первого закона Кирхгофа. Общее расчетное сопротивление в данном случае определяется по формуле

$$R_{\text{об.расч}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

вытекающей из формулы для определения общей проводимости как суммы проводимостей участков цепи.

$$\frac{1}{R_{\text{об.расч}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Эквивалентное сопротивление можно также определить по закону Ома $R_{\text{эkv}} = U/I_{\text{общ}}$. Оба значения должны совпадать.

3. По данным таблицы 1.2 можно проверить правило, согласно которому токи в ветвях обратно пропорционально их сопротивлениям, т.е. $I_1/I_2 = R_2/R_1$

4. Общее сопротивление R вычисляется по формуле

$$R_{\text{об.расч}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

5. При заполнении таблиц 1.1–1.3 в графу «Данные расчетов» необходимо в отчете привести по одному примеру выполненных вычислений.

6. В отчете укажите, как влияет изменение величины одного из сопротивлений параллельных ветвей при смешанном соединении резисторов на перераспределение токов и напряжений на участке цепи. Например, при уменьшении величины сопротивления резистора R_2 в два раза уменьшается общее сопротивление участка параллельных ветвей R_2, R_3 и соответственно эквивалентное сопротивление источника питания. Тогда увеличится значение общего тока и ток на участке с резистором R_1 и напряжение между его выводами, в то же время ток в ветви с резистором R_3 и напряжение на его выводах уменьшится. Таким образом, при смешанном соединении резисторов в данной лабораторной работе практически проверяется справедливость законов Ома и Кирхгофа.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать первый закон Кирхгофа. Что называется электрическим узлом?
2. Сформулировать второй закон Кирхгофа. Что называется электрическим контуром?
3. Как распределяются напряжения и мощности на каждом из участков цепи, соединенных последовательно?
4. Как распределяются токи, напряжения и мощности на каждом из участков цепи, соединенных параллельно?
5. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи при смешанном соединении?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью данной работы является исследование режимов работы линии передачи электрической энергии постоянного тока, имеющей сосредоточенную нагрузку в конце.

Теоретические сведения

В процессе передачи и распределения электрической энергии большое значение имеет фактор потери напряжения в проводах, что связано с непроизводительной потерей энергии, оцениваемой обычно величиной «потери мощности». В результате потери напряжения в линии напряжение у приемников электрической энергии может оказаться недостаточным для нормальной работы. Мощность электроприемников, работающих на тепловом принципе (лампы накаливания, нагревательные приборы), пропорциональна квадрату подведенного к ним напряжения, поэтому снижение напряжения резко оказывается на световой отдаче ламп накаливания, неудовлетворительно работают электротермические установки (электропаяльник, электропечи и др.). У электродвигателей, работающих на пониженном напряжении, снижается частота вращения вала, уменьшается способность выдерживать кратковременные перегрузки. Согласно «Правилам устройства электроустановок» допустимая потеря напряжения в осветительных линиях распределительных электросетей не должна превышать 2,5%, а в силовых (питающих электродвигатели) – 5% номинального напряжения.

Уменьшение потери напряжения и потери мощности в линиях электропередачи достигается либо за счет увеличения сечения проводов для уменьшения их сопротивления. При этом возрастает расход цветного металла и удорожается стоимость линии.

Уменьшение силы тока в проводах при передаче электроэнергии достигается за счет применения высокого напряжения, поскольку передаваемая мощность $P = UI$. Расчет показывает, что сечение проводов линии электропередачи обратно пропорционально ее напряжению.

Приборы и оборудование

1. Источник постоянного тока на номинальное напряжение 12 и 24В и ток до 12А.
2. Лабораторные проволочные реостаты – 2 шт.
3. Амперметр магнитоэлектрической системы типа М109 до 5А – 1 шт.
4. Вольтметры – 2 шт.
5. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, изображенную на рисунке 2.1.
2. Исследовать работу линии передачи:
 - а) Режим короткого замыкания;
 - б) Режим рабочий или номинальный;
 - в) Режим холостого хода.

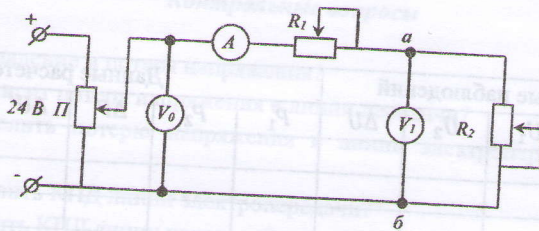


Рис. 2.1 Эквивалентная схема линии электропередачи

Где П – потенциометр, служащий для регулирования входного напряжения;
 R_1 – имитирует собой сопротивления проводов;
 R_2 – сопротивление нагрузки.

Методические указания к проведению работы и выполнению расчетно – графической части

Эквивалентная схема линии передачи показана на рисунке 2.1. Исследование линии электропередачи заключается в определении зависимости потери напряжения, потери мощности нагрузки и КПД линии от величины тока

нагрузки. Для этого линии передачи постоянного тока исследуется для наиболее характерных режимов работы:

- 1) Номинальный или рабочий режим;
- 2) Режим холостого хода;
- 3) Режим короткого замыкания.

Перед подачей на схему напряжения движка реостатов необходимо установить в положение, соответствующее наибольшей величине сопротивления цепи.

Затем, меняя положение движка реостата R_2 , можно добиться различных режимов работы.

При $R_2 > 0$ достигается номинальный или рабочий режим,

при $R_2 = 0$ режим короткого замыкания,

$R_2 = \infty$ режим холостого хода, т.е. когда внешняя цепь разомкнута.

Потенциометром регулируется напряжение так, чтобы в линии ток не превышал максимально допустимого значения тока включенных схему приборов и реостатов. В ходе опытов записывают показания приборов в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Данные наблюдений				Данные расчетов					
	I	U_1	U_2	ΔU	P_1	P_2	ΔP	$\Delta U'$	$\Delta P'$	η
1										
2										
3										

На основании опытных данных и расчетных данных строятся кривые:

$$V = f(I); P_1 = f(I); P_2 = f(I); \Delta U = f(I); \eta = f(I).$$

где: I — ток в линии электропередачи;

U_1 — напряжение в начале линии;

U_2 — напряжение в конце линии;

P_1 и P_2 — мощность в начале и конце линии;

η — КПД линии электропередачи;

ΔU — потеря напряжения.

1. Потеря напряжения в испытуемой линии определяется как разность показаний вольтметров, включенных в начале и конце линии. Эту же величину расчетным путем определяют по формуле $\Delta U = IR_{\text{пров}}$, где $R_{\text{пров}}$ — сопротивление обоих проводов линии.

Потеря мощности в проводах ЛЭП из опытных данных определяется по формуле

$\Delta P = P_1 + P_2$, где $P_1 = U_1 I$ и $P_2 = U_2 I$ или $\Delta P = (U_1 - U_2) I$, а расчетным путем по формуле $\Delta P' = I^2 R_{\text{пров}}$

2. Коэффициент полезного действия ЛЭП определяется как отношение мощности, отдаваемой электроприемникам (в конце линии), к мощности поступающей в линию, или так же как отношение напряжения в конце линии к напряжению в начале ее по формуле $\eta = P_2/P_1 = U_2/U_1$.

3. В отчете по данной лабораторной работе необходимо сделать краткие выводы, отметив технико - экономическое значение факторов потери напряжения и потери мощности в проводах:

- Качество электроэнергии, характеризуемое значениями напряжения у зажимов электроприемников и его допустимыми отклонениями от номинального;
- Непроизводный расход электроэнергии, обусловленный потерей мощности в проводах.

Контрольные вопросы

1. Что такое падение и потеря напряжения?
2. От чего зависит потеря напряжения в линии передачи?
3. Как определить потерю напряжения в линии электропередачи опытным путем?
4. Как определить КПД линии электропередачи?
5. Как увеличить КПД линии передачи?
6. Почему с увеличением длины линии электропередачи необходимо повышать ее рабочее напряжение?
7. Провода, из каких металлов наиболее выгодны для линии электропередачи?
8. При какой величине нагрузочного сопротивления мощность, отдаваемая источником в сеть, наибольшая?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ R , ИНДУКТИВНОСТИ L И ЁМКОСТИ C

Целью данной работы является изучение физических процессов в неразветвленной цепи переменного тока, обладающей индуктивностью и емкостью, приобретение навыков в сборке электрических схем с применением электроизмерительных приборов и управления, а также умение произвести расчеты в цепях переменного тока и построение векторных диаграмм.

Теоретические сведения

Величайшим достижением науки и техники являются радио и телевидение. Радиотехнические устройства применяются не только в системах связи и информации, но также в промышленности, на транспорте, в медицине и многих других областях деятельности человека.

Радиотехнические и некоторые электротехнические устройства работают на основе использования переменного электромагнитного поля, оно характеризуется наличием двух основных физических величин — индуктивности L и электрической емкости C . Электрическая цепь помимо индуктивности и емкости обладает ещё и активным сопротивлением, в котором совершается превращение электрической энергии в теплоту. При переменном напряжении источника питания в цепи имеются три вида электрических сопротивлений:

- Активное сопротивление (резистор) $R = \rho l/S$
- Индуктивное сопротивление (электромагнит) $x_L = \omega L$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота
- Емкостное сопротивление (конденсатор) $x_C = 1/\omega C$.

Напряжение на каждом участке неразветвленной цепи состоящей из R, L и C можно выразить формулами $U_R = IR$; $U_L = Ix_L$; $U_C = Ix_C$.

Сила тока в такой цепи определяется формулой:

$$I = U / \sqrt{R^2 + (x_L + x_C)^2} = U/Z$$

где U — напряжение, приложенное к цепи;

I — ток в цепи;

Z — полное сопротивление цепи.

При этом полное сопротивление эквивалентной неразветвленной цепи переменного тока вычисляется по формуле:

$$Z = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x_L - \sum x_C)^2}$$

где $\sum r$ — активное сопротивление цепи, равное сумме активных сопротивлений отдельных участков;

$\sum x_L$ — индуктивное сопротивление цепи;

$\sum x_C$ — емкостное сопротивление цепи.

Если известна активная мощность P , то активное сопротивление цепи может быть вычислено по формуле:

$$r = P/I^2$$

Реактивное сопротивление всей цепи определяется разностью суммарных сопротивлений индуктивного и емкостного

$$x = \sum x_L - \sum x_C$$

При известных значениях полного и активного сопротивлений оно может быть найдено непосредственно по формуле:

$$x = \sqrt{Z^2 - (\sum r)^2}$$

В цепях переменного тока наличие потребителей, обладающих индуктивностью и емкостью, обуславливают сдвиг фаз между током и напряжением. От величины сдвига фаз ($\cos \varphi$) зависит потребляемая мощность, ток в цепи, а также технико-экономические показатели работы установки в целом (КПД, мощность потерь энергии в проводах и др.).

Кажущаяся (полная) мощность цепи для любого режима работы цепи:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Активная мощность

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R = I^2 \sum_1^n R = \sum_1^n P$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 x = I^2 \left(\sum_1^n x_L - \sum_1^n x_C \right) = \sum_1^n Q_L - \sum_1^n Q_C$$

При обработке экспериментальных данных можно пользоваться расчетными формулами непосредственно по опытным данным.

Приборы и оборудование

1. Источник питания – сеть переменного тока промышленной частоты 50Гц напряжением 220В.
2. Лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР.
3. Электромагнит с разъемным магнитопроводом и обмоткой рассчитанный на напряжение 220В.
4. Батарея статических конденсаторов общей емкостью 20мкФ.
5. Амперметр электромагнитной системы типа Э8027.
6. Вольтметр электромагнитной системы типа Э378.
7. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, содержащую последовательно включенные катушку индуктивности, емкость и активное сопротивление, по схеме рис.3.1.

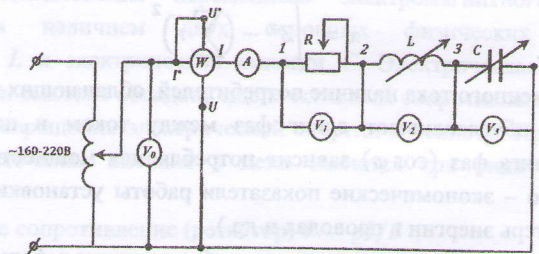


Рис.3.1 Испытательная электрическая цепь

2. Исследовать работу цепей, поочередно оставляя по одному сопротивлению, результаты замеров внести в таблицу 3.1:
 - цепь с активным сопротивлением, когда $x_L = 0$ закорачивая клеммы 2-3 и $x_C = 0$ закорачивая клеммы 3-4.
 - цепь с индуктивной катушкой, когда $R = 0$ закорачивая клеммы 1-2 и $x_C = 0$ закорачивая клеммы 3-4;
 - цепь с емкостью, когда $R = 0$ закорачивая клеммы 1-2 и $x_L = 0$ закорачивая клеммы 2-3;

Таблица 3.1

№ п/п	Участок цепи	Данные наблюдений			Данные расчетов								
		<i>I</i>	<i>U</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>X_L</i>	<i>X_C</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>U</i>	<i>U_C</i>	<i>U_L</i>	<i>cosφ</i>
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>BA</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Гн</i>	<i>Ф</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	
1	Реостат					-	-	-	-		-	-	
2	Катушка												
3	Конденсатор					-	-						

3. По данным таблицы 3.1. построить для всех случаев векторные диаграммы токов и напряжений в масштабе.

4. Исследовать работу цепи при следующих режимах и результаты замеров внести в таблицу 3.2

- $x_C = 0$, закорачивая клеммы 3–4 изменяя произвольно R и x_L произвести два замера;
- $x_L = 0$, закорачивая клеммы 2–3 изменяя произвольно R и x_C произвести два замера;
- Рассмотреть два режима:
 - а) $x_L > x_C, x > 0, \varphi > 0$
 - б) $x_L < x_C, x < 0, \varphi > 0$

По данным таблицы 3.2. построить для всех случаев векторные диаграммы токов и напряжений в масштабе.

По указанию преподавателя построить треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей.

Таблица 3.2

№ п/п	Элем. электр. цепи	Измерено						Вычислено										
		<i>U₀</i>	<i>U₁</i>	<i>U₂</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>X_L</i>	<i>X_C</i>	φ	<i>cosφ</i>	<i>Q</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>L</i>	
		<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>град</i>	<i>cosφ</i>	<i>Вар</i>	<i>ВА</i>	<i>Ф</i>	<i>Гн</i>
1	R, L	<i>a</i>																
	C=0	<i>b</i>																
2	R, C	<i>a</i>																
	L=0	<i>b</i>																
3	RLC	<i>a</i>																
		<i>b</i>																
		<i>в</i>																

Методические указания к проведению работы и выполнению
расчетно – графической части

Расчеты величин, указанных в таблице 3.1. выполняются по формулам:

$$R = P/I^2; z = U/I; \cos \varphi = P/(UI); x_L = Z \sin \varphi$$

или $x_L = \sqrt{Z^2 - R^2}; L = x_L/\omega$, где $\omega = 2\pi f$.

$$C = 1/(x_C \omega); U = IR; U_L = Ix_L; U_C = Ix_C$$

Сдвиг фаз между точками и входным напряжением определяется соотношением:

$$\varphi = \arctg x / \sum r$$

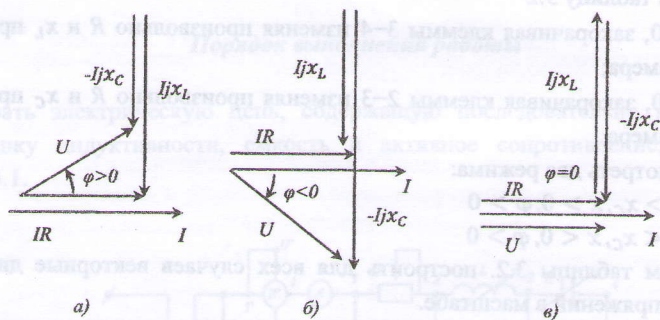


Рис.3.2 Режимы работы электрических цепей

а) $\varphi > 0$, при $x > 0$, при $\sum x_L > \sum x_C$ – цепь носит индуктивный характер (рис.3.2.а);

б) $\varphi < 0$, при $x < 0$, при $\sum x_L < \sum x_C$ – цепь носит емкостной характер (рис.3.2.б);

в) $\varphi = 0$, при $x = 0$, при $\sum x_L = \sum x_C$ – такой режим работы цепи носит название резонанса напряжений (рис.3.2 в).

Контрольные вопросы

1. Чему равен эквивалентное сопротивление цепи при последовательном соединении приемников энергии?
2. Как определить модель комплекса сопротивления, вещественную и мнимую часть, аргумент?
3. Чему равны кажущаяся (полная), активная и реактивная мощности для отдельных участков цепи, для всей цепи?
4. Векторные диаграммы для индуктивного и емкостного режима работы цепи?
5. Как построить векторные диаграммы напряжений для исследуемых цепей по показаниям приборов?
6. Как с помощью векторной диаграммы можно определить параметры элементов схем замещения реальных приемников электрической энергии?
7. По каким приборам можно определить, что в цепи наблюдается резонанс?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ R, ИНДУКТИВНОСТИ L И ЁМКОСТИ C

Целью данной работы является изучение сущности процессов, происходящих при обмене реактивной энергией в системе «генератор – электроприемник» и экспериментальное определение основных параметров и величин, характеризующих работу электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении приемников энергии.

Теоретические сведения

Многочисленные потребители электрической энергии, питаемые от источников переменного тока – электродвигатели, характеризуются вследствие индуктивности их обмоток наличием *реактивной энергии*, обмениваемой между источником питания и потребителем, характеризующейся значением реактивной мощности $Q=UI\sin\varphi$. При этом в цепи имеет место сдвиг фаз между током и напряжением.

Полная мощность $S=UI$, ВА, передаваемая электроприемникам, состоит из двух составляющих: активной мощности $P=UI\cos\varphi$, Вт (электрическая энергия преобразуется в теплоту и механическую работу) и реактивной: $Q=UI\sin\varphi$, ВА_р (энергия обменивается между генератором и электроприёмником), причем $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, ВА. Реактивная энергия поступает в обмотку электромагнита в процессе нарастания тока и запасается в его магнитном поле, но в следующую четверть периода по мере убывания силы тока (и магнитного потока) возвращается к генератору.

Коэффициент мощности $\cos\varphi=P/S$ характеризует долю активной мощности в составе полной мощности. Чем ниже $\cos\varphi$, тем хуже технико – экономические показатели работы установки: снижается к.п.д., увеличиваются потери энергии в проводах, увеличивается при одной и той же мощности загрузка генераторов и трансформаторов током. Уменьшение величины реактивной мощности при неизменном значении активной мощности означает *повышение коэффициента мощности*.

При $Q=0$, $\cos\varphi=1$.

- Снижение реактивной мощности в системах электроснабжения при отстающем по фазе токе возможно методом компенсации её реактивной

мощностью при опережающем токе (отрицательный сдвиг фаз) в цепи конденсаторов, подключенных параллельно индуктивной нагрузке (асинхронные электродвигатели, трансформаторы, электромагнитные аппараты).

Повышение коэффициента мощности, согласно уравнению $P=UI\cos\varphi$ при U и $I=const$, приводит к уменьшению значения тока во всех звеньях системы электроснабжения (генератор электростанции, понижающие и повышающие трансформаторы, линии электропередачи) и следовательно, к уменьшению потерь активной энергии (мощности) на нагревание проводников. Таким образом, повышение коэффициента мощности путем компенсации реактивной мощности имеет важное технико – экономическое значение для народного хозяйства.

Приборы и оборудование

1. Источник питания – сеть переменного тока промышленной частоты 50Гц напряжением 220В.
2. Лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР.
3. Электромагнит с разъемным магнитопроводом и обмоткой рассчитанной на напряжение 220В.
4. Батарея статических конденсаторов общей емкостью 20мкФ.
5. Амперметр электромагнитной системы типа Э8027.
6. Вольтметр электромагнитной системы типа Э378.
7. Ваттметр ферродинамической системы типа Д50043.
8. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, содержащую параллельно включенные катушку индуктивности, емкость и активное сопротивление, по схеме рис. 4.1.
2. Исследовать следующие режимы работы схемы, поочередно отключив по одному сопротивлению, результаты замеров внести в таблицу 4.1.
 - активная проводимость $q=0$;
 - индуктивная проводимость $b_L=0$;
 - емкостная проводимость $b_C=0$;
 - включены все три сопротивления $\cos\varphi\neq 0$;

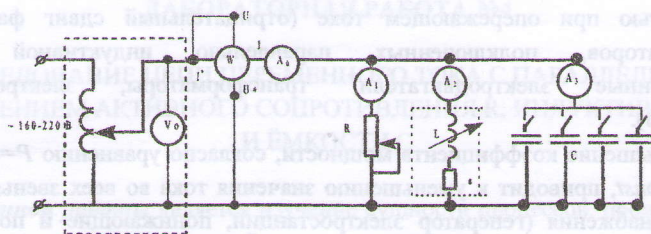


Рис 4.1 Испытательная электрическая цепь

Примечание: для получения проводимости равной нулю, отключается соответствующая ветвь.

3. По данным таблицы определить параметры цепи, активную реактивную и кажущуюся (полную) мощности, построить векторные диаграммы для всех режимов работы цепи.

По указанию преподавателя построить треугольники токов, проводимостей и мощностей.

Таблица 4.1

№	Элемент электр. цепи	ИЗМЕРЕНО					ВЫЧИСЛЕНО															
		V ₀	I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	P	q	b	y	φ	φ	Q _L	Q _C	Q	S	r	z	X _L	X _C	C	
		В	А	А	А	А	Вт	сим	сим	сим	cos	град	вар	вар	вар	ВА	Ом	Ом	Ом	Ом	Ф	
1	R, L C=0																					
2	R, C L=0																					
3	R, L, C																					

Методические указания к проведению работы и выполнению расчетно – графической части.

1. Известно, что при параллельном соединении двух или более приемников электрической энергии они находятся под действием одного и того же напряжения U . При различных значениях проводимостей отдельных ветвей b_L и b_C токи в этих ветвях также будут различны. Общий ток всей группы приемников может быть найден по формуле:

$$I = \sqrt{I_A^2 + (I_L - I_C)^2}, \text{ а полная проводимость находится по формуле:}$$

$$y = \sqrt{q^2 + (b_L - b_C)^2}; \quad \cos \varphi = \frac{q}{y}; \quad \text{или} \quad \cos \varphi = \frac{I_a}{I};$$

где I – полный ток;

I_a – ток в первой ветви обладающей проводимостью q ;

I_L – ток во второй ветви, обладающей индуктивной проводимостью b_L ;

I_C – ток в третьей ветви, обладающей емкостной проводимостью b_C ;

$q = 1/R$ – активная проводимость;

$b_L = 1/X_L$ – индуктивная проводимость;

$b_C = 1/X_C$ – емкостная проводимость;

2. Расчетные величины для записи в таблице определяются по следующим формулам:

$$\cos \varphi = P / (UI); \quad x_L = U \sin \varphi_L / I_L; \quad x_C = U / I_C;$$

$$C = 1 / (\omega x_C); \quad Q_L = UI_L \sin \varphi_L; \quad Q_C = UI_C;$$

$$R = P_L / I^2; \quad Q = Q_L - Q_C;$$

3. Векторные диаграммы токов для трех случаев: $I_L \sin \varphi_L > I_C$; $I_L \sin \varphi_L = I_C$; $I_L \sin \varphi_L < I_C$; показаны на рисунке 4.2.

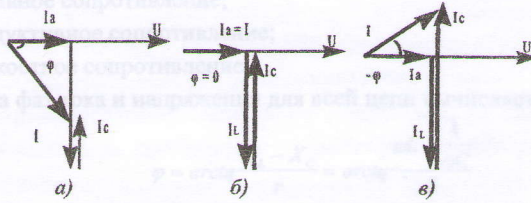


Рис. 4.2. Векторные диаграммы для цепи при параллельном соединении катушки индуктивности и батареи конденсаторов:

а) $I_C < I_L$; б) $I_C = I_L$; в) $I_C > I_L$


4. Величину емкости конденсаторов по условию $\cos \varphi = 1$ находим по формуле

$$C = I_L \sin \varphi_L / (U \omega), \quad [\Phi]$$

5. В отчете по лабораторной работе необходимо дать заключение о практическом применении конденсаторов в системах электроснабжения на переменном токе, указав, что повышение коэффициента мощности $\cos \varphi$ приводит к уменьшению силы тока в проводах, а следовательно к уменьшению потерь электроэнергии на их нагревание, поскольку $\Delta P = I^2 R_{np}$.

Контрольные вопросы

1. Чему равен комплекс эквивалентной проводимости всей цепи при параллельном соединении приемников энергии?
2. Как определить модуль и аргумент комплекса проводимости, вещественную и мнимую часть?
3. Как определить полную активную и реактивную проводимости цепи, угол сдвига фаз между током и напряжением?
4. Записать законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме для исследуемых цепей.
5. Чему равны кажущаяся, активная и реактивная мощности для отдельных участков и для всей цепи?
6. Как построить векторные диаграммы токов для исследуемых цепей?



№	Элемент электр. цепи	U		I		P		Q		S		φ	cos φ	sin φ	tg φ	ctg φ
		U	<	I	<	P	Q	S	Q	S						
1	RL	U	<	I	<	P	Q	S	Q	S	φ	cos φ	sin φ	tg φ	ctg φ	
2	RC	U	>	I	>	P	Q	S	Q	S	φ	cos φ	sin φ	tg φ	ctg φ	
3	R.L.C.	U	<	I	<	P	Q	S	Q	S	φ	cos φ	sin φ	tg φ	ctg φ	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Целью данной работы является экспериментальное исследование режима резонанса в последовательной цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивность и ёмкость.

Теоретические сведения

Из теории переменных токов известно, что при последовательном соединении активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C ток в цепи вычисляется по формуле

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

где Z – полное сопротивление цепи;

U – напряжение, приложенное к цепи;

R – активное сопротивление;

X_L – индуктивное сопротивление;

X_C – емкостное сопротивление;

Угол сдвига фаз тока и напряжения для всей цепи вычисляется по формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{Z}$$

где ω – угловая частота.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ определяется по формуле: $\cos \varphi = P/S$

где P – активная мощность, равная показанию ваттметра, включенного в цепь,

S – кажущаяся (полная) мощность $S = UI$ [Вт]

При работе цепи возможен случай, когда собственная частота колебательного контура $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ равна частоте колебаний напряжения генератора (в данной работе $f = 50$ Гц), тогда в цепи наблюдается явление **резонанса напряжений**. При этом

$$X_L = X_C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

В этом случае ток совпадает по фазе с напряжением и становится наибольшей и особенно большой при малом активном сопротивлении резистора

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{R}$$

Напряжение на зажимах индуктивности и ёмкости при резонансе напряжений равно по величине, но противоположны по фазе. А общее напряжение сети U уравнивается только падением напряжения на активном сопротивлении:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = U_R$$

В момент резонанса напряжений напряжение U_L на индуктивности и U_C на ёмкости могут оказаться во много раз выше напряжения источника питания U . Поэтому резонанс напряжений для силовых электроустановок и системы электроснабжения представляет явление опасное и поэтому нежелательное.

Однако для колебательных контуров радиотехнических устройств резонанс напряжений необходим и используется для настройки радиоприемных устройств на определенную частоту передатчика с отстройкой от множества других передатчиков. Отношение

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{1/(\omega C)}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R} = Q$$

называется добротностью цепи. Величину α , обратную добротности, называют затуханием:

$$\alpha = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho}$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление цепи.

Величина добротности показывает, во сколько раз падение напряжение на индуктивности или ёмкости превышает напряжение, приложенное к цепи, в режиме резонанса напряжений:

$$U_L/U = U_C/U = Q \text{ или } X_L/R = X_C/R = Q$$

Резонанс напряжений может быть получен путем изменения одной из трех величин – f , L и C .

Приборы и оборудование

1. Источник питания – сеть переменного тока промышленной частоты 50 Гц напряжением 220 В.
2. Лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР.
3. Электромагнит с разъемным магнитопроводом и обмоткой рассчитанный на напряжение 220 В.
4. Батарея статических конденсаторов общей ёмкостью 20 мкФ.
5. Амперметр электромагнитной системы типа Э8027.
6. Вольтметр электромагнитной системы типа Э378.
7. Ваттметр ферродинамической системы типа Д50043.

8. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь, содержащую последовательно включенные катушку индуктивности и емкость, по схеме рис. 5.1.

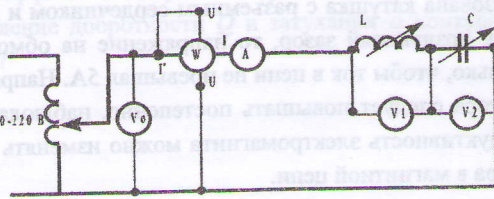


Рис. 5.1. Испытательная электронная цепь

2. Рассмотреть три режима:
 - $X_L > X_C$, $X > 0$, $\varphi > 0$ (до резонанса)
 - $X_L = X_C$, $X = 0$, $\varphi = 0$ **U_{вх} – не более 50В!** (резонанс)
 - $X_L < X_C$, $X < 0$, $\varphi < 0$ (после резонанса)
3. Снять и построить зависимости:

$I, U_L, U_C, \varphi = f(L)$ при $C, U, f = const$.

Зависимости строятся по выполненным выше измерениям.
4. Снять и построить зависимости:

$I, U_L, U_C, \varphi = f(C)$ при $L, U, f = const$.

Результаты наблюдений и вычислений внести в таблицу 5.1.
5. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для случаев:

$X_L > X_C$; $X_L = X_C$; $X_L < X_C$.

Таблица 5.1

№ п/п	Элемент электр. цепи	ИЗМЕРЕНО										ВЫЧИСЛЕНО					
		f	U ₀	U ₁	U ₂	I	P	r	Z	X _L	L	φ	X _C	C	φ	φ	U _L
		Гц	В	В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Г	cos	Ом	Ф	cos	град	В
1	$X_L > X_C$																
2	$X_L = X_C$																
3	$X_L < X_C$																

**Методические указания к проведению работы и выполнению
расчетно – графической части**

1. В настоящей работе режим резонанса получают по схеме (рис. 5.1.) изменением только L и C при постоянном значении f .

2. В схеме на рисунке 5.1, включение электромагнита предусмотрено от автотрансформатора на пониженное напряжение. Если в качестве индуктивной нагрузки использована катушка с разъемным сердечником и в магнитной цепи будет установлен воздушный зазор, то напряжение на обмотке должно быть понижено настолько, чтобы ток в цепи не превышал 5А. Напряжение на выходе автотрансформатора следует повышать постепенно, наблюдая за показаниями амперметра. Индуктивность электромагнита можно изменять путем изменения воздушного зазора в магнитной цепи.

3. Расчеты величин, указанных в таблице 5.1. выполняются по формулам

$$R = P / I^2; \quad z = U / I; \quad \cos \varphi = P / (UI); \quad X_L = Z \sin \varphi$$

$$\text{или } X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad L = X_L / \omega, \quad \text{где } \omega = 2\pi f;$$

$$C = 1 / (X_C \omega); \quad U = IR; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C$$

Общий вид векторных диаграмм показан на рисунке 5.2.

а) $\varphi > 0$, при $X > 0$, при $\sum X_L > \sum X_C$ – цепь носит индуктивный характер нагрузки (рис.5.2 а);

б) $\varphi = 0$, при $X = 0$, при $\sum X_L = \sum X_C$ – такой режим работы цепи носит название резонанса напряжений (рис. 5.2 б);

в) $\varphi < 0$, при $X < 0$, при $\sum X_L < \sum X_C$ – цепь носит ёмкостной характер нагрузки (рис. 5.2 в);

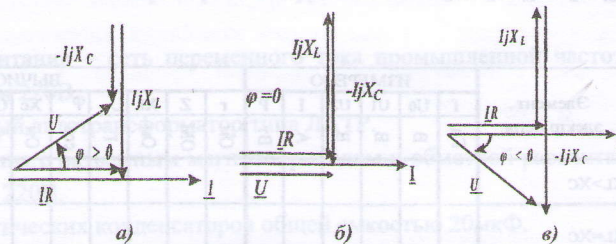
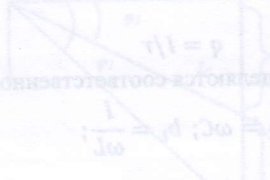


Рис 5.2 Векторные диаграммы

Контрольные вопросы

1. Условие резонанса напряжений.
2. По каким приборам можно определить, что в цепи наблюдается резонанс?
3. Изменением, каких параметров цепи можно добиться резонанса?
4. Где применяется явление резонанса?
5. Чему равен коэффициент добротности резонансного контура?
6. Дайте определение добротности Q и затухания α контура. Как определить эти величины?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы: Экспериментальное исследование режима резонанса в разветвленной цепи переменного тока. Изучение условий и физической сущности явлений, при которых включение конденсаторов параллельно с потребителями энергии приводит к увеличению $\cos \varphi$ установки.

Теоретические сведения

Из теории переменных токов известно, что при параллельном соединении активного сопротивления r , индуктивности L , и емкости C ток в неразветвленной части цепи определяется по уравнению

$$I = U \cdot y = U \sqrt{q^2 + (b_L - b_C)^2}$$

где U — напряжение, приложенное к цепи;

y — полная эквивалентная проводимость цепи;

q — активная проводимость;

b_C — реактивная емкостная проводимость;

b_L — реактивная индуктивная проводимость;

Активная проводимость является обратной величиной активного сопротивления

$$q = 1/r$$

Реактивные проводимости определяются соответственно по формулам

$$b_C = \omega C; \quad b_L = \frac{1}{\omega L};$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Условием возникновения резонанса токов является равенство реактивных проводимостей обеих ветвей

$$b_L = b_C$$

или

$$1/2\pi f L = 2\pi f C$$

при этом, эквивалентная реактивная проводимость

$$b_\omega = b_L - b_C = 0$$

Тогда реактивная составляющая общего тока

$$I_p = U_{взк} = 0$$

и ток в неразветвленной части цепи

$$I = I_\alpha = U q$$

совпадает по фазе с напряжением U . При постоянной частоте f резонанс в цепи может быть достигнут соответствующим подбором индуктивности L или емкости C .

В промышленных электроэнергетических установках явление резонанса токов используется для повышения коэффициента мощности.

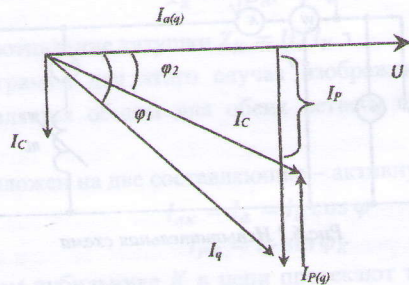
Искусственные меры повышения $\cos \varphi$.

Использование конденсаторов для компенсации реактивной мощности

1. Установка синхронных электродвигателей, которые при большом возбуждении вызывают в цепи опережающий реактивный ток.
2. Включение параллельно к приемникам (двигателям) электрической энергии батареи статических конденсаторов.

После подключения батареи конденсаторов реактивная составляющая тока для двигателей компенсируется емкостным током I_C .

Ток в подводящих проводах уменьшается до значения I , а угол φ_1 уменьшается до φ_2 , а $\cos \varphi$ установки увеличивается. Энергосистема и ЛЭП разгружаются от реактивного тока, что приведет к уменьшению потерь напряжения и экономии электроэнергии.



Полная компенсация реактивной мощности происходит при резонансе токов, получающимся при определенных условиях в цепи колебательного контура, образованного параллельно соединенными катушкой и конденсатором.

Изучение колебательного контура и происходящих в нем резонансных процессов приобретает еще более важное значение, потому что эти процессы лежат в основе работы всех радиоприемных и радиопередающих устройств.

Приборы и оборудование

1. Источник питания – сеть переменного тока промышленной частоты 50Гц напряжением 220В.
2. Лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР.
3. Электромагнит с разъемным магнитопроводом и обмоткой, рассчитанной на напряжение 220В.
4. Батарея статических конденсаторов общей емкостью 20мкФ.
5. Амперметр электромагнитной системы типа Э8027.
6. Вольтметр электромагнитной системы типа Э378.
7. Ваттметр ферродинамической системы типа Д50043.
8. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с приборами и оборудованием, собрать электрическую цепь, содержащую параллельно включенные катушку индуктивности и емкость, по схеме рис.6.1.

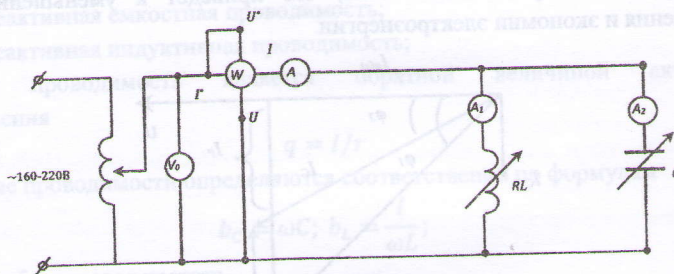


Рис.6.1 Испытательная схема

2. Рассмотреть три режима:
 - $x_{LK} > x_C$
 - $x_{LK} = x_C$
 - $x_{LK} < x_C$
3. Результаты записать в таблицу 6.1.
4. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для всех случаев.

Таблица 6.1

№ п/п	Данные измерений					Данные расчетов									
	I_0	U	I_C	P	f	R_K	Z_K	X_{LK}	C	Q	S	Q_C	X_C	$\cos\varphi$	
	A	B	A	$Вт$	$Гц$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	Φ	$Вар$	$ВА$	$Ом$	$Ом$		
1															
2															
3															

**Методические указания к проведению работы и выполнению
расчетно – графической части**

При отключенном рубильнике K в цепи конденсаторов (рис. 6.1) ток емкости $I_C = 0$, ток в неразветвленной части цепи $I = I_K$, ваттметр покажет мощность, потребляемую катушкой, $P_K = UI_K \cos \varphi_K = I_K^2 r_K$, где φ_K – угол сдвига фаз между током и напряжением катушки, U – напряжение сети, показываемое вольтметром, r_K – активное сопротивление катушки. Отсюда

$$r_K = P_K / I_K^2$$

Реактивное сопротивление катушки

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2},$$

где полное сопротивление катушки $Z_K = U / I_K$

Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 6.2 а. Вектор напряжения, является общим для обеих ветвей, то удобно отложить её по горизонтали.

Вектор тока разложен на две составляющие – активную и реактивную

$$I_{ак} = I_a = I_K \cos \varphi$$

$$I_{рК} = I_K \sin \varphi_K$$

При включенном рубильнике K в цепи протекают три тока – ток катушки I_K , который, остается постоянным при неизменном положении сердечника в катушке, ток емкости I_C , опережающий по фазе напряжение на четверть периода, и ток в неразветвленной части цепи I .

Векторная дигамма для этого случая представлена на рис. 6.2 б. как видно из диаграммы, ток емкости I_C частично компенсирует реактивную слагающую тока катушки $I_{рК}$. Поэтому ток в неразветвленной части цепи будет меньше тока в катушке. При этом уменьшится и сдвиг фаз между током I и напряжением U ($\cos \varphi$ увеличивается). Важно отметить, что показания ваттметра не изменяется (практически небольшое изменение показания

ваттметра будет иметь место за счет активной проводимости как самих конденсаторов, так и соединительных проводов в ветви с емкостью).

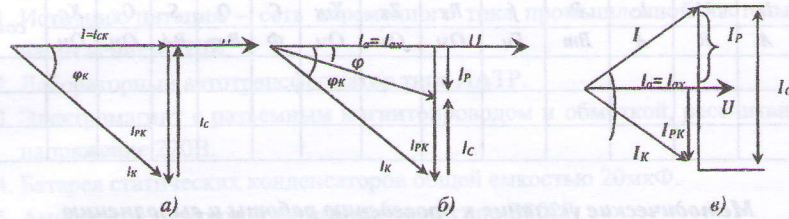


Рис. 6.2. Векторные диаграммы для цепей с параллельным соединением катушки и конденсаторов

Действительно мощность всей цепи $P = UI \cos \varphi$, но произведение $I \cos \varphi$ выражает активную слагающую тока I_a , которая при любой величине емкостного тока равна активной слагающей тока катушки $I_{ак}$. Следовательно

$$P = UI \cos \varphi = UI_a = UI_K \cos \varphi_K = P_K$$

При постановке опыта может оказаться, что ток емкости больше реактивной слагающей тока катушки, векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 6.2 в. В этом случае все расчетные формулы останутся прежними, но вследствие «перекомпенсации» появляется избыточная реактивная мощность емкости ($Q_c > Q_k$), которая должна быть покрыта за счет генератора (сети), и $\cos \varphi$ снова уменьшится.

$$\text{Здесь } I_P = I_C - I_{PK} \text{ и } Q = Q_c - Q_k.$$

Получить резонанс токов на опыте не всегда удастся. Для этого требуется строго фиксированное положение сердечника и точно подобранная емкость конденсаторов. Поэтому требуется рассчитать емкость конденсаторов, при которой будет иметь место резонанс токов. Для любой емкости, включаемой параллельно с катушкой, реактивное сопротивление емкости $x_c = U/I_c$.

Емкость конденсаторов

$$C = \frac{10^6}{2\pi f x_c} \text{ мкФ}$$

Частота f принимается равной частоте сети – 50 Гц.

При резонансе токов, как видно из векторной диаграммы рис. 6.3.

$$I_{Cрез} = I_{PK} = I_k \sin \varphi_k$$

Графики зависимости I и $\cos \varphi$ от I_c показаны на рисунке 6.4.

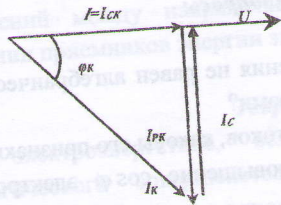


Рис. 6.3. Векторная диаграмма

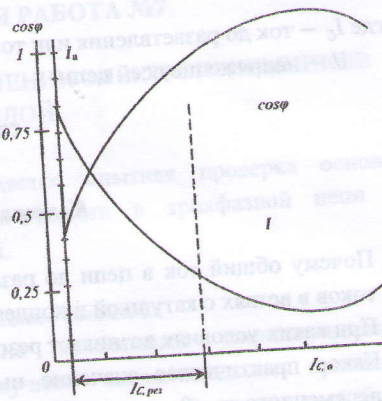


Рис. 6.4. Графики I и $\cos\varphi=f(I_C)$

Формулы для расчета

Активное сопротивление катушки, Ом

$$R_K = \frac{P}{I_K^2}$$

где P — мощность, Вт;

I_K — ток катушки, А.

Полное сопротивление катушки, Ом

$$Z_K = \frac{U}{I_K}$$

Индуктивное сопротивление катушки, Ом

$$x_{LK} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

где Z_K — полное сопротивление катушки;

R_K — активное сопротивление катушки.

Емкостное сопротивление конденсаторов, Ом

$$x_C = U/I_C$$

где I_C — ток конденсатора.

Реактивная мощность катушки, Вар

$$Q_K = I_K^2 x_{LK}$$

Реактивная мощность конденсатора, Вар

$$Q_C = I_C^2 x_C$$

Полная мощность всей цепи, ВА

$$S = UI_C$$

где I_C — ток до разветвления или ток всей цепи;
 U — напряжение всей цепи.

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI_C}$$

Контрольные вопросы

1. Почему общий ток в цепи до разветвления не равен алгебраической сумме токов в ветвях с катушкой и конденсаторами?
2. При каких условиях возникает резонанс токов, каковы его признаки?
3. Какое практическое значение имеет повышение $\cos \varphi$ электроустановки переменного тока?

ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ
ЗВЕЗДОЙ

Целью настоящей работы является опытная проверка основных соотношений между напряжениями и токами в трехфазной цепи при соединении приемников энергии звездой.

Теоретические сведения

В электроэнергетике, вследствие наибольшей экономичности и технологического совершенства, получили исключительное применение трехфазные цепи. Все звенья трехфазной цепи были изобретены и разработаны известным русским инженером и ученым М.О. Доливо-Добровольским. Электрификация во всем мире базируется на применении трехфазных электрических систем, включающих трехфазные генераторы на электростанциях, трехфазные трансформаторы на подстанциях (для повышения и понижения напряжения), трехфазные линии электропередачи, подавляющее большинство трехфазных электродвигателей.

Одним из основных способов соединения обмоток генераторов, трансформаторов и приемников в трехфазных цепях являются соединения звездой.

В трех неподвижных обмотках статора генератора, смещенных в пространстве при вращении ротора первичным двигателем, по принципу электромагнитной индукции наводятся три синусоидальные электродвижущие силы (ЭДС), амплитуды которых смещены по времени на $1/3$ периода T . Создаваемая ими ЭДС напряжения и токи в обмотках генератора и во внешней цепи также смещены по времени (по фазе) на $1/3 T$. Как обмотки статора генератора, так и отдельные цепи (фазы) электроприемников (например, лампы накаливания) могут быть соединены между собой в трехфазную систему.

При соединении звездой все «начала» или «концы» фазных обмоток соединяют в одну общую точку. Общие точки обмоток генератора и ветвей звезды приемника (нагрузки) называются *нейтральными* или *нулевыми точками*, а соединяющий провод – *нейтральным* или *нулевым*. Провода, соединяющие обмотки генератора с приемником, называются *линейными*. Схема соединения фазных обмоток источника и трехфазного приемника электрической энергии звездой изображена на рис.7.1.

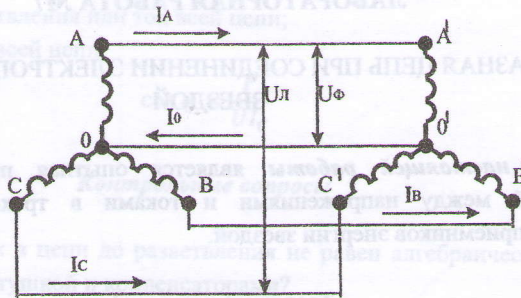


Рис 7.1. Схема соединения звездой

В системе трехфазного тока необходимо отличать фазный ток I_{ϕ} от линейного тока $I_{\text{л}}$, а также фазное напряжение U_{ϕ} от линейного напряжения $U_{\text{л}}$.

Напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нулевой точкой (нулевым проводом) называется фазным напряжением. Напряжение между фазами или линейными проводами называется линейным напряжением.

Ток в линейном проводе называется линейным током, а ток, протекающий по фазе фазным током. В случае соединения звездой при равномерной нагрузке фаз приемника линейное напряжение $U_{\text{л}}$ больше фазного напряжения U_{ϕ} в $\sqrt{3}$ раз:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$$

При неравномерной нагрузке фаз и при отсутствии нейтрального (нулевого) провода, это соотношение нарушается.

Линейный ток равен фазному:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi}$$

Приборы и оборудование

1. Источник питания – четырехпроводная трехфазная сеть напряжением 220/127В с коммутационной аппаратурой и защитой.
2. Панели с лампами накаливания на номинальное напряжение 220В мощностью порядка 1кВт в каждой фазе.
3. Три амперметра электромагнитной системы с пределом измерения тока до 5А.
4. Амперметр электромагнитной системы с пределом измерения до 3А.

5. Вольтметр электромагнитной системы с пределом измерения 30,150 и 300В.
6. Однополюсный рубильник на ток до 5А.
7. Соединительные провода с наконечниками.
8. Однополюсные выключатели – 15шт.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с приборами, предназначенными для данной лабораторной работы, собрать электрическую схему согласно рис. 7.2. и представить ее на проверку.

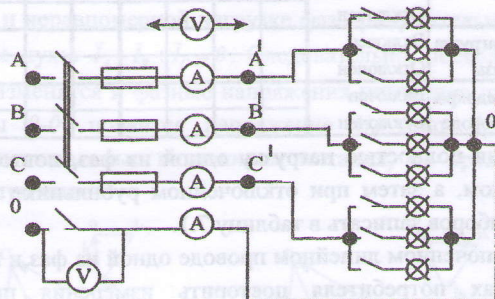


Рис. 7.2. Четырехпроводная цепь (соединен. фаз звездой)

2. При замкнутом рубильнике в цепи нулевого провода включить установку под напряжение и установить равномерную нагрузку всех трех фаз. Переносным вольтметром измерить линейные и фазные напряжения. Показания электроизмерительных приборов записать в таблицу 7.1. Убедится в отсутствии тока в нулевом проводе.
3. Отключить рубильник в нулевом проводе и снова записать показания приборов в табл.7.1. Убедится с помощью вольтметра в отсутствии напряжения между нулевыми точками потребителя и источника питания при равномерной нагрузке фаз.
4. При включенном рубильнике в нулевом проводе изменить нагрузку в одной фазе так, чтобы амперметр, включенный в нулевом проводе, давал заметное показание значения тока. Повторить те же измерения и записать в таблицу 7.1. показания всех приборов. Затем отключить рубильник в нулевом проводе и снова произвести те же измерения, включая изменения напряжения между нейтралями (нулевыми точками) сети и потребителей. Показания

электроизмерительных приборов записать в таблицу 7.1. Повторить опыты для двух – трех случаев неравномерной нагрузки фаз.

Таблица 7.1

№ п/п	Вид нагрузки	Положение нулевого провода	IA	IB	IC	IO	UA	UB	UC	IAB	IBC	ICA	UO
1	Равномерная	Включен											
		Отключен											
2	Неравномерная	Включен											
		Отключен											
3	Неравномерная	Включен											
		Отключен											
4	Отключена нагрузка одной фазы	Включен											
		Отключен											
5	Перегорел предохранитель в линейном проводе	Включен											
		Отключен											

5. Отключив полностью нагрузку одной из фаз, повторить все измерения при включенном, а затем при отключенном рубильнике в нулевом проводе. Показания приборов записать в таблицу 7.1.

6. При отключенном линейном проводе одной из фаз и включенных ламп во всех фазах потребителя повторить измерения при включенном и отключенном рубильнике.

7. По данным табл. 7.1. построить в масштабе векторные диаграммы для трех случаев: а) при равномерной нагрузке фаз; б) при неравномерной нагрузке фаз при включенном нулевом проводе; в) при той же неравномерной нагрузке при отключенном нулевом проводе.

8. Сделать краткие выводы по проделанной работе.

Методические указания к проведению работы и выполнению расчетно – графической части

1. При сборке электрической схемы амперметры для измерения линейных токов следует выбирать с пределом измерения до 5А. В нулевой провод включить амперметр с пределом до 3А. Провода от переносного вольтметра необходимо оборудовать наконечниками из изолирующего материала, что важно в отношении безопасности измерений.

2. Изменение нагрузки в фазах производится с помощью однополюсных выключателей в цепи питания каждой лампы.

3. При равномерной нагрузке фаз и отключенном нулевом проводе напряжение между нейтралью 0 и $0'$ должно отсутствовать, поскольку их потенциалы равны.
4. В случае неравномерной нагрузки при включенном нулевом проводе фазные напряжения у потребителей будут одинаковы и равны напряжениям фаз относительно нулевого провода, т.е. $U_\phi = U_n \sqrt{3}$ (рис. 7.3 а). Сила тока в нулевом проводе, равная геометрической сумме токов фаз, будет тем больше, чем больше разница в нагрузках фаз (их сопротивлений) (рис. 7.3 б).
5. В случае отключения полностью нагрузки одной из фаз (например, фазы С) при одинаковых нагрузках двух других фаз ($I_A = I_B$) сила тока в нулевом проводе будет равна силе тока любой из фаз (рис. 7.3 в). При отключенном нулевом проводе и неравномерной нагрузке фаз принудительно сумма фазных токов будет равна нулю $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$. Следовательно, поскольку изменяются фазные токи, то изменятся и фазные напряжения источника питания, и между точками системы $0-0'$ появится напряжение U_0 (рис. 7.3 г). Линейные напряжения, поддерживаемые источником питания, по-прежнему останутся равными и симметричными.

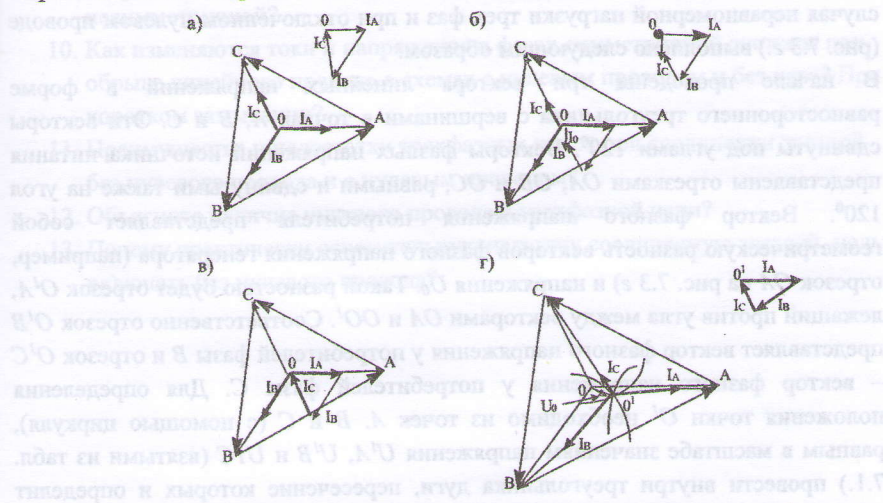


Рис. 7.3. Векторные диаграммы для трехфазной цепи при соединении фаз звездой: а - равномерная нагрузка фаз; б - нагрузка фазы С отсутствует; в - неравномерная нагрузка с включенным нулевым проводом; г - неравномерная нагрузка при отключенном нулевом проводе

6. При отключении линейного провода (например, в фазе A перегорела плавкая вставка предохранителя или оборвался провод воздушной линии, питающей потребителей, в условиях опыта достаточно вынуть вставку плавкого предохранителя) при отключенном нулевом проводе цепь представляет собой последовательное соединение двух групп (двух фаз) ламп. В случае одинаковой нагрузки этих фаз линейное напряжение делится между ними поровну $U_{\phi} = U_L/2$. При неодинаковых сопротивлениях фаз линейное напряжение делится пропорционально сопротивлениям фаз. Если же нулевой провод в этом случае будет включен, то фазные напряжения у потребителей будут такие же, как и у источника питания, лампы получают нормальное фазное напряжение $U_{\phi} = U_L/\sqrt{3}$.

Таким образом, выявляется роль нулевого провода как *выравнивающего фазные напряжения при неравномерной нагрузке фаз, включая случай обрыва линейного провода.*

7. При построении векторных диаграмм необходимо руководствоваться правилом: вектор линейного напряжения представляет собой геометрическую разность векторов фазных напряжений. Построение векторной диаграммы для случая неравномерной нагрузки трех фаз и при отключенном нулевом проводе (рис. 7.3 г.) выполнено следующим образом.

В начале проведены три вектора линейных напряжений в форме равностороннего треугольника с вершинами в точках A , B и C . Эти векторы сдвинуты под углами 120° . Векторы фазных напряжений источника питания представлены отрезками OA , OB и OC , равными и сдвинутыми также на углы 120° . Вектор фазного напряжения потребителя представляет собой геометрическую разность векторов фазного напряжения генератора (например, отрезок OA на рис. 7.3 г) и напряжения U_{ϕ} . Такой разностью будет отрезок OA' , лежащий против угла между векторами OA и OO' . Соответственно отрезок OB' представляет вектор фазного напряжения у потребителей фазы B и отрезок OC' – вектор фазного напряжения у потребителей фазы C . Для определения положения точки O' необходимо из точек A , B и C (с помощью циркуля, равным в масштабе значениям напряжения $U'A$, $U'B$ и $U'C$ (взятыми из табл. 7.1.) провести внутри треугольника дуги, пересечение которых и определит положение точки O' .

В направлении векторов фазных напряжений потребителей в масштабе проводятся векторы фазных токов I_A , I_B и I_C (они совпадают по фазе с фазными напряжениями).

8. В отчете по данной лабораторной работе укажите, к каким нежелательным последствиям может привести случайный обрыв нулевого провода при неравномерной нагрузке фаз и соединении потребителей звездой (как правило, электрическое освещение).

Контрольные вопросы

1. Что называется трехфазной электрической системой?
2. Каков порядок соединения фаз «звездой»?
3. Какие провода называют линейными?
4. Дайте определения понятиям «фазное» и «линейное» напряжение?
5. Какие токи и напряжения называют линейными? Фазными?
6. Какая нагрузка называется симметричной?
7. Какая нагрузка называется несимметричной?
8. Каково отношение фазных и линейных токов напряжений симметричной системы? Какую систему называют несимметричной?
9. Чему равен ток в нулевом проводе при симметричной нагрузке? При несимметричной?
10. Как изменяются токи и напряжения в фазах симметричной системы при обрыве линейного провода в схемах с нулевым проводом и без него? При коротком замыкании?
11. Преимущества и недостатки трехфазных цепей при соединении звездой без нулевого провода и с нулевым проводом?
12. Объясните наличие нулевого провода в трехфазной цепи?
13. Почему практически осветительную нагрузку соединенную звездой, нельзя включать без нулевого провода?

ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Целью настоящей работы является опытная проверка основных соотношений между напряжениями и токами в трехфазной цепи при соединении приемников энергии треугольником.

Теоретические сведения

Схема соединения в треугольник показана на рис. 8.1.

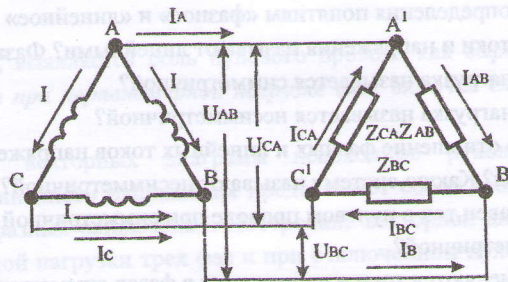


Рис. 8.1. Схема соединения в треугольник

При соединении в треугольник уже не приходится различать фазные и линейные напряжения, так как напряжение между началом и концом каждой фазы приемника оказывается в то же время линейным напряжением. Зато появляется различие между фазными и линейными токами. При симметричной нагрузке фаз, т.е. при одинаковых по величине и характеру фазных сопротивлениях $r_{AB}=r_{BC}=r_{CA}$ между фазным и линейным током имеет место такое же соотношение, как между линейным и фазным напряжением при соединении звездой, а именно

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi$$

При неравномерной нагрузке фаз приемника эта зависимость нарушается

Приборы и оборудование

1. Источник питания – четырехпроводная трехфазная сеть напряжением 220/127В с коммутационной аппаратурой и защитой.
2. Панели с лампами накаливания на номинальное напряжение 220В мощностью порядка 1кВт в каждой фазе.

3. Три амперметра электромагнитной системы с пределом измерения силы тока до 5А.
4. Амперметр электромагнитной системы с пределом измерения до 3А.
5. Вольтметр электромагнитной системы с пределом измерения 30,150 и 300В.
6. Однополюсный рубильник на ток до 5А.
7. Соединительные провода с наконечниками.
8. Однополюсные выключатели – 15 шт.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с приборами, предназначенными для этой работы, собрать электрическую схему согласно рис. 8.2. и представить ее на проверку.

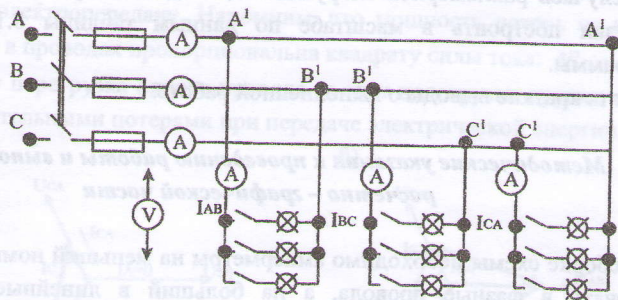


Рис. 8.2. Трехфазная цепь при соединении фаз треугольником

2. Установить равномерную нагрузку фаз и включить установку под напряжение. Записать показания всех амперметров и вольтметра, подключаемого поочередно к зажимам $A'B'$, $B'C'$, и $C'A'$, в табл.8.1.
3. Изменяя число работающих ламп в фазах, повторить измерения токов и напряжений; показания приборов записать в ту же таблицу. Убедится, что при неравномерной нагрузке фазовые напряжения сохраняются одинаковыми.
4. Отключить полностью лампы в одной фазе (например, $I_{AB} = 0$) и снова записать показания всех приборов в табл. 8.1.

Таблица 8.1

№ п/п	Характер нагрузки	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
1	Равномерная													
2	Неравномерная													
3														
4														
5														
6	Обрыв линейного провода													

- При наличии нагрузки во всех трех фазах (при снятом напряжении) отсоединить один линейный провод от схемы, что равносильно перегоранию плавкой вставки предохранителя, включить установку и вновь записать показания всех приборов в табл. 8.1.
- Для случаев равномерной нагрузки и для одного случая неравномерной нагрузки построить в масштабе по данным таблицы 8.1. векторные диаграммы.
- Сделать краткие выводы о выполненной работе.

**Методические указания к проведению работы и выполнению
расчетно – графической части**

- При сборке схемы необходимо амперметры на меньший номинальный ток включать в фазные провода, а на больший в линейные. Изменение нагрузки в фазах осуществлять с помощью однополюсных выключателей в цепи каждой лампы.
- Обратить внимание на то, что при неравномерной нагрузке фаз их фазные напряжения остаются одинаковыми, поскольку они являются одновременно и линейными напряжениями источника питания (сети).
- При отключенной нагрузке фазы AB схема остается включенной в трехфазную линию в «открытый треугольник». Потребители действующих фаз BC и CA по – прежнему находятся под нормальным для них линейным напряжением и работают нормально (обратите внимание на накал нить ламп). В линейных проводах проходят не одинаковые по силе токи. В проводах A и B протекают линейные токи, равные фазным, а в проводе C – линейный ток, равный геометрической разности токов фаз BC и CA . В случае одинаковой нагрузки в этих фазах линейный ток в проводе C будет

$$I_C = I_\phi / \sqrt{3}.$$

4. В случае обрыва линейного провода (например, фазы A), что при опыте осуществляется снятием вставки предохранителя, цепь получает питание по двум проводам и становится однофазной при смешанном соединении электроприемников. Лампы фазы B^1C^1 остаются включенными на полное фазное напряжение, а лампы фаз C^1A^1 и Φ^1B^1 оказываются включенным между собой последовательно на то же линейное напряжение, которое делится между ними пропорционально сопротивлениям этих фаз.
5. Примерный вид векторных диаграмм и токов при неравномерной нагрузке фаз, в случае отсутствия нагрузки в фазе AB показан на рис.8.3 *а*. Как видно из диаграммы на рис.8.3 *б*, значительная неравномерность нагрузки фаз (ток I_{AB} в два раза больше тока I_{CA}) не вызывает такой же неравномерности нагрузки линейных проводов, что очень важно для уменьшения потерь напряжения и потерь мощности в линиях электропередачи. Напомним, что мощность потерь на выделения теплоты в проводах пропорциональна квадрату силы тока: $\Delta P_{пр} = I^2 R_{пр}$. Поэтому перегрузка одного провода за счет недогрузки других сопряжена со значительными потерями при передаче электрической энергии.

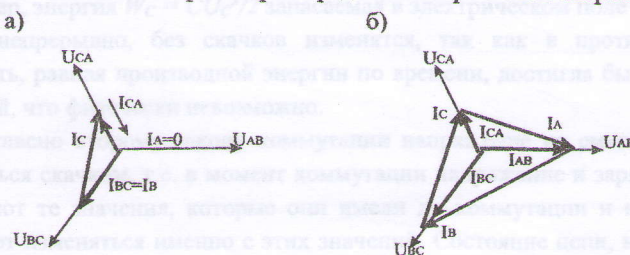
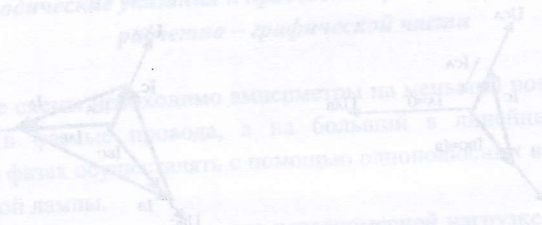


Рис. 8.3. Векторные диаграммы для трехфазной цепи при соединении фаз треугольником:
а - при отсутствии тока в фазе AB ; *б* - при неравномерной нагрузке всех трех фаз

6. В отчете по лабораторной работе укажите на достоинства соединения ламп треугольником, состоящее в том, что и в случае неравномерной нагрузки фаз фазные напряжения у зажимов отдельных ламп остаются одинаковыми, равными линейным напряжениям. К недостатку этой схемы следует отнести то, что данная трехфазная система располагает только одним напряжением, поскольку $U_{л} = U_{\phi}$, тогда как при соединении звездой имеется возможность питать электроприемники двумя напряжениями – линейным и фазным, отличающимся по величине в $\sqrt{3}$ раз.

Контрольные вопросы

1. Каков порядок соединения фаз потребителей треугольником?
2. Каковы соотношения между фазными и линейными значениями тока при соединении фаз треугольником для случаев равномерной и неравномерной нагрузки фаз?
3. Каковы достоинства способа соединения фаз потребителей треугольником?
4. Как рассчитываются трехфазные цепи при несимметричной нагрузке, соединенные треугольником? При симметричной нагрузке?
5. Как с помощью одного амперметра измерить все линейные токи?
6. Как изменятся фазные и линейные токи, и напряжения при соединении треугольником симметричной нагрузки, если оборвать:
 - а) один линейный провод,
 - б) один фазный провод.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ С И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ R

Целью работы является исследование закона изменения тока и напряжения при подключении цепи с активным сопротивлением и емкостью к источнику постоянного напряжения и при замыкании цепи R, C накоротко.

Теоретические сведения

Теоретически можно считать, что коммутация цепи производится мгновенно, т.е. на включение, отключение и переключение цепи время не расходуется. А на самом деле переход от одного режима работы цепи к последующему установившемуся процессу происходит не мгновенно, а в течении некоторого времени. Объясняется это тем, что каждому состоянию в цепи соответствует определенный запас энергии электрических полей. Переход к новому режиму связан с нарастанием или убыванием энергии этого поля. Например, энергия $W_C = CU^2/2$ запасаемая в электрическом поле емкости C, не может непрерывно, без скачков изменяться, так как в противном случае мощность, равная производной энергии по времени, достигла бы бесконечных значений, что физически невозможно.

Согласно второму закону коммутации напряжение на емкости не может изменяться скачком, т.е. в момент коммутации напряжение и заряд на емкости сохраняют те значения, которые они имели до коммутации и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений. Состояние цепи, наблюдается в течении некоторого времени после коммутации – называется независимым начальным условием и выражается следующим равенством:

$$U_C(0_-) = U_C(0)$$

Процесс, происходящий после коммутации состоит из двух, накладывающихся друг на друга процессов, переходного, который наступил сразу, и свободного, имеющего место только во время переходного режима. Поэтому, пользуясь принципом наложения, токи и напряжения в любой момент времени можно представить через слагающие этих режимов

$$i = i_{np} + i_{св}$$

$$U_C = U_{сnp} + U_{ссв}$$

$$U_{C3} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

$$i_3 = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

При подключении цепи с активным сопротивлением R и емкости C , включенных последовательно к источнику постоянного напряжения в момент коммутации ($t = 0$) напряжение на конденсаторе равняется нулю. $U_C(0) = 0$, и все напряжение источника U оказывается приложенным к сопротивлению R (рис. 9.1)

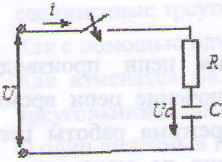


Рис. 9.1. Электрическая цепь с R и C

По этой причине начальный ток в цепи определяется отношением сетевого напряжения к ее активному сопротивлению. Конденсатор начинает заряжаться. В дальнейшем напряжение и ток определяются по кривым (законам) изменения U_C , U_{Cnp} , $U_{Cсв}$, i .

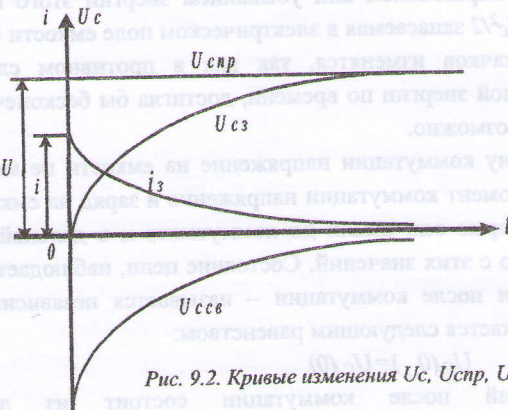


Рис. 9.2. Кривые изменения U_C , U_{Cnp} , $U_{Cсв}$, $i = f(t)$

При замыкании накоротко цепи R и C происходит заряд конденсатора. В этом случае напряжение на конденсаторе определяется тем напряжением, которое было на конденсаторе до замыкания. Как и при подключении цепи начальный ток при разряде конденсатора определяется отношением напряжения к активному сопротивлению, только направление будет противоположным. Однако активное сопротивление определяется только сопротивлением замкнутого контура. Тока в цепи не будет после того,

вся запасенная энергия в конденсаторе преобразуется в тепловую. Принужденное напряжение на емкости и принужденный ток в цепи будут равны нулю.

Пользуясь начальными условиями, можно найти, что при разряде конденсатора напряжение и ток изменяются в соответствии с законами

$$U_{cp} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$i_p = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Величина $\tau=RC$, имеющая размерность времени, называется постоянной времени цепи R, C . Эта величина тем больше, чем больше емкость и сопротивление. Переходный процесс может считаться законченным спустя $t = (4 \div 5)\tau$ (рис. 9.3).

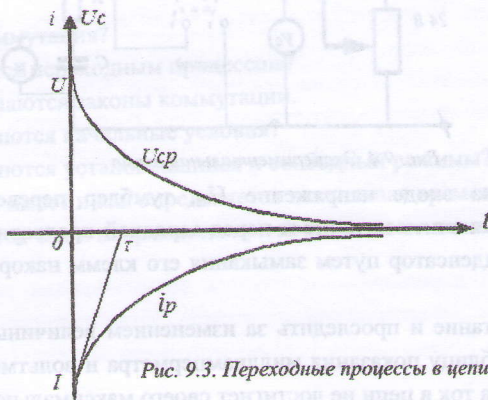


Рис. 9.3. Переходные процессы в цепи с R и C

Постоянная время τ может быть найдена графически как подкасательная к кривой i в любой точке (при $t = 0$).

К исследованию процессов разрядки и зарядки конденсатора через резистор сводятся важные практические задачи, возникающие при расчете переходных процессов в цепях автоматики, телемеханики, электроники и связи.

Приборы и оборудование

1. Источник постоянного тока на номинальное напряжение 24 В.
2. Реостат.

3. Конденсатор (концы конденсатора выведены на стенд) $C = 200 \text{ мкФ}$
4. Сопротивление (концы сопротивления выведены на стенд) $R = 120 \text{ кОм}$.
5. Микроамперметр электромагнитной системы.
6. Вольтметр электростатической системы.
7. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, содержащую последовательно включенные сопротивление и емкость по схеме на (рис. 9.4).

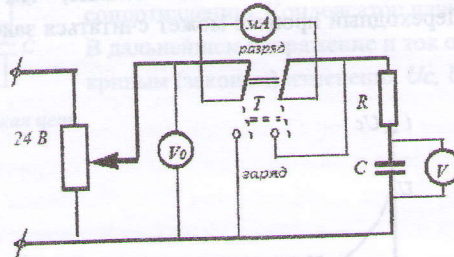


Рис. 9.4. Экспериментальная схема

2. Установить на входе напряжение $U_{вх}$, тумблер перевести в положение «заряд». Подключить питание и перед зарядкой предварительно полностью разрядить конденсатор путем замыкания его клемм накоротко специальным концом.
3. Включить питание и проследить за изменением величины тока при зарядке. Записать в таблицу показания миллиамперметра и вольтметра через каждые 10 секунд пока ток в цепи не достигнет своего максимального значения.
4. Переключить тумблер «Т» в положение «разряд». Проследить за изменением величины тока при разряде. Записать в таблицу 9.1 показания миллиамперметра и вольтметра через каждые 10 секунд пока ток в цепи не достигнет 10% величины начального тока.
5. По данным таблицы построить график изменения тока и напряжения. По кривой определить постоянную времени и сравнить ее с расчетной постоянной.
6. После этого по формулам, приведенным выше следует вычислить ток и напряжения, вычертить графики, сравнить их с экспериментальными и сделать вывод.

Таблица 9.1

t			с	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
взрЯД	изме-	Uз	В												
	рено	із	МА												
	вьчи	U	В												
	спено-	із	МА												
рвзрЯД	изме-	Ur	В												
	рено	ір	МА												
	вьчи-	Ur	В												
	спено	ір	МА												

Контрольные вопросы

1. Что такое коммутация?
2. Что называется переходным процессом?
3. В чем заключаются законы коммутации.
4. Как определяются начальные условия?
5. Как определяются установившийся и свободный режимы?
6. Какой смысл имеет и как определяется постоянная времени?
7. Как изменяется ток и напряжение при коротком замыкании цепи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Цель работы заключается в опытной проверке графического метода расчета разветвленных и неразветвленных цепей, содержащих нелинейные элементы.

Теоретические сведения

Электрические цепи, содержащие один или несколько элементов с нелинейными вольтамперными характеристиками (В.А.Х. – зависимость тока, протекающего по элементу от напряжения на нем), принято называть нелинейными цепями. Нелинейным называется такой элемент, который обладает нелинейной вольтамперной характеристикой. Встречающиеся в электрических цепях нелинейные элементы могут быть симметричными и несимметричными. К первым относятся такие элементы, как электрические лампы накаливания, бареттеры, термосопротивления и др. Их вольтамперные характеристики не зависят от направления тока. Ко вторым относятся такие элементы, как, например, электрическая дуга с разнородными электродами, электронные лампы, вентили и др. Их вольтамперные характеристики при различных направлениях токов и напряжений различны.

Если вольтамперные характеристики можно представить аналитическими функциями, то исследование нелинейных цепей проводят аналитическим методом. Однако, в большинстве случаев вольтамперные характеристики не поддаются замене аналитической функцией. Поэтому нелинейные цепи всего приходится рассчитывать графоаналитическим методом, основанным на законах Кирхгофа.

Приборы и оборудование

1. Источник постоянного тока на номинальное напряжение 12 и 24В и ток 12А.
2. Лабораторные проволочные реостаты – 1 шт.
3. Нелинейные элементы (бареттеры) – 2 шт.
4. Амперметры магнитоэлектрической системы типа М109 до 5А – 1 шт.
5. Вольтметры – 1 шт.
6. Соединительные провода с наконечниками.

Порядок выполнения работы

В настоящей работе следует опытным путем получить зависимости токов от напряжения для элементов, указанных на схемах и построить их вольтамперные характеристики.

1. Снятие вольтамперных характеристик

1.1. Собрать цепь для снятия вольтамперной характеристики исследуемых элементов рис.10.1.

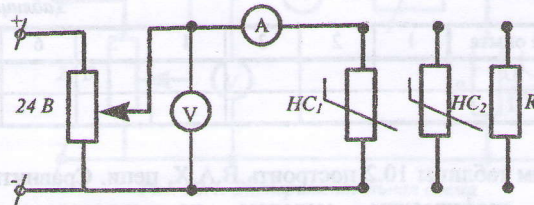


Рис. 10.1. Экспериментальная схема

1.2. Плавно изменяя напряжение от 0 до U_{max} снять В.А.Х. HC_1 , HC_2 и R поочередно. Не следует допускать тока в цепи более одного ампера.

Результаты измерений занести в таблицу 10.1

1.3. Изобразить В.А.Х. исследуемых элементов на графике.

Таблица 10.1

№ опыта		1	2	3	4	5	6	7
HC_1	U							
	I							
HC_2	U							
	I							
R	U							
	I							

2. Последовательное соединение элементов

2.1. Собрать цепь, показанную на рис. 10.2.

2.2. Плавно изменяя напряжение от 0 до U_{max} снять В.А.Х. токов и напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 10.2.

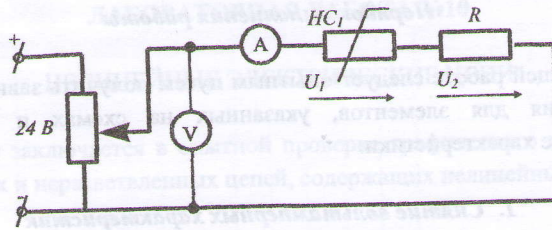


Рис. 10.2. Экспериментальная схема

Таблица 10.2

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
U							
I							

2.3. По данным таблицы 10.2 построить В.А.Х. цепи. Сравнить ее с расчетной, построенной графическим методом по известным вольтамперным характеристикам HC_1 и R (см. п. 1.3). По расчетным В.А.Х. определить величину тока I и напряжения U_1 и U_2 на элементах при заданном преподавателем значении общего напряжения U .

3. Параллельное соединение элементов

3.1. Собрать цепь, показанную на рис. 10.3.

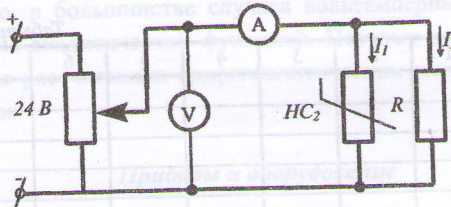


Рис. 10.3. Экспериментальная схема

3.2. Плавно изменяя напряжение от 0 до U_{max} снять В.А.Х. токов и напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 10.3.

Таблица 10.3

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
U							
I							

3.3. По данным таблицы 10.3, а также расчетным путем построить В.А.Х. цепи, используя В.А.Х. HC_2 и R (см. п. 1.3). Результаты построений сравнить.

3.4. По расчетным В.А.Х. определить величины токов I_1 и I_2 при напряжении U заданном преподавателем.

4. Смешанное соединение элементов

4.1. Собрать цепь, показанную на рис. 10.4.

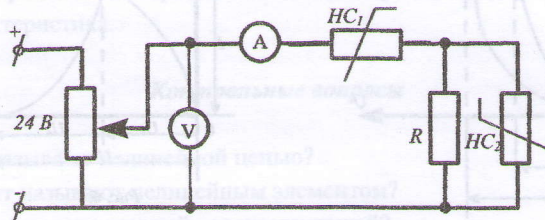


Рис. 10.4. Экспериментальная схема

4.2. Плавно изменяя напряжение от 0 до U_{max} снять В.А.Х. токов и напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 10.4.

Таблица 10.4

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
U							
I							

4.3. По данным таблицы 10.4, а также расчетным путем построить В.А.Х. цепи, используя В.А.Х. HC_2 и R (см. п. 1.3.). Результаты построений сравнить.

4.4. По расчетным В.А.Х. определить величины I_1 , I_2 и U_1 , U_2 при заданном преподавателем напряжении U .

Методические указания к проведению работы и выполнению расчетно – графической части

Расчет неразветвленных цепей, содержащих несколько нелинейных элементов, проводится с применением вспомогательных характеристик.

Эти характеристики могут быть построены или сложением напряжения при одних и тех же токах, как это показано на рис. 10.5 для двух элементов, или путем вычитания абсцисс заданных вольтамперных характеристик из

напряжения источника питания при соответствующих значениях тока, как это показано на рис. 10.6.

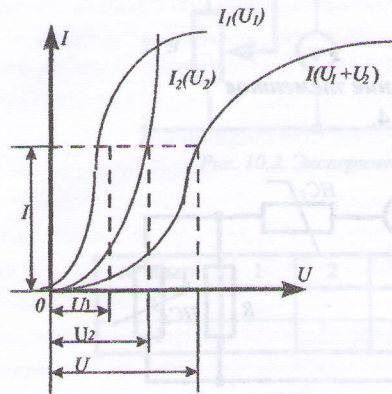


Рис. 10.5. Графический расчет при последовательном соединении НЭ

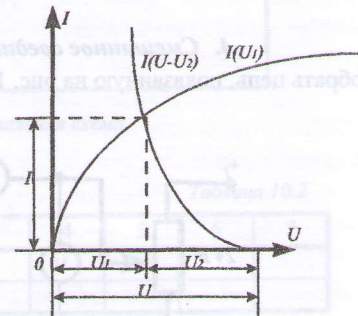


Рис. 10.6. Графический расчет с помощью вспомогательной характеристики

Аналогичным путем строятся характеристики и при наличии трех и более нелинейных элементов. Графическое определение токов и напряжений во вспомогательным характеристикам показано на рисунках 10.5 – 10.6.

В случае параллельного соединения элементов вспомогательные характеристики строятся сложением ординат при одних и тех же напряжениях. Построение вспомогательной характеристики для двух параллельно соединенных элементов и пользование ею показано на рис.10.7.

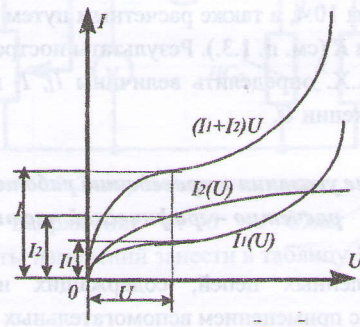


Рис. 10.7. Графический расчет при параллельном соединении НЭ

При расчете цепей со смешанным соединением элементов строятся вспомогательная характеристика для эквивалентного участка.

состоящего из параллельного соединения элементов, а затем строится результирующая характеристика для всех последовательных участков, включая и эквивалентный.

Расчет сложных электрических цепей с нелинейными элементами, содержащих несколько ЭДС, производят тоже по вспомогательным характеристикам. При этом сначала строят вспомогательные характеристики для всех участков, находящихся под действием узлового напряжения, а затем с применением первого или второго закона Кирхгофа строится результирующая расчетная характеристика.

Контрольные вопросы

1. Какую цепь называют нелинейной цепью?
2. Какой элемент называют нелинейным элементом?
3. Что называется вольтамперной характеристикой?
4. Как опытным путем получить В.А.Х. линейного элемента?
5. Как построить В.А.Х. линейного элемента?
6. Какие нелинейные элементы называют несимметричными?
7. Как графически рассчитать нелинейную цепь при последовательном соединении элементов?
8. Какие нелинейные элементы называют несимметричными?
9. Как графически рассчитать нелинейную цепь при параллельном соединении элементов?
10. Как графически рассчитать нелинейную цепь при смешанном соединении элементов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании характеристики катушки с ферромагнитным сердечником.

Теоретические сведения

Под *нелинейными индуктивностями* в цепи переменного тока понимают катушки индуктивности с ферромагнитным (со стальным) сердечником. Нелинейная характеристика индуктивного сопротивления обусловлена нелинейной зависимостью $B = f(H)$ магнитного материала. Используя соотношения

$$\Psi = \omega \cdot \Phi = \omega \cdot B \cdot S$$

$$i = \frac{H \cdot l}{\omega}$$

в которых потокосцепление Ψ пропорционально индукции B , ток i пропорционален напряженности H , а геометрические размеры сердечника и число витков катушки являются постоянными, можно определить зависимость магнитного потокосцепления от тока катушки $\Psi = f(i)$ по характеристике $B = f(H)$ с помощью простого масштабного преобразования. Потокосцепление Ψ не пропорционально току i . Индуктивность такой катушки зависит от тока.

Катушка со стальным сердечником называется еще *дросселем со стальным сердечником*. В электрической цепи с нелинейной индуктивностью при синусоидальном токе магнитный поток будет несинусоидальным, и наоборот, при синусоидальном магнитном потоке несинусоидальным будет намагничивающий ток. Сложнее производится расчет для стали с потерями, когда нельзя пренебречь гистерезисом и необходимо учитывать неоднозначность зависимости между i и Φ .

Эта зависимость изображается петлей гистерезиса (рис. 11.1). Катушка питается от источника синусоидального напряжения. Как видно из построения, ток в катушке имеет несинусоидальную форму. Максимумы тока i и магнитного потока Φ во времени совпадают. Благодаря наличию петли гистерезиса ток проходит через нуль несколько раньше потока. Напряжение опережает поток $\pi/2$. Вследствие этого ток отстает от напряжения меньше

чем на $\pi/2$. Поскольку второй полупериод кривой $i(t)$ повторяет первый со сменой знака, то эта кривая является нечетно - гармонической и, следовательно, содержит только нечетные гармоники, преимущественно гармоники низших порядков - 1,3,5,7....

Это свидетельствует о том, что наряду с реактивной энергией, в катушке существует потери энергии в сердечнике, обусловленные потерями на гистерезис, и вихревые токи.

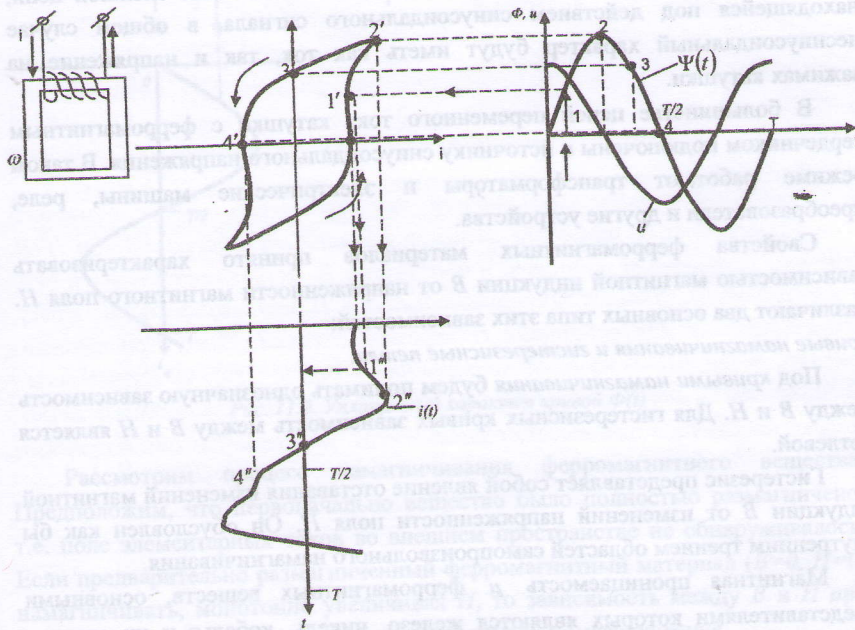


Рис. 11.1. Петля гистерезиса

При аналитическом решении этой задачи обычно ток в катушке со сталью представляют в виде суммы двух составляющих. Зависимость одной из них от магнитного потока выражается однозначной функцией, а зависимость второй от магнитного потока изображается эллипсом, оси которого соответствуют максимальной индукции в стали и ее коэрцитивной силе.

В противоположном случае - при питании катушки от источника синусоидального тока - аналогичное построение (рис. 11.2) позволяет установить, что кривая $\Phi(t)$ имеет уплощенный характер. Поэтому

напряжение на зажимах $u_L = d\Psi / dt$, кривую которого получим графическим дифференцированием, будет иметь вид резких пиков чередующейся полярности, что используется на практике для генерирования импульсов напряжения. Спектр кривой напряжения в этом случае также содержит лишь нечетные гармоники, однако в нем более сильно проявляются высшие гармоники, чем в кривой тока, приведенной на рис. 11.2, где преобладает 1-я гармоника.

При включении катушки с сердечником в состав более сложной цепи, находящейся под действием синусоидального сигнала, в общем случае несинусоидальный характер будут иметь как ток, так и напряжение на зажимах катушки.

В большинстве цепей переменного тока катушки с ферромагнитным сердечником подключены к источнику синусоидального напряжения. В таком режиме работают трансформаторы и электрические машины, реостаты, преобразователи и другие устройства.

Свойства ферромагнитных материалов принято характеризовать зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H . Различают два основных типа этих зависимостей: *кривые намагничивания и гистерезисные петли*.

Под *кривыми намагничивания* будем понимать однозначную зависимость между B и H . Для гистерезисных кривых зависимость между B и H является петлевой.

Гистерезис представляет собой явление отставания изменений магнитной индукции B от изменений напряженности поля H . Он обусловлен как бы внутренним трением областей самопроизвольного намагничивания.

Магнитная проницаемость μ ферромагнитных веществ, основными представителями которых являются железо, никель, кобальт и их сплавы, значительно превышает магнитную постоянную ($\mu \gg \mu_0$) и сильно зависит от напряженности магнитного поля, т.е. $\mu = f(H)$.

Магнитная индукция в ферромагнитных веществах может иметь при одном и том же значении напряженности поля различные значения, зависящие от предыдущих магнитных состояний материала. Поэтому для того, чтобы величиной $\mu = B/H$ можно было пользоваться в качестве характеристики магнитных свойств ферромагнитных материалов, необходимо точно оговорить метод определения этой характеристики.

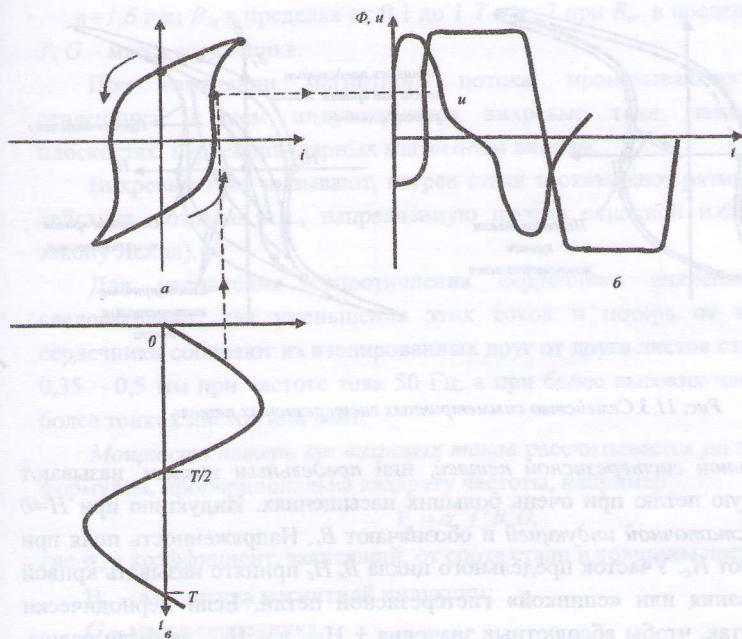


Рис. 11.2. Уплотненный характер кривой $\Phi(t)$

Рассмотрим процесс намагничивания ферромагнитного вещества. Предположим, что первоначально вещество было полностью размагничено, т.е. поле элементарных токов во внешнем пространстве не обнаруживалось. Если предварительно размагниченный ферромагнитный материал ($B=0$, $H=0$) намагничивать, монотонно увеличивая H , то зависимость между B и H при этом процессе будем называть *начальной кривой намагничивания*.

На рис. 11.3 изображено семейство симметричных гистерезисных петель. Для каждой симметричной петли максимальное положительное значение H равно максимальному отрицательному значению H , и соответственно максимальное положительное значение B равно максимальному отрицательному значению B .

Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель принято называть *основной кривой намагничивания*. При больших значениях H вблизи $\pm H_{max}$ восходящая и нисходящая части гистерезисной петли практически сливаются.

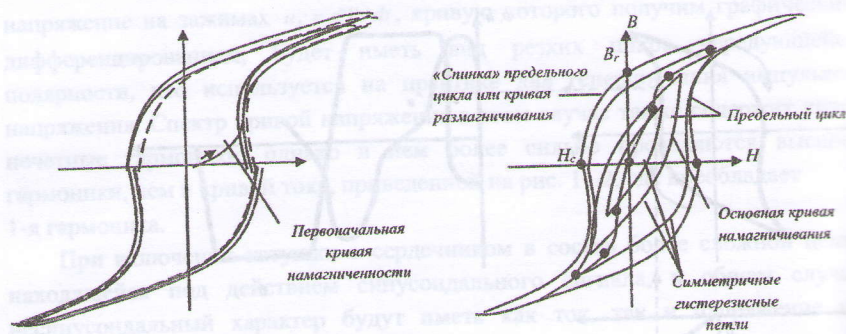


Рис. 11.3. Семейство симметричных гистерезисных петель

Предельной гистерезисной петлей, или предельным циклом, называют симметричную петлю при очень больших насыщениях. Индукцию при $H=0$ называют остаточной индукцией и обозначают B_r . Напряженность поля при $B=0$ называют H_c . Участок предельного цикла B_r, H_c принято называть кривой размагничивания или «спинкой» гистерезисной петли. Если периодически изменять H так, чтобы абсолютные значения $+H_{\max}$ и $-H_{\max}$ не были равны, то зависимость между B и H будет иметь петлевой характер, но центр петли не будет совпадать с началом координат. Такие гистерезисные петли принято называть частными петлями гистерезиса или частными циклами.

Начальная и основная кривая намагничивания настолько близки, расположены друг к другу, что для многих практических целей их можно считать совпадающими. При инженерных расчетах технических устройств, содержащих нелинейные индуктивности и работающих при переменном токе, необходимо учитывать потери энергии в стали, т.е. той части энергии, которая расходуется на нагрев стали, обусловленный гистерезисом и вихревыми токами. Именно этими явлениями и обусловлены потери энергии, величина которых определяет тепловой режим работы устройств.

Мощность потерь от гистерезиса при перемагничивании стали пропорциональна частоте f и обычно рассчитывается по различным эмпирическим формулам, например

$$P_r = \sigma_r f V_m^n G,$$

где σ_r — коэффициент гистерезиса, зависящий от сорта стали;

f — частота;

V_m — максимальная индукция;

$n=1,6$ при B_m в пределах от 0,1 до 1 Т и $n=2$ при B_m в пределах от 1 до 1,6 Т; G – масса сердечника.

При изменении магнитного потока, пронизывающего стального сердечника, в нем индуцируются вихревые токи, замыкающиеся в плоскостях, перпендикулярных магнитным линиям.

Вихревые токи вызывают нагрев стали и оказывают размагничивающее действие, создавая н.с., направленную против основной н.с. катушки (по закону Ленца).

Для увеличения сопротивления сердечника вихревым токам, а следовательно, для уменьшения этих токов и потерь от них стальные сердечники собирают из изолированных друг от друга листов стали толщиной 0,35 – 0,5 мм при частоте тока 50 Гц, а при более высоких частотах из еще более тонких листов или лент.

Мощность потерь от вихревых токов рассчитывается по эмпирическим формулам, пропорциональна квадрату частоты, например

$$P_e = \sigma_e f^2 B_m^2 G,$$

где σ_e – коэффициент, зависящий, от сорта стали и толщины листов;

B_m – амплитуда магнитной индукции;

G – масса сердечника.

Приведем магнитные характеристики некоторых ферромагнитных материалов:

1. В электротехнических устройствах, предназначенных для работы при переменном магнитном потоке, чистое железо не применяется, так как оно обладает сравнительно малым удельным сопротивлением и потери на вихревые токи, оказываются большими. В таких устройствах используется электротехническая сталь, в которой основной примесью является кремний (Si). Присадки кремния в небольшом количестве значительно увеличивают удельное сопротивление материала. Присадка кремния в количестве до 1,7% уменьшает также потери на гистерезис. Такого порядка содержание кремния имеет электротехническая сталь, применяемая в электромашиностроении.

2. Листовая сталь, предназначенная для магнитопроводов трансформаторов и участков магнитных цепей машин переменного тока, которые работают при больших переменных индукциях, содержит около 4% Si. Этим достигается значительное уменьшение потерь на вихревые токи. Общие потери на вихревые токи и на гистерезис в хороших сортах трансформаторной стали толщиной 0,35 мм имеют значение порядка 1 Вт/кг при $f=50$ Гц и $B_m = 1$ Тл.

3. Из других сплавов особенный интерес представляют сплавы железа с никелем (Ni). Сплав, содержащий 78,5% Ni, имеет очень высокое значение максимальной магнитной проницаемости: $\mu_{max} = (100\ 000 \dots 200\ 000)\mu_0$. Этот сплав называется *пермаллоем* (рис. 11.4).

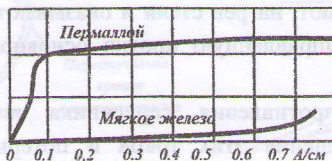


Рис. 11.4. Характеристика пермаллоя

4. Некоторые примеси, например молибден, еще более повышают магнитную проницаемость пермаллоя, одновременно улучшая его свойства в отношении увеличения удельного сопротивления и, соответственно, уменьшения потерь при перемагничивании в переменных полях. Например, сплав, содержащий 79% Ni, 16% Fe и 5% Mo, имеет максимальную магнитную проницаемость $\mu/\mu_0 = 800\ 000$. Сплавы типа пермаллоя могут с успехом использоваться в устройствах, работающих при слабых магнитных полях, например в трансформаторах тока.

5. Совершенно иные требования предъявляются к материалам, которые предназначаются для изготовления постоянных магнитов. Одним из лучших материалов отвечающих этим требованиям, является сплав *магнит*, состоящий из железа, никеля, алюминия, кобальта и меди и имеющий $B_r = 1,25$ Тл и $H_c = 44\ 000$ А/м. Магнитные свойства этого сплава обусловлены не только его составом, но и специальной обработкой - после отливки магнит охлаждается в сильном магнитном поле.

6. Для изготовления сердечников катушек и трансформаторов, предназначенных для работы в полях высокой частоты, используются специальные ферромагнитные материалы - так называемые *магнитодиэлектрики и ферриты*.

Магнитодиэлектрики состоят из основы - порошка ферромагнитного материала - и связка - изолирующего вещества. Они изготавливаются прессованием основы со связкой. Наибольшее распространение получили магнитодиэлектрики, изготавливаемые на основе карбонильного железа, имеющего максимальную проницаемость $\mu/\mu_0 = 21\ 000$ и получаемого сразу в виде очень мелкого порошка. Эти магнитодиэлектрики имеют $\mu/\mu_0 = 8$. По

сравнению с другими магнитоэлектриками они имеют наименьшие потери и обладают довольно хорошей стабильностью во времени и при изменении температуры.

Ферриты – керамические материалы, изготавливаемые из смеси твердых окислов железа с твердыми окислами других материалов (например, никеля и цинка). Измельченные и перемешанные окислы прессуют, а затем обжигают при температуре от 800 до 1400° С, причем происходит их спекание. Изменяя состав, размер зерен, продолжительность температуру обжига, можно получить ферриты с разными свойствами. По сравнению магнитоэлектриками ферриты обладают большей магнитной проницаемостью, порядка нескольких сотен или тысяч, и меньшими потерями. **Магнито – цинковые ферриты** отличаются прямоугольной петлей гистерезиса (рис. 11.5). Прямоугольную петлю гистерезиса приобретают также никель – цинковые ферриты в результате механического сжатия, что связано с проявлением в них эффекта, обратного магнитострикции. Тороиды из феррита с прямоугольной петлей гистерезиса получили широкое применение в быстродействующих вычислительных машинах и в различных устройствах импульсной техники.

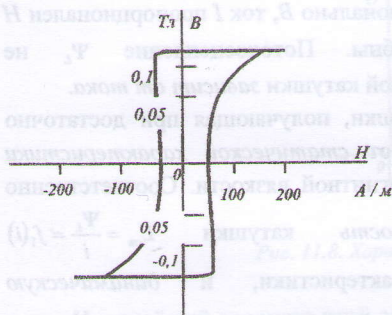


Рис. 11.5. Прямоугольная петля гистерезиса

Нелинейные характеристики и параметры катушки со стальным сердечником

Если магнитная проницаемость среды μ , в которой существует магнитный поток Φ , не зависит от напряженности поля H , то характеристика индуктивной катушки $\psi_1 = f(i)$ является **линейной** рис. 11.6.

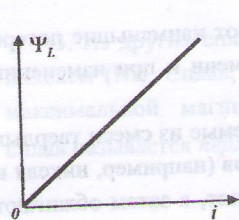


Рис. 11.6. Линейная характеристика катушки

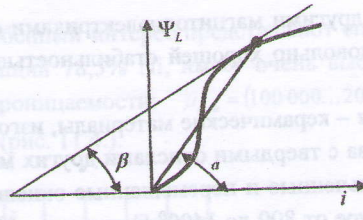


Рис. 11.7. Нелинейная характеристика катушки

В электрических цепях с катушкой со стальным сердечником, магнитная проницаемость ферромагнитных материалов μ зависит от напряженности магнитного поля. Соответственно характеристика $\psi_1 = f(i)$ катушки с ферромагнитным сердечником оказывается нелинейной рис. 11.7 (для случая возрастания тока от нуля при условии, что сердечник был предварительно размагничен). Эта кривая имеет тот же характер, что и первоначальная кривая намагничивания $B = f(H)$ материала сердечника, так как потокосцепление Ψ_L определяется значениями магнитной индукции B , а ток I — значениями напряженности поля. При однородном намагничивании замкнутого сердечника потокосцепление Ψ_L пропорционально B , ток I пропорционален H и кривые $\Psi_L = f(i)$ и $B = f(H)$ подобны. Потокосцепление Ψ_L не пропорционально току. Индуктивность такой катушки зависит от тока.

Динамическая характеристика катушки, получающая при достаточно быстрых изменениях тока, отличается от статической характеристики вследствие явлений вихревых токов и магнитной вязкости. Соответственно различают статическую индуктивность катушки $L_{ст} = \frac{\Psi_L}{i} = f(i)$

определяемую из статической характеристики, и динамическую индуктивность $L_d = \frac{d\Psi_L}{di} = f_2(i)$ определяемую из динамической характеристики.

При достаточно медленном изменении тока и потока динамические характеристики повторяют статические. Определяемую из статической характеристик индуктивность в виде производной $d\Psi_L/di$ называют дифференциальной. Обозначим ее через L_d . Для общности всегда будем говорить о динамической индуктивности L_d , имея в виду, что при очень медленном изменении тока она совпадает с дифференциальной, т.е. $L_d = L_{ст}$. В рис. 11.7 приведены способы определения $L_{ст}$ и L_d :

$$L_{cm} = \frac{\Psi_L}{i} = k \operatorname{tg} \alpha = f_1(i) \text{ и } L_o = \frac{d\Psi_L}{di} = k \operatorname{tg} \beta = f_2(i)$$

где k зависит от масштабов по осям абсцисс и ординат.

При периодических процессах динамическая характеристика имеет вид замкнутой петли, причем при достаточно низкой частоте тока она практически совпадает со статической петлей гистерезиса.

Когда нас интересует значение постоянного потокоцепления Ψ_L при заданном постоянном токе i , мы должны пользоваться статической индуктивностью. Если же необходимо вычислить ЭДС, индуцируемую в цепи изменяющемся потоке, то следует пользоваться динамической индуктивностью.

Индуктивная катушка с ферромагнитным сердечником при отсутствии постоянного подмагничивания представляет собой нелинейный элемент с симметричной характеристикой $\Psi_L = f(i)$.

Часто интересуются действующими напряжением U на зажимах катушки и током I в катушке. Зависимости $U = f(I)$ изображена на рис. 11.8. Эту зависимость также называют характеристикой катушки.

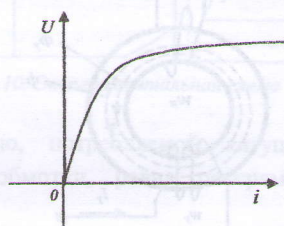


Рис. 11.8. Характеристика катушки

Нелинейный характер этой зависимости является следствием насыщения сердечника катушки при больших токах. Существенно отметить, что такая характеристика зависит от формы кривых тока и напряжения. Так, характеристика, получаемая при синусоидальном напряжении, несколько отличается от характеристики, получаемой при синусоидальном токе.

Наложив на сердечник катушки дополнительную обмотку, питаемую постоянным током, получим несимметричный нелинейный индуктивный элемент (управляемая катушка) (рис. 11.9), так как при одном направлении тока в основной обмотке МДС обеих обмоток будут суммироваться, а при другом – вычитаться.

Изменяя значение тока подмагничивания в дополнительной обмотке, получаем возможность изменять характеристику катушки со стороны зажимов основной обмотки, осуществляя, таким образом, управляемый нелинейный индуктивный элемент. Такие элементы могут быть использованы в различных нелинейных устройствах (ферромагнитный усилитель мощности, ограничители перенапряжения, и т.д.).

Такие управляемые индуктивные элементы могут быть использованы в цепях переменного тока, например для регулирования в линиях электропередачи или в качестве переменной индуктивной нагрузки в установках для испытания электрических машин и т.д. Весьма широкое распространение получили так называемые ферромагнитные усилители мощности, в которых используется нелинейные управляемые ферромагнитные элементы.

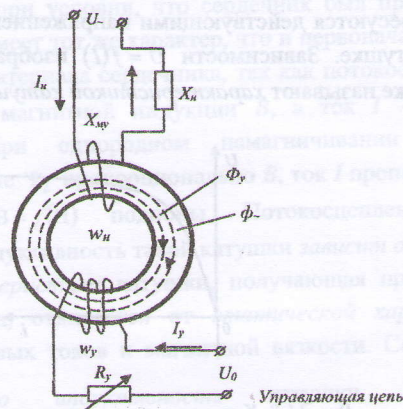


Рис. 11.9 Дроссель с подмагничиванием

Таким образом, ток и потокоцепление нелинейной катушки связаны кривой намагничивания. Вследствие этого токи и напряжения на нелинейных индуктивностях имеют различный гармонический состав. Потери энергии в ферромагнитных сердечниках катушек на гистерезис и вихревые токи пропорциональны квадрату напряжения. Потери на гистерезис пропорциональны частоте, а потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты.

**Методические указания к проведению лабораторной работы и
выполнению расчетно – графической части**

1. Для определения основных характеристик материала сердечника, (должен быть однородным и иметь форму одинакового поперечного сечения без воздушного зазора), собирают схему на рис. 11.10. До проведения исследований должны быть известны число витков обмотки W , сечение магнитопровода S_{cm} , длина средней линии напряженности l_{cp} , частота f и индуктивность рассеяния L_s . Эти данные указаны на стенде. По показаниям приборов определяются ток I , напряжение U на зажимах обмотки и потребляемая мощность P .

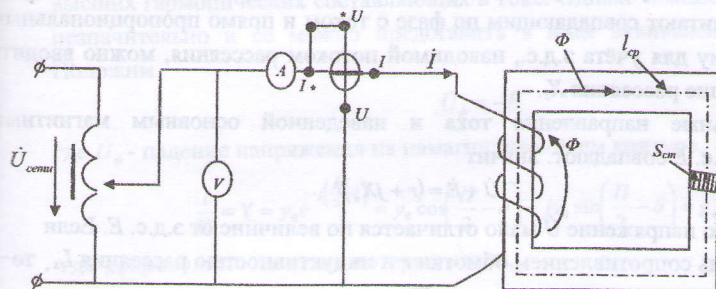


Рис. 11.10. Экспериментальная схема

Разность между мощностью, потребляемой катушкой, и мощностью, затрачиваемой на нагрев обмотки, равна потерям мощности в стали сердечника

$$P_{cm} = P - rI^2 = UI \cos \varphi - rI^2 = U_{\phi} I_n$$

где U_{ϕ} и I_n – напряжение и ток в ветви, учитывающей потери в стали (см. рис. 11.12)

Удельные потери в стали

$$P_{cm} = \frac{P_{cm}}{\gamma_{cm} l_{cp} S_{cm}}$$

Где γ_{cm} – удельный вес материала сердечника;

l_{cp} – длина средней магнитной силовой линии магнитопровода;

S_{cm} – площадь сечения стального сердечника.

Потери в стали состоят из потерь от гистерезиса и от вихревых токов.

$$P_{cm} = P_g + P_v = K_g f + K_v f^2$$

где K_g и K_v – коэффициенты пропорциональности.

Действующее значение напряженности магнитного поля определяется по формуле

$$H = \frac{IW}{l_{\varphi}}$$

Амплитуда магнитного потока Φ_m замыкающегося по сердечнику катушки, связана с действующим значением э.д.с. E , наводимым этим потоком, зависимостью

$$\Phi_m = B_m \cdot S_{cm} = \frac{E\sqrt{2}}{\omega W} \approx \frac{E}{4,44fW}$$

Кроме магнитного потока Φ существует ещё магнитный поток рассеяния Φ_s , замыкающийся через воздух и сцепляющийся лишь с частью витков обмотки. Поток Φ_s считают совпадающим по фазе с током и прямо пропорциональным ему. Поэтому для учёта э.д.с., наводимой потоком рассеяния, можно ввести сопротивление рассеяния X_s .

Положительные направления тока и наведенной основным магнитным потоком э.д.с. \vec{E} совпадают. Значит

$$\vec{U} + \vec{E} = (r + jX_s) \vec{i}$$

Обычно напряжение \vec{U} мало отличается по величине от э.д.с. E . Если пренебречь сопротивлением обмотки r и индуктивностью рассеяния L_s , то

$$U = -e = W \frac{d\Phi}{dt} = U_m \cdot \cos \omega t,$$

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

и изменение потока в катушке связано только с приложенным к ней напряжением и не зависит от магнитной характеристики сердечника. В этом случае можно построить кривую тока $i(t)$ показанную на рис. 11.11.

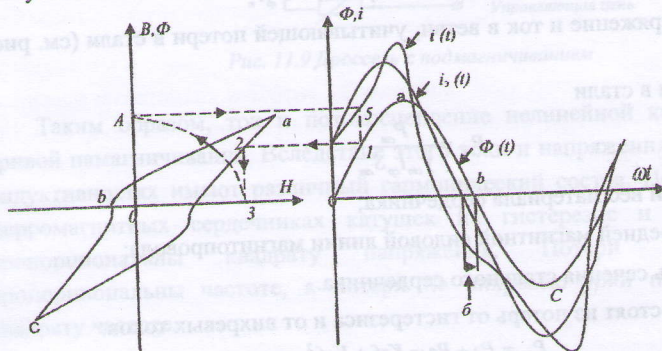


Рис. 11.11. Построение кривого тока $i(t)$

На кривой магнитного потока $\Phi(t)$ произвольно выбирается точка 1, которой соответствует точка 2 на кривой $\Phi(i)$. Вертикальная линия 2-3 определяет ток i который затем в виде ординаты 0-4 переносится в координатную систему $i(t)$ посредством проведения горизонтальной линии 4-5 до пересечения с вертикальной прямой 1-5. При выборе исходных точек на нисходящей части кривой abc значение тока i определяется также по нисходящей ветви abc петли $\Phi(i)$. Кривая $i(t)$, изображённая на рис.11, симметрична относительно оси абсцисс, что означает отсутствие в ней чётных гармоник. Эквивалентная синусоида тока $i_s(t)$ сдвинута по фазе относительно магнитного потока Φ на угол δ .

Э.д.с. E , наводимая в обмотке, несинусоидальна вследствие появления высших гармонических составляющих в токе. Однако искажение э.д.с. обычно незначительно и её можно представить в виде эквивалентной синусоиды. Положим

$$U_\phi = -E$$

где U_ϕ - падение напряжения на намагничивающем контуре.

$$\frac{I}{U} = Y = y_0 e^{-j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)} = y_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) - jy_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) = g_0 - jb_0$$

где g_0 - проводимость ветви потерь в стали,

b_0 - проводимость ветви намагничивания.

Ток в обмотке представляется в виде двух составляющих: намагничивающего тока $I_\phi = jb_0 U_\phi$ и тока потерь в стали $I_n = g_0 U_\phi$

Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником приведена на рис.11.12.

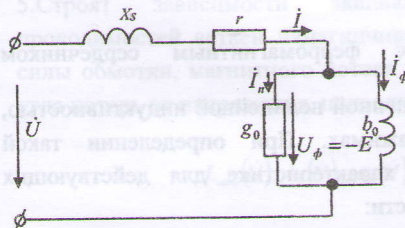


Рис 11.12. Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником

Векторная диаграмма, соответствующая приведенной схеме замещения, показана на рис.11.13. Здесь принято, что Φ_m совпадает с действительной комплексной плоскостью и ток:

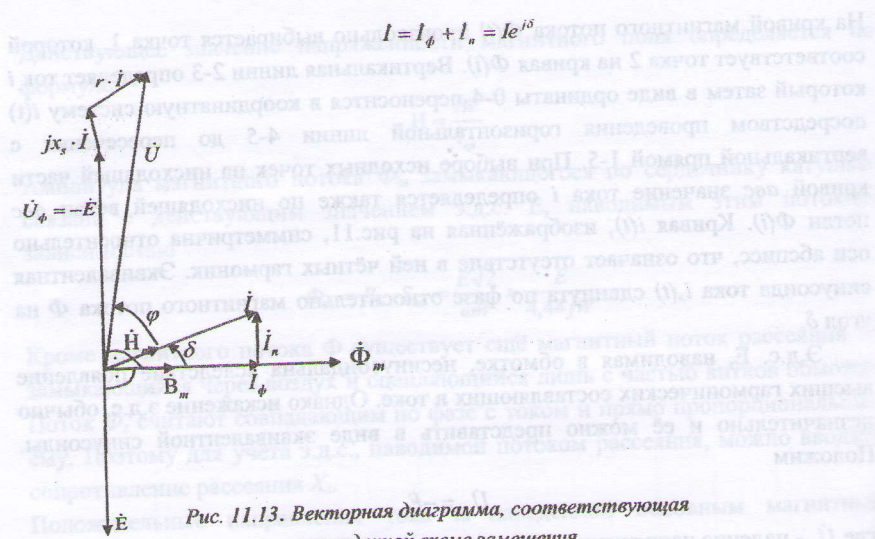


Рис. 11.13. Векторная диаграмма, соответствующая приведенной схеме замещения

На рис. 11.13 показаны векторы магнитной индукции $B_m = \frac{\Phi_m}{S_{cm}} = B_m e^{j\theta}$ и вектор напряженности магнитного поля $H_m = W \frac{j_m}{l_{cp}} = H_m e^{j\delta}$

Иногда, при расчете пользуются комплексным магнитным сопротивлением.

$$Z_m = r_m + jX_m = Z_m e^{j\delta},$$

$$\text{где } r_m = \frac{I_\phi \sqrt{2} W}{\Phi_m} = \frac{I_\phi}{U_\phi} \omega W^2 = \epsilon_0 \omega W^2,$$

$$X_m = \frac{I_n \sqrt{2} W}{\Phi_m} = g_0 \omega W^2$$

Катушки с ферромагнитным сердечником удобно характеризовать некоторой усредненной нелинейной индуктивностью, зависящей от напряжения на её зажимах. При определении такой индуктивности по вольт – амперной характеристике для действующих значений U и I различают две индуктивности: эквивалентную статическую $L_{ст.с} = U / \omega I$ и эквивалентную дифференциальную

$$L_{д.с} = \frac{1}{\omega} \frac{dU}{dI}$$

2. При постоянном напряжении с помощью амперметра и вольтметра определяют сопротивление обмотки сердечника r .

3. Изменяя переменное напряжение, подводимое к катушке, через $\Delta U = 40$ в снимают показания вольтметра, амперметра и ваттметра (таблица 1).

4. Для значения U, I, P заданных преподавателем, определяют параметры схемы замещения и строят векторную диаграмму с учётом того, что $L_s = \text{мкн}$ и $f = 50$ Гц в следующем порядке:

а) Сопротивление рассеяния и сдвиг фаз между эквивалентной синусоидой тока и напряжением

$$X_s = 2\pi f L_s,$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI}$$

б) Комплексное сопротивление катушки и комплексная проводимость ветвей намагничивания и потерь в стали.

$$Z = \frac{U}{I}, Y_0 = \frac{1}{z - r - jx_s} = g_0 - jb_0$$

в) Ток потерь в стали и намагничивающий ток

$$I_n = I \frac{g_0}{y_0}, I_\phi = I \frac{b_0}{y_0}$$

г) Угол потерь и электродвижущая сила обмотки

$$\delta = \arctg \frac{I_n}{I_\phi}, E = \frac{I}{Y_0}$$

д) Магнитный поток Φ_m , амплитуда магнитной индукции и напряженность поля в сердечнике

$$\Phi_m = \frac{E}{4,44 f W}, B = \frac{\Phi_m}{S_{cm}}, H = \frac{IW \sqrt{2}}{l_p}$$

5. Строят зависимости эквивалентной статической индуктивности, проводимостей ветвей намагничивания и потерь в стали, электродвижущей силы обмотки, магнитного потока в сердечнике, мощность потерь в стали и угла потерь от напряжения, подводимого к катушке

$$L_{cm}(\dot{U}), b_0(\dot{U}), g_0(\dot{U}), E(\dot{U}), P_{cm}(\dot{U}), \delta(\dot{U}), \Phi_m(\dot{U}).$$

Экспериментальные данные

$U_{сети}$							
V							
I_A							
$P_{вт}$							
Расчетные данные							
$L_{ст}$							
V_0							
g_0							
E							
$P_{ст}$							
δ							
ϕ_m							

Контрольные вопросы

1. Что такой дроссель со стальным сердечником?
2. Какой зависимостью характеризуется свойства ферромагнитных материалов?
3. Как возникают вихревые токи в стальном магнитопроводе?
4. Что делают для уменьшения потерь энергии от вихревых токов?
5. Как изменится сдвиг фаз между током и напряжением на зажимах катушки, если ее сердечник, набранный из листовой стали, заменить монолитным (сплошным) сердечником из того же материала?
6. От каких параметров зависит мощность потерь от вихревых токов?
7. Чем отличаются гистерезисные петли от кривых намагничиваний?
8. Что представляет собой гистерезис?
9. Дать определение понятиям - основная кривая намагничивания, предельная гистерезисная петля, остаточная индукция, коэрцитивная сила, частота петли гистерезиса, начальная кривая намагничивания.
10. Чем отличаются магнитомягкие от магнитотвердых материалов?
11. Чем обусловлены потери на гистерезис?
12. Как определяется мощность потерь от гистерезиса?
13. Почему реальную кривую тока заменяют эквивалентной синусоидой?
14. Как определяются параметры эквивалентной синусоиды?
15. Начерти схему замещения катушки с ферромагнитным сердечником?

16. Дай пояснения векторной диаграмме, соответствующей схеме замещения катушки с ферромагнитным сердечником?
17. Характеризуй катушку с ферромагнитным сердечником, как нелинейную индуктивность.
18. Понятие статической индуктивности катушки?
19. Понятие динамической индуктивности катушки?
20. На практике где часто встречаются катушки со стальными сердечниками?
21. Объясни влияние магнитного потока рассеяния?
22. По каким формулам определяются параметры схемы замещения катушки со стальным сердечником?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

Целью работы является экспериментальное исследование явления феррорезонанса в цепи переменного тока, состоящей из катушки с ферромагнитным сердечником и емкости.

Теоретические сведения

Резонанс в цепи, содержащей катушку с насыщенным ферромагнитным сердечником (нелинейная индуктивность), соединенную последовательно или параллельно с емкостью называется *феррорезонансом*.

В цепях с нелинейной катушкой индуктивности, содержащих конденсатор, плавное изменение напряжения может вызывать скачки фазы и амплитуды основной гармоники тока, и наоборот, плавное изменение тока может сопровождаться скачкообразным изменением фазы и амплитуды основной гармоники напряжения на некоторых участках цепи.

Явление изменения знака угла сдвига фаз между основными гармониками напряжения и тока при изменении напряжения или тока источника питания, обусловленное нелинейностью катушек со сталью, носит название *феррорезонанса*. Аналогичные явления имеют место в цепи с линейной индуктивностью и нелинейным конденсатором.

В линейных цепях подобные явления принципиально невозможны. Вспомним, что в линейной цепи при последовательном и параллельном соединении линейных реактивных L и C элементов имеют место резонансные явления, при которых возможно резкое увеличение напряжений или токов в обоих элементах в окрестности резонансной частоты. Поскольку параметры L и C и частота резонанса ω_0 линейной цепи связаны условием $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, то для достижения резонанса в ней необходимо изменять либо частоту, либо индуктивность или емкость, но не напряжение.

Феррорезонансные явления связаны с нелинейными свойствами этих цепей. Индуктивность нелинейной катушки не постоянна, а зависит от напряжения, поэтому *феррорезонанс*, то есть резонанс в цепи, включающей катушку с ферромагнитным сердечником и линейный конденсатор, может быть достигнут изменением величины приложенного к цепи напряжения. Точный анализ феррорезонанса с учетом несинусоидальности формы кривых представляет значительные трудности. Поэтому в дальнейшем применение

упрощение, при котором напряжение, ток и магнитный поток заменяются эквивалентными синусоидами, а индуктивность принимается условно-нелинейной и зависящей от тока. Кроме того, предполагается, что катушки со сталью не имеют потерь, т. е. угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока катушки, и что зависимость между их действующими значениями задана.

Феррорезонанс напряжений. Феррорезонанс напряжений возникает при последовательном соединении конденсатора и катушки со стальным магнитопроводом (рис.12.1). Сердечник катушки должен быть замкнутым, т.к. воздушный зазор в магнитной цепи сильно уменьшает изменение индуктивности. Напряжение на индуктивности \dot{U}_L , опережает ток I на 90° , напряжение на емкости \dot{U}_C отстает от тока на 90° . Приложенное напряжение $\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_C$. Так как векторы \dot{U}_L и \dot{U}_C имеют противоположные направления, то

$$U = |U_L - U_C|$$

Зависимость напряжения на катушке от тока задана кривой $U_L(I)$ (рис.12.1 в). Зависимость напряжения на конденсаторе от тока $U_C(I)$ представлена на том же рисунке наклонной прямой линией, проходящей через начало координат.

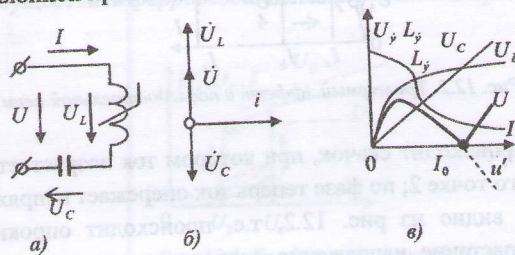


Рис. 12.1. Феррорезонанс напряжений

Ёмкость C можно всегда выбрать такой, чтобы прямая $U_C(I)$ пересекла кривую $U_L(I)$. Разность координат кривой $U_L(I)$ и прямой $U_C(I)$ дает кривую $U'(I)$, определяющую значения приложенного напряжения при разных значениях тока. Точка пересечения кривой $U'(I)$ с осью абсцисс (ток I_0) соответствует феррорезонансу напряжений ($U_L = U_C$).

В данном случае, как и в некоторых линейных цепях, резонанс напряжений достигается за счет изменения индуктивности, однако в отличие от линейных цепей это изменение индуктивности происходит, не независимо от тока в цепи, а как следствие зависимости эквивалентной индуктивности катушки со сталью

от действующего значения тока I (рис. 12.1 в). Так как действующее напряжение U — положительная величина, то кривая $U_L(I)$ совпадает с кривой $U'(I)$ только при $I < I_0$. При $I > I_0$ кривая $U(I)$ представляет собой зеркальное изображение кривой $U'(I)$.

$$L = \frac{U_L}{\omega I}$$

Участки графика $U(I)$ вблизи точки (I_0) чисто теоретические. Практически из-за потерь в стали и в сопротивлении обмотки, а особенно из-за искажения формы кривых тока и напряжения, кривая $U(I)$ имеет несколько иной вид.

Если цепь питается непосредственно от источника напряжения, то при изменении напряжения возможны скачкообразные изменения тока. При плавном изменении напряжения питания U от нуля до U_1 (рис. 12.2) ток по фазе отстает от напряжения ($U_L > U_C$). Изменение его величины происходит на участке характеристики 0-1.

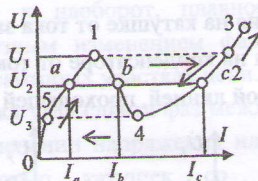


Рис. 12.2. Триггерный эффект в последовательной цепи

В точке 1 происходит скачок, при котором ток возрастает до значения, соответствующего точке 2; по фазе теперь ток опережает напряжение ($U_C > U_L$), как видно из рис. 12.2, т.е. происходит опрокидывание фаз. Дальнейшее возрастание напряжения сопровождается плавным увеличением тока. Уменьшение напряжения до значения U_3 снова вызывает скачок тока, соответствующий переходу из точки 4 в точку 5.

Явление резкого изменения тока в цепи при незначительном изменении напряжения на входе называется триггерным эффектом в последовательной феррорезонансной цепи. Угол сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока в точках 1 и 5 носит индуктивный характер, в точках 2 и 4 — емкостный, а в точке 4 он близок к нулю.

Некоторому значению напряжения источника U_2 на характеристике соответствует три значения тока I_a, I_b и I_c (рис. 12.2). Точке a соответствует ток, получающийся в цепи при повышении напряжения от величины, меньшей U_3 , до значения U_2 . Точке c соответствует ток, получающийся при

снижении напряжения от величины, большей, чем U_1 , до значения U_2 . Точка b , лежащая в промежутке между точками скачкообразного изменения тока (точки 1 и 4), не может быть достигнута при питании цепи от источника напряжения.

Характеристику $U(I)$ при всех значениях тока можно получить в случае питания цепи не от источника заданной э. д. с., а от источника заданного тока. Если, например, последовательно с источником напряжения, намного превышающего U_L и U_C , включить переменное сопротивление достаточно большой величины, то, изменяя величину этого сопротивления, можно задавать любое значение тока I . Таким образом, плавно изменяя ток, можно снять всю кривую $U(I)$.

График изменения тока I и напряжений U_L и U_C в зависимости от общего напряжения U показана на рис. 12.3. На участке $U_1 > U > U_3$ значения I, U_L, U_C различны в зависимости от того, происходит ли увеличение напряжения от величины U_3 или уменьшение от величины U_1 .

Сравнивая кривые $U_L(U)$ и $U_C(U)$, представленные на рис. 12.3, заметим, что при $U > U_1$ наклон кривой $U_L(U)$ намного меньше, чем наклон кривой $U_C(U)$. Малый наклон характеристики $U_L(U)$ в области больших насыщений стали позволяет осуществить феррорезонансные стабилизаторы напряжения.

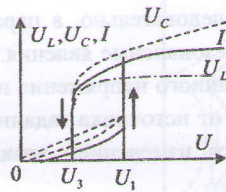


Рис. 12.3. Графики изменения I, U_L и U_C

Электрические цепи с нелинейной индуктивностью находят широкое применение в различных областях электротехники. Особенности цепей, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками и конденсаторы (электроферромагнитные колебательные контуры, явление диэлектрического гистерезиса), используют для создания ферромагнитных стабилизаторов напряжения, служащих для поддержания постоянства напряжения на зажимах приемника при изменении напряжения питающей сети. Основная часть всех стабилизаторов состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений — линейного и нелинейного. Стабилизаторы характеризуются коэффициентом стабилизации:

$$k_c = \frac{\Delta U_1}{U_1} : \frac{\Delta U_2}{U_2}$$

где U_1 – напряжение на входе стабилизатора;

U_2 – напряжение на выходе (на приемнике);

ΔU_1 и ΔU_2 – изменения напряжения на входе и выходе (рис. 12.4).

Чем больше коэффициент стабилизации k_c , тем выше стабилизирующие свойства цепи. Стабилизация возможна только в нелинейных цепях, так как в линейных пассивных цепях между напряжениями входа и выхода всегда существует прямая пропорциональность ($k_c=1$).

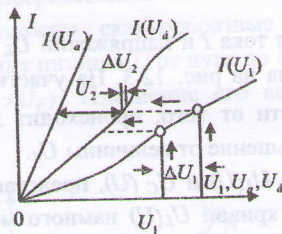


Рис. 12.4. Характеристика стабилизатора

Феррорезонанс токов. Если катушка со стальным магнитопроводом и конденсатор соединены не последовательно, а параллельно (рис. 12.5а), то в цепи также могут возникнуть резонансные явления. Однако в этом случае при питании цепи от источника заданного напряжения не происходит скачков тока и, наоборот, при питании цепи от источника заданного тока возможны скачки напряжения, сопровождающиеся изменением знака угла сдвига фаз между напряжением и током.

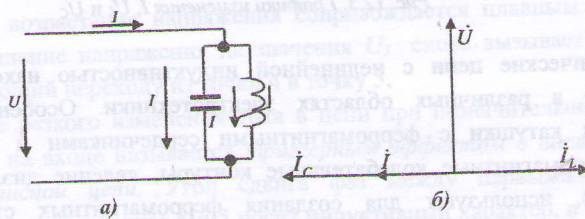


Рис. 12.5. Феррорезонанс токов

Так же как и в предыдущем случае, построим зависимость I_L и I_c от напряжения источника U (рис. 12.5 б). Так как при отсутствии потерь ток конденсатора опережает напряжение на 90° , а эквивалентная синусоида тока индуктивности отстает от напряжения на 90° , то общий ток $I = |I_L - I_c|$. Разность

абсцисс графиков $I_L(U)$ и $I_C(U)$ дает кривую $I'(U)$, абсциссы которой определяют значения общего тока при различных значениях напряжений (рис. 12.6 а). Из построения видно, что при некотором значении напряжения U , ток в индуктивности I_L компенсирует емкостный ток I_C и наступает *феррорезонанс токов* (точка пересечения кривой $I'(U)$ с осью координат. На рис. 12.6 б построена зависимость $I(U)$ (пунктирная кривая). Полученная кривая носит теоретический характер. Практически из-за потерь в стали и несинусоидальности тока в катушке даже при равенстве действующих значений I_L и I_C общий ток не равен нулю.

На практике зависимость между общим током и напряжением имеет вид сплошной кривой на рис. 12.6 б. Можно подобрать такое значение напряжения U , при котором реактивная составляющая первой гармоники I_L равна току I_C . В этом случае общий ток содержит только активную составляющую первой гармоники и высшие гармоники тока в индуктивности. Обычно амплитуда активной составляющей значительно меньше амплитуд высших гармоник, причем наибольшую амплитуду имеет третья, так что общий ток изменяется с тройной частотой.

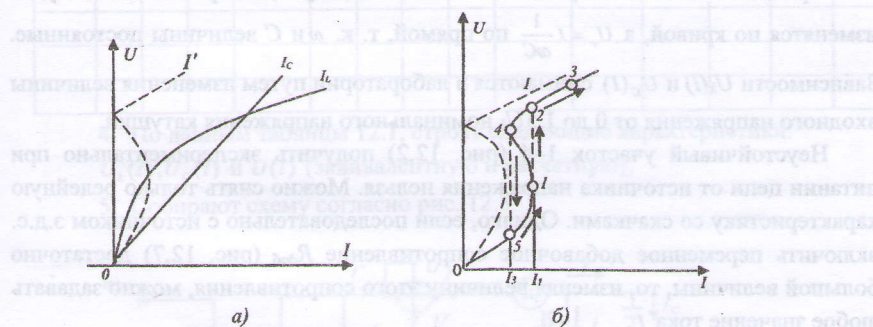


Рис. 12.6. Триггерный эффект в параллельной цепи

Если питать цепь не от источника заданной э.д.с., а от источника заданного тока, то наблюдаются скачки напряжения. Плавное увеличение тока от нуля до I_1 приводит к изменению напряжения по участку характеристики 0-1 (рис. 12.6 б). Дальнейшее увеличение приводит к резкому возрастанию напряжения и изменению знака угла сдвига фаз между \dot{U} и \dot{i} (переход из точки 1 в точку 2). При малых токах реактивное сопротивление цепи емкостное, а при больших токах — индуктивное. Последующее увеличение тока сопровождается

увеличением напряжения по участку 2-3. Уменьшение тока приводит к плавному уменьшению напряжения по участку 3-4. При снижении тока до значения I_3 , происходит скачкообразное уменьшение напряжения, сопровождающееся изменением знака угла сдвига фаз.

Порядок выполнения работы

Так как связь между значениями B_m и H_m в сердечнике определяется динамической кривой намагничивания $B_m = f(H_m)$, то связь между действующими значениями напряжения на катушке U_k и тока I определяется вольтамперной характеристикой, подобной кривой намагничивания. Сопротивление R_L составляет незначительную долю полного сопротивления Z_k . Поэтому приближенно можно считать, что катушка имеет только индуктивное сопротивление $X_L = |Z_k|$ и угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидальными напряжения и тока катушки $\varphi = \frac{\pi}{2}$, как показано на векторной диаграмме рис.12.1, б.

При постепенном возрастании тока I от нуля, напряжение U_k будет изменяться по кривой, а $U_c = I \frac{1}{\omega C}$ по прямой, т. к. ω и C величины постоянны.

Зависимости $U_k(I)$ и $U_c(I)$ снимаются в лаборатории путем изменения величины входного напряжения от 0 до $1,5U_k$ номинального напряжения катушки.

Неустойчивый участок 1-4 (рис. 12.2) получить экспериментально при питании цепи от источника напряжения нельзя. Можно снять только релейную характеристику со скачками. Однако, если последовательно с источником включить переменное добавочное сопротивление $R_{доб}$ (рис. 12.7) достаточной большой величины, то, изменяя величину этого сопротивления, можно задать любое значение тока I .

Таким образом, плавно изменяя ток, можно снять кривую $U(I)$.

1. Собирают схему согласно рис. 12.7 Изменяя напряжение на входе от нуля до 150В (точка 3 на рис.12.2) и от 150В до нуля, записывают показания приборов. При этом участок 1-4 кривой (рис.12.2) остается неизвестным. Опыт проводят при отсутствии сопротивления $R_{доб}$.
2. С помощью добавочного сопротивления снимают участок 1-4 кривой записывая показания приборов в табл.12.1.
3. По формулам определяют значения эквивалентной индуктивности катушки и напряжения на входе цепи от тока, где $U_L = U_k$.

Расчетные и экспериментальные данные сводят в таблицу 12.1

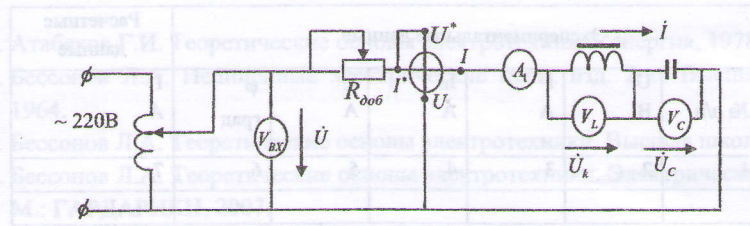


Рис. 12.7. Экспериментальная схема

Таблица 12.1

Экспериментальные данные											Расчетные данные				
При $R_{доб}=0$						При $R_{доб} \neq 0$					Уч. 1-4				
№ п/п	U В	U _к В	U _с В	φ° град	I а	U В	U _к В	U _с В	φ° град	I а	U В	L _{эк} мГВ	C мкФ	K _с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

4. По данным таблицы 12.1, строят следующие характеристики:

$U_k(I), U_c(I)$ и $U(I)$ (эквивалентную и расчетную);

5. Собирают схему согласно рис. 12.8

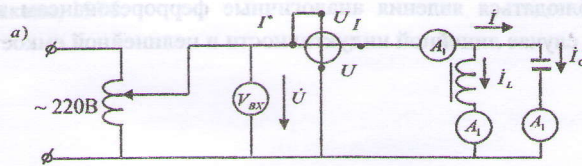


Рис. 12.8. Экспериментальная схема

Изменяя напряжение на входе цепи от нуля до 220В, записывают показания приборов. Экспериментальные и расчетные данные сводят в таблицу 12.2.

Экспериментальные данные						Расчетные данные
№ п/п	U В	I А	I _к А	I _с А	φ° град	I А
1	2	3	4	5	6	7

6. По данным таблицы 12.2 строят характеристики $I_k(U)$, $I_c(U)$, $U(U)$ и $I(U)$

Контрольные вопросы

1. Какие цепи называют феррорезонансными?
2. Понятия резонанса в линейных электрических цепях?
3. Понятия феррорезонанса в нелинейных электрических цепях?
4. Чем отличается явление феррорезонанса от резонанса в линейных цепях?
5. Дайте определение триггерному эффекту в феррорезонансных цепях.
6. Постройте ВАХ последовательной феррорезонансной цепи.
7. Какой режим работы цепи называется феррорезонансом напряжений?
8. Объясните принцип работы феррорезонансного стабилизатора напряжения.
9. Что такой коэффициент стабилизации и по какой формуле определяется?
10. Какой режим работы цепи называется феррорезонансом токов?
11. Постройте ВАХ параллельной феррорезонансной цепи.
12. Могут ли наблюдаться явления аналогичные феррорезонансам тока и напряжения в случае линейной индуктивности и нелинейной емкости?

Литература

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Энергия, 1978.
2. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи, изд. 2-е. Высшая школа, 1964.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Высшая школа, 1984.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: ГАРДАРИКИ, 2007.
5. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, изд. 4-е. Питер, 2004.
6. Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б. Нелинейные цепи. — М.: Энергия, 1972.
7. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. — М. Энергия, 1985.
8. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. ПЭИ, 1975.
9. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. — М.: Высшая школа, 1984.
10. Касаткин А.С. Электротехника. 1973.
11. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. Мансуров Н.Н., Попов В.С. Теоретическая электротехника. — М.: Энергия, 1968.
13. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Энергоиздат, 1981.
14. Общая электротехника/под ред. проф. Пантюшина В.С. 1970.
15. Попов В.С. Теоретическая электротехника. 1971.
16. Рахимов Г.Р. Феррорезонанс. Ташкент: АН УЗ. ССР. 1957.
17. Теоретические основы электротехники/под ред. проф. П.А. Ионкина. Высшая школа, 1976.

Содержание

Правила выполнения работ.....	3
Лабораторная работа 1. Исследование простых линейных электрических цепей постоянного тока.....	6
Лабораторная работа 2. Исследование линии электропередачи постоянного тока.....	12
Лабораторная работа 3. Исследование цепи переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления R , индуктивности L и ёмкости C	16
Лабораторная работа 4. Исследование цепи переменного тока с параллельным соединением активного сопротивления R , индуктивности L , ёмкости C	22
Лабораторная работа 5. Резонанс напряжений.....	27
Лабораторная работа 6. Резонанс токов.....	32
Лабораторная работа 7. Трёхфазная цепь при соединении электроприемников звездой.....	39
Лабораторная работа 8. Трёхфазная цепь при соединении электроприемников треугольником.....	46
Лабораторная работа 9. Переходные процессы в цепи постоянного тока с ёмкостью C и активным сопротивлением R	51
Лабораторная работа 10. Нелинейные электрические цепи.....	56
Лабораторная работа 11. Исследование катушки с ферромагнитным сердечником.....	62
Лабораторная работа 12. Исследование явления феррорезонанса.....	80
Список литературы.....	89

Дизайнер *Эркинбек у. Б.*
Корректор *Эркинбек к. Ж.*
Тех.редактор *Кыргызбекова Н.К.*

Подписано к печати 10.02.2018 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 5,75 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 200.
Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. Технологический парк ИЦ "Техник"
КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43
e-mail: beknur@mail.ru