

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:47:55

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

1.	Общие сведения по выполнению лабораторных работ по теоретическим основам электротехники	3
2.	Основные правила техники безопасности в лаборатории теоретических основ электротехники	3
3.	Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ	4
4.	Лабораторная работа № 1. Исследование электрической цепи постоянного тока	5
5.	Лабораторная работа № 2. Цепь переменного тока при последовательном соединении элементов	8
6.	Лабораторная работа № 3. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений	17
7.	Лабораторная работа № 4. Исследование трёхфазной системы при соединении потребителей звездой	21
8.	Лабораторная работа № 5. Трёхфазная цепь при соединении потребителей треугольником	28
9.	Лабораторная работа № 6. Частотные характеристики последовательного резонансного контура	32
10.	Лабораторная работа № 7. Частотные характеристики параллельного резонансного контура	36
11.	Лабораторная работа № 8. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении	40
12.	Лабораторная работа № 9. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений	44
13.	Лабораторная работа № 10. Феррорезонанс в последовательной цепи	49
14.	Лабораторная работа № 11. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью	53
15.	Лабораторная работа № 12. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью	56
16.	Лабораторная работа № 13. Переходные процессы в R-L-C контуре	59
17.	Лабораторная работа № 14. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами	64
15	Список литературы	73

Общие сведения по выполнению лабораторных работ по теоретическим основам электротехники

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений физических основ электротехники, законов электрических цепей, а также знакомство с электрооборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электрических схем и приборов, практически подтвердить основные положения и законы электрических цепей. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано четырнадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

Основные правила техники безопасности в лаборатории теоретических основ электротехники

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного выяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необхо-

димые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

1. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование или приборы с других рабочих мест без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в $0,025\text{ А}$ уже является опасным для жизни.

Лабораторная работа №1

Исследование электрической цепи постоянного тока

Цель работы: закрепление студентами знаний законов Ома и Кирхгофа и практическая проверка их справедливости.

1.1 Основные теоретические положения

Расчёт установившихся и переходных режимов как линейных, так и нелинейных электрических цепей осуществляется на основании законов Ома и Кирхгофа. Для участка электрической цепи постоянного тока, не содержащего источников э.д.с., в установившемся режиме закон Ома выглядит следующим образом: $U = IR$ – падение напряжения на участке электрической цепи равно произведению тока на его сопротивление.

Первый закон Кирхгофа справедлив для любого узла электрической цепи: $\sum I = 0$ – алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю, или иначе: сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из узла.

Второй закон Кирхгофа формулируется для замкнутого контура электрической цепи: $\sum IR = \sum E$ – алгебраическая сумма падений напряжения на элементах замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме э.д.с. источников напряжения, имеющих в контуре. Для определения знаков слагаемых произвольно выбирают направление обхода контура, и если направление тока и направление э.д.с. совпадают с направлением обхода контура, то слагаемые пишут со знаком «плюс», при встречном направлении – со знаком «минус».

В лабораторной работе требуется определить внутренние сопротивления источников э.д.с. Их можно определить, используя следующее уравнение:

$$E = U + R_0 I,$$

где E – э.д.с. источника напряжения, которую измеряют вольтметром при отсутствии тока через источник,

R_0 – внутреннее сопротивление источника э.д.с.,

$R_0 I$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении,

U – напряжение на зажимах источника э.д.с., которое измеряют вольтметром при протекании через источник тока I .

В лабораторной работе требуется также проверить баланс мощности, заключающийся в том, что мощность, отдаваемая источниками э.д.с., равна мощно-

сти, потребляемой элементами цепи:

$$\sum IE = \sum I^2 R,$$

при этом надо учитывать, что если ток через источник э.д.с. не совпадает с направлением э.д.с., то данный источник фактически является потребителем энергии, и соответствующее произведение в левой части уравнения следует писать со знаком «минус».

1.2 Порядок выполнения работы

1. Для схемы, изображённой на рис. 1.1, получить у преподавателя значения сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и два значения напряжения источника э.д.с. E_2 , в качестве которого использовать источник постоянного напряжения 0...15 В, в качестве источника E_1 использовать нерегулируемый источник постоянного напряжения 15 В.

2. Мультиметром измерить сопротивления полученных резисторов и напряжения на зажимах источников э.д.с. при отсутствии нагрузки.

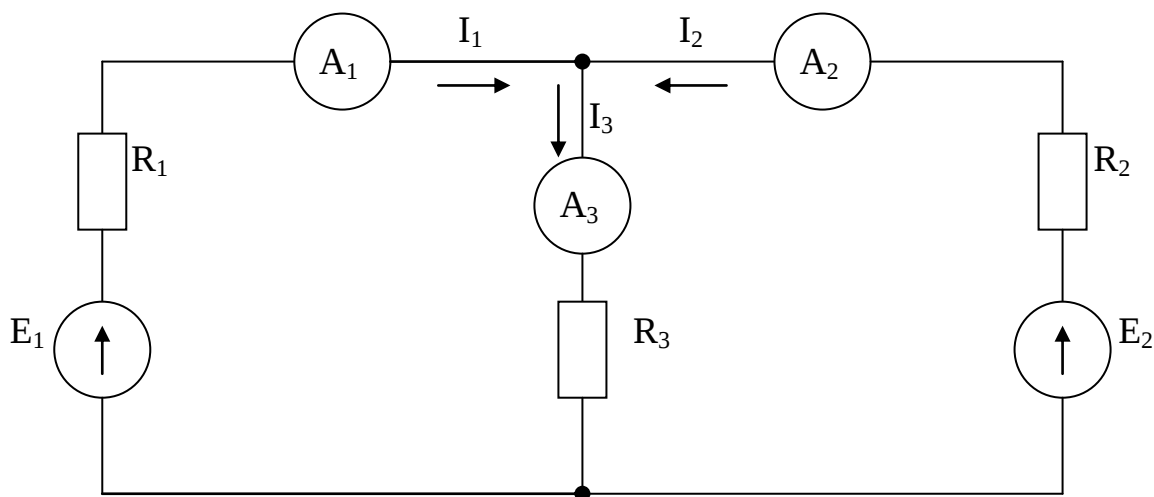


Рис.1.1.

3. Собрать схему, включить источники питания, мультиметром замерить токи в ветвях и напряжения на резисторах и на зажимах источников э.д.с. при двух заданных значениях E_2 . Результаты замеров занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1.

E_1 , В	E_2 , В		U_1 , В	U_2 , В	U_{R1} , В	U_{R2} , В	U_{R3} , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
15		эксперимент								
		расчёт								
		эксперимент								
		расчёт								

4. Рассчитать значения внутренних сопротивлений источников э.д.с..

5. Одним из методов (для данной схемы наиболее рациональным можно считать метод узлового напряжения) рассчитать токи в ветвях и напряжения на элементах электрической цепи, используя значения э.д.с. и сопротивления резисторов, измеренные мультиметром, и рассчитанные внутренние сопротивления источников э.д.с. Результаты расчётов занести в таблицу.

6. Сравнить измеренные и рассчитанные значения токов в ветвях и напряжений на резисторах.

7. По экспериментально полученным данным проверить справедливость закона Ома для трёх ветвей электрической цепи, первого закона Кирхгофа и для трёх независимых контуров – второго закона Кирхгофа.

8. Проверить баланс мощности при двух значениях э.д.с. E_2 .

1.3 Содержание отчёта

1. Описание цели и содержания лабораторной работы.

2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и схема замещения.

3. Таблица экспериментальных и опытных данных.

4. Расчёт внутренних сопротивлений источников э.д.с..

5. Расчёт токов и напряжений электрической цепи.

6. Выводы по результатам сравнения опытных и расчётных данных.

7. Расчёт баланса мощности.

1.4 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для участка электрической цепи, содержащего и не содержащего источник э.д.с..

2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.

3. Какие контуры схемы замещения являются независимыми?

4. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.

5. От чего зависят знаки слагаемых при составлении уравнений по законам Кирхгофа?

6. Как по экспериментальным данным вычислить внутреннее сопротивление источника напряжения?

7. Как по полученным в лабораторной работе экспериментальным данным Вы проверяли справедливость законов Ома и Кирхгофа?

8. Какой метод Вы применили для расчёта электрической цепи? Поясните его сущность.

9. Поясните порядок составления уравнения баланса мощности и поясните его физическую сущность.

Лабораторная работа №2

Цепь переменного тока при последовательном соединении элементов

Цель работы: опытная проверка соотношений в цепи переменного тока при последовательном соединении активных и реактивных элементов.

2.1 Общие теоретические положения

2.1.1 Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Если катушку индуктивности включить в цепь синусоидального тока, изменяющегося по закону:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.1.1)$$

где I_m – амплитуда тока;

ω – частота, 1/с;

t – время, с,

то ток в соответствии со вторым законом Кирхгофа и законом Ома в любой момент времени будет равен:

$$i = \frac{u + e_L}{r} \quad (2.1.2)$$

где u – напряжение на зажимах катушки;

r – активное сопротивление катушки;

$e_L = -L \frac{di}{dt}$ – э.д.с. самоиндукции, равная взятому со знаком «минус» про-

изведению индуктивности L на скорость изменения тока. Знак «минус» отражает то обстоятельство, что индуцируемая э.д.с. препятствует изменению тока.

Выражение (2) можно записать иначе:

$$u = ir - e_L = ir + L \frac{di}{dt} \quad (2.1.3)$$

Обозначим $ir = u_r$ – падение напряжения на активном сопротивлении

$L \frac{di}{dt} = u_L$ – падение напряжения на индуктивности.

В выражение (2.1.3) подставим значение тока из (2.1.1)

$$\begin{aligned} u &= I_m r \sin \omega t + L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = I_m r \sin \omega t + I_m \omega L \cos \omega t = \\ &= I_m r \sin \omega t + I_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

Из последнего выражения следует, что

$$u_r = I_m r \sin \omega t = U_{rm} \sin \omega t \quad (2.1.5)$$

по фазе совпадает с током, а падение напряжения на индуктивности

$$u_L = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.1.6)$$

по фазе опережает ток на угол $\frac{\pi}{2}$.

Произведение индуктивности L на частоту ω имеет размерность сопротивления, и его называют индуктивным сопротивлением:

$$x_L = \omega L \quad (2.1.7)$$

При переходе к комплексной форме выражение (4) запишется:

$$\dot{U} = \dot{U}_r + j\dot{U}_L = \dot{I}r + j\dot{I}x_L = \dot{I}(r + jx_L) = \dot{I}ze^{j\varphi} = \dot{I}Z \quad (2.1.8)$$

В последнем выражении

$$Z = r + jx_L = \sqrt{r^2 + x_L^2} e^{j \arctg(x_L/r)} = ze^{j\varphi} \quad (2.1.9)$$

– комплекс сопротивления катушки.

Z – полное сопротивление катушки, его можно найти как отношение действующих значений напряжения на зажимах катушки и протекающего по катушке тока:

$$z = \frac{U}{I} \quad (2.1.10)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

В соответствии с выражением (2.1.8) векторная диаграмма токов и напряжений будет иметь вид, представленный на рисунке 2.1.1.

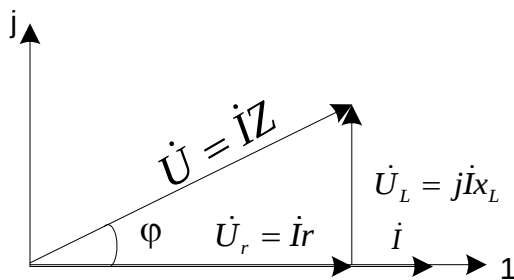


Рис. 2.1.1

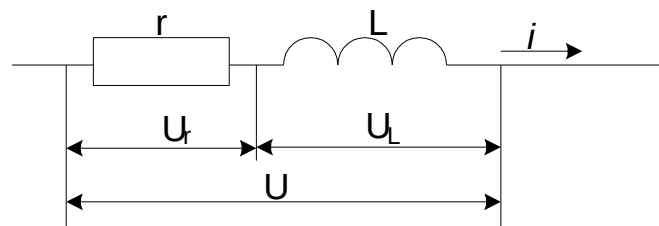


Рис. 2.1.2

На рисунке 2.1.2 представлена схема замещения катушки индуктивности. Вектор падения напряжения на активном сопротивлении совпадает по направлению с вектором тока. Вектор падения напряжения на индуктивности опережает вектор тока на 90° . Сумма этих двух векторов дает вектор напряжения на зажимах катушки. Длина последнего, как следует из векторной диаграммы:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2} = I \cdot \sqrt{r^2 + x_L^2} = I \cdot z,$$

а начальная фаза

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_L}{U_r} = \operatorname{arctg} \frac{x_L}{r} \quad (\text{см. формулу 2.1.8 и 2.1.9})$$

Если на векторной диаграмме каждый из векторов треугольника напряжений умножить на ток, то получится треугольник мощностей:

$$\left. \begin{aligned} & \text{- активная мощность } P = U_r I = I^2 r = UI \cos \varphi, \text{ Вт,} \\ & \text{- реактивная мощность } Q = U_L I = I^2 x_L = UI \sin \varphi, \text{ ВАр,} \\ & \text{- полная мощность } S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА.} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.11)$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{r}{z}. \quad (2.1.12)$$

2.1.2 Конденсатор в цепи синусоидального тока

Напряжение на конденсаторе u_c в любой момент времени равно заряду на его обкладках q , деленному на емкость C :

$$u_c = \frac{q}{C} \quad (2.1.13)$$

Поскольку ток есть количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника (в данном случае – поступающего на конденсатор) в единицу времени, то при переменном токе

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ откуда } q = \int i dt.$$

Подставив заряд, выраженный через ток, и ток из (2.1.1) в выражение (2.1.13), получим

$$u_c = \frac{q}{C} = \frac{I_m}{C} \int \sin \omega t dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t + U_0,$$

где U_0 – постоянный заряд на конденсаторе, который при включении конденсатора на переменное напряжение отсутствует.

Последнее выражение перепишем, заменив косинус синусом:

$$u_c = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m x_c \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.1.14)$$

Величина $\frac{1}{\omega C}$ имеет размерность сопротивления, ее называют емкостным сопротивлением конденсатора и обозначают x_c .

Произведение $I_m x_c$ есть ни что иное, как амплитуда напряжения на конденсаторе:

$$I_m x_c = U_{cm}.$$

Как видно из (2.1.14) напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$. В комплексной форме это выражение запишется:

$$\dot{U}_c = -jx_c \dot{I}, \quad (2.1.15)$$

соответствующая векторной диаграмма представлена на рисунке 2.1.3., а.

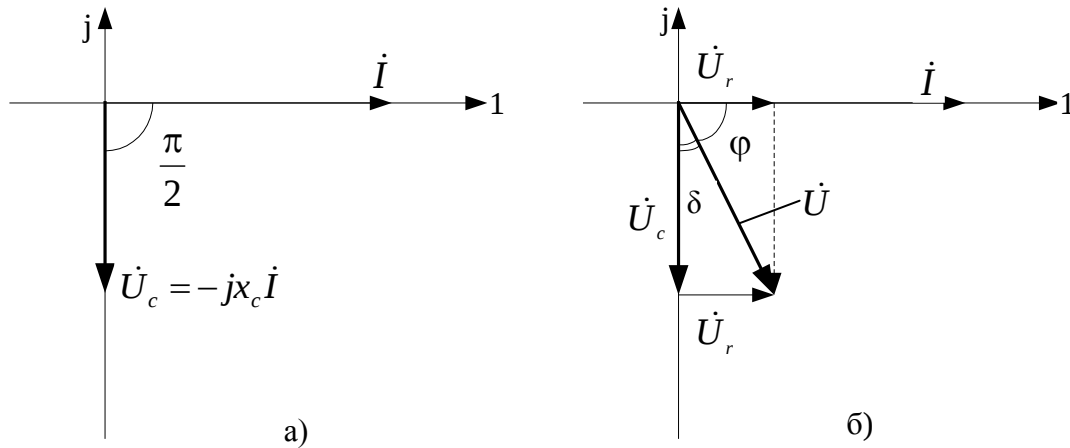


Рис. 2.1.3.

При рассмотрении процесса протекания тока через конденсатор не было учтено то обстоятельство, что диэлектрик между обкладками конденсатора не является идеальным, то есть его активное сопротивление, хотя и очень велико, но имеет конечное значение. В соответствии с этим схема замещения реального конденсатора может быть представлена так, как изображено на рисунке 2.1.4., а или 2.1.4., б.

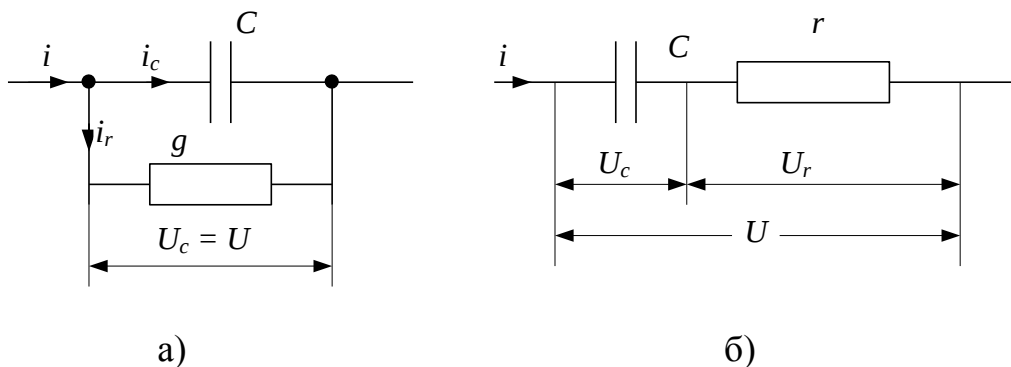


Рис. 2.1.4.

Для схемы а в соответствии с (2.1.15) и с законами Ома и Кирхгофа справедливо выражение:

$$\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_c = \dot{U}g + jU b_c = \dot{U}(g + j b_c) = \dot{U}Y \quad (2.1.16)$$

где g – проводимость диэлектрика;

$b_c = \omega C$ – проводимость идеального конденсатора;

$Y = g + j b_c = \sqrt{g^2 + b_c^2} e^{j \arctg(b_c/g)} = y e^{j\varphi}$ – комплекс проводимости реального конденсатора.

Для схемы б справедливо выражение

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_c = \dot{I}r - j\dot{I}x_c = \dot{I}Z \quad (2.1.17)$$

Из (2.1.15) и (2.1.16) следует

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z = \frac{1}{Y} \text{ или } Z = r - jx_c = \frac{1}{g + jb_c} = \frac{g - jb_c}{g^2 + b_c^2} = \frac{g}{y^2} - j \frac{b_c}{y^2} \quad (2.1.18)$$

Ввиду того, что два комплексных числа равны друг другу, если равны их вещественные части и равны коэффициенты мнимых частей, из (2.1.18) следует:

$$r = \frac{g}{y^2}, \quad x_c = \frac{b_c}{y^2}. \quad (2.1.19)$$

Аналогично получаются обратные выражения проводимостей конденсатора через сопротивления:

$$g = \frac{r}{z^2}, \quad b_c = \frac{x_c}{z^2}. \quad (2.1.20)$$

Следует отметить, что значение r малы по сравнению с x_c , и его часто не учитывают, считая конденсаторы идеальными.

Векторная диаграмма напряжений для реального конденсатора представлена на рис. 2.1.3,б. Угол δ называют углом диэлектрических потерь.

$$\delta = \arctg \frac{U_r}{U_c} = \arctg \frac{r}{x_c} \quad (2.1.21)$$

Для качественных диэлектриков этот угол изменяется десятками минут и даже минутами.

Умножив на векторной диаграмме рис. 2.1.3, б векторы напряжения на ток, получим треугольник мощностей:

$$S = UI, \quad P = U_r I, \quad Q = U_c I, \quad \tilde{S} = P - jQ \quad (2.1.22)$$

2.1.3. Последовательное включение активного сопротивления, индуктивности и емкости в цепь синусоидального тока

Рассмотрим прохождение синусоидального тока по цепи, состоящей из последовательно включенных резистора, катушки индуктивности и конденсатора (рис. 2.1.5). Следует иметь ввиду, что на данной схеме замещения сопротивление r учитывает и активное сопротивление катушки индуктивности и активные потери в диэлектрике конденсатора.

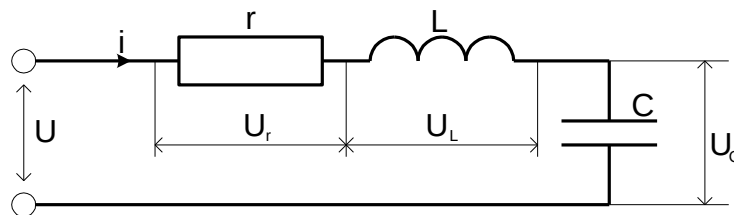


Рис. 2.1.5

В соответствии с законом Ома и вторым законом Кирхгофа для схемы замещения справедливо выражение:

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}[r + j(x_L - x_C)] = \dot{I}Z \quad (2.1.23)$$

Соответствующие векторные диаграммы представлены на рис. 2.1.6 а,б,в.

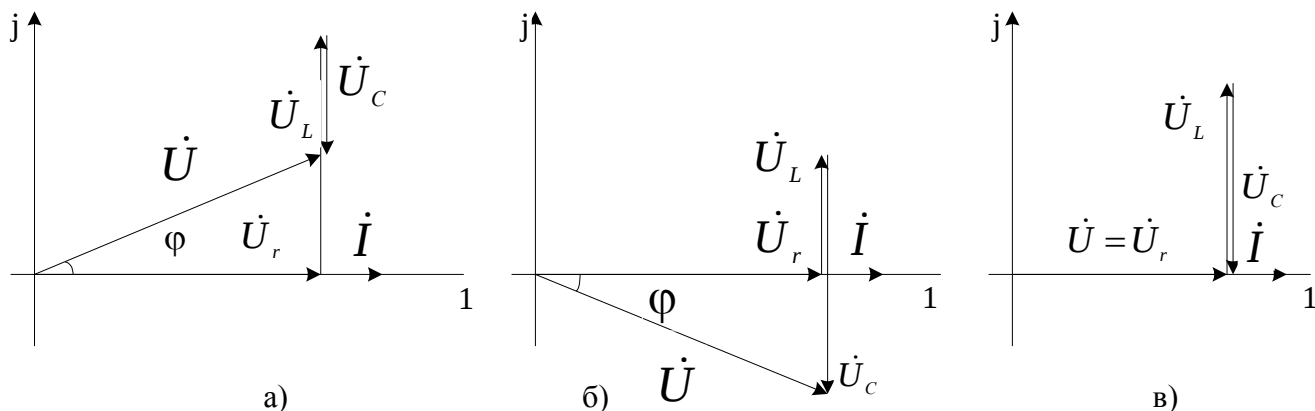


Рис. 2.1.6.

Рис. 2.1.6. а соответствует случаю, когда $x_L > x_C$, при этом ток по фазе отстает от напряжения на угол φ . Рис. 2.1.6.б соответствует случаю, когда $x_L < x_C$, при этом ток по фазе опережает напряжение. Если $x_L = x_C$, то ток и приложенное к цепи напряжение по фазе совпадают, величина тока в этом случае определяется только величиной напряжения и активным сопротивлением r , и не зависит от величины индуктивного и емкостного сопротивлений. Такой режим электрической цепи называют резонансом напряжений. При резонансе напряжений полная мощность равна активной ($\angle\varphi = 0$ и $\cos\varphi = 1$), то есть из сети электрическая цепь реактивной мощности не потребляет.

2.2 Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему, изображенную на рис. 2.2.1.

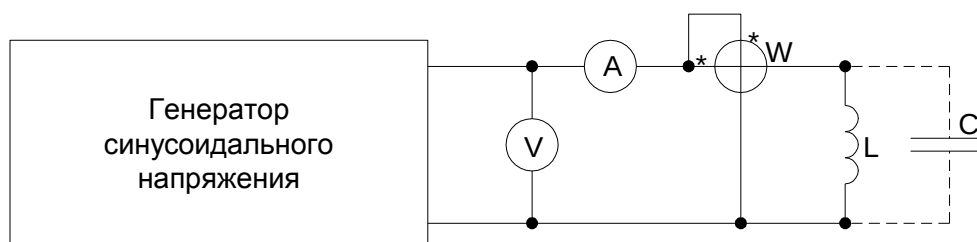


Рис. 2.2.1.

2. Получив у преподавателя катушку индуктивности, подсчитать величину индуктивного сопротивления по формуле $x_L = \omega L = 2\pi fL$ для частоты $f=200\text{Гц}$.

3. Определить максимально возможный ток в цепи при наибольшем напряжении генератора 10В:

$$I_{\max} = \frac{10}{x_L}.$$

Установить соответствующий предел измерения тока на мультиметре и на ваттметре. На мультиметре, предназначенном для измерения напряжения, установить предел 20В.

4. Включить приборы, на генератор подать питание и установить максимальное напряжение. При частотах, указанных преподавателем, произвести замеры напряжения, тока и мощности, результаты замеров занести в таблицу 2.2.1.

Таблица 2.2.1

Измерено				Вычислено						
f Гц	U В	I мА	P мВт	z Ом	x_L Ом	r Ом	$\cos \varphi$	U_L В	U_r В	L мГн

Вычисления выполнить по формулам:

$$z = \frac{U}{I}, r = \frac{P}{I^2}, x_L = \sqrt{z^2 - r^2}, \cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{P}{UI},$$

$$U_L = I \cdot x_L, U_r = I \cdot r, L = \frac{x_L}{2\pi f}.$$

5. По данным измерений и вычислений построить векторные диаграммы.

6. Заменить в схеме катушку индуктивности на конденсатор.

7. Для частоты 1 кГц вычислить сопротивление конденсатора, определить максимально возможный ток при напряжении питания 10В, установить соответствующие пределы измерения тока на мультиметре и вольтметре.

8. Выполнить действия, указанные в п.4, результаты замеров занести в таблицу 2.2.2.

Таблица 2.2.2

Измерено				Вычислено										
f Гц	U В	I мА	P мВт	z Ом	r Ом	x_c Ом	C мФ	g См	b_c См	y См	$\cos \varphi$	δ град	U_c В	U_r В

Вычисления выполнить по формулам:

$$z = \frac{U}{I}, r = \frac{P}{I^2}, x_c = \sqrt{z^2 - r^2}, C = \frac{1}{\omega x_c}, g = \frac{r}{z^2}, b_c = \frac{x_c}{z^2}, y = \sqrt{b_c^2 + g^2} = \frac{I}{U}$$

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{P}{UI}, \delta = \arctg \frac{r}{x_c}, U_r = I \cdot r, U_c = I \cdot x_c.$$

9. По результатам вычислений построить векторные диаграммы.

10. Выключив напряжение, собрать схему, изображенную на рис. 2.2.2. Параметр элемента схемы r получить у преподавателя, включить индуктивность и емкость, использованные в предыдущих опытах.

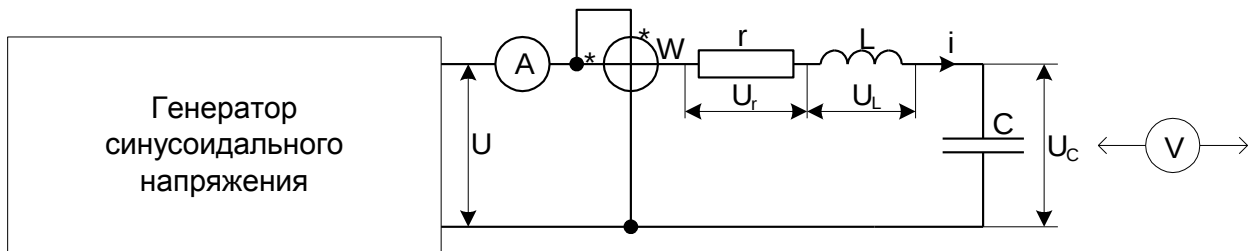


Рис. 2.2.2

11. Подключить приборы, подать напряжение питания на генератор. На генераторе установить максимальное напряжение и, изменяя частоту генератора, установить в цепи максимальный ток и максимальную мощность, что будет соответствовать резонансу напряжений.

12. При резонансе напряжений произвести замеры тока, напряжения и мощности. Напряжение измерять одним вольтметром, поочередно подключая его на соответствующие участки цепи. Результаты замеров занести в таблицу 2.2.3.

13. Увеличить емкость, включив параллельно установленному еще один конденсатор. Не меняя частоты f , повторить замеры, результаты занести во вторую строку таблицы 2.2.3.

14. Прделаав то же, что и в п.13, уменьшив емкость конденсатора по сравнению с первоначальной. Результаты замеров занести в третью строку таблицы.

Таблица 2.2.3

Установлено		Измерено						Вычислено								
f Гц	C мФ	U В	I мА	U_r В	$U_{\text{инд}}$ В	$U_{\text{емк}}$ В	P мВт	z Ом	$r_{\text{общ}}$ Ом	x_L Ом	x_c Ом	x Ом	U_a В	U_L В	U_c В	$\cos \varphi$

Вычисления выполнить по формулам:

$$Z = \frac{U}{I}, r_{\text{общ}} = \frac{P}{I^2} \approx \frac{U_r}{I} + r_L,$$

где r_L – определенное ранее активное сопротивление катушки индуктивности;

$X_L = \omega L = 2\pi fL$ (индуктивность найденная в предыдущих опытах);

$$X = \sqrt{Z^2 - r_{\text{общ}}^2}, X_c = |X - X_L|, \text{ (для первой строки } X_c = \frac{1}{\omega C}, \text{ где } C$$

найдена ранее); $U_a = I \cdot r_{\text{общ}}, U_L = I \cdot X_L, U_c = I \cdot X_c, \cos \varphi = \frac{P}{UI}.$

15. Построить векторные диаграммы, соответствующие трем последним опытам.

2.3 Контрольные вопросы

1. Как отличаются по фазе напряжение и ток в цепях с активным сопротивлением, с индуктивностью и с емкостью?

2. Что понимают под активным сопротивлением? Как определить его опытным путем в цепи переменного тока?

3. Как вычислить угловую частоту ω через круговую частоту f ?

4. Что понимают под полным сопротивлением цепи переменного тока?

5. Как вычислить индуктивное сопротивление катушки опытным путем? Как оно зависит от индуктивности и частоты?

6. Как определить емкость конденсатора, включенного в цепь синусоидального тока, опытным путем?

7. Что понимают под полной, активной и реактивной мощностями? Каково между ними соотношение?

8. Что называют коэффициентом мощности в цепи синусоидального тока?

9. Что такое угол диэлектрических потерь?

10. Как вычислить активную и реактивную проводимости конденсатора через сопротивление его схемы замещения?

11. Как строятся векторные диаграммы тока и напряжения при последовательном соединении активных и реактивных элементов?

12. Что такое комплекс сопротивления участка электрической цепи?

13. Какой режим называют режимом резонанса напряжений? При каких условиях он возникает?

14. Что называют э.д.с. самоиндукции, в результате чего она возникает, от чего зависит ее величина.

Лабораторная работа №3

Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений

Цель работы: экспериментальная проверка зависимости активного и реактивных сопротивлений от частоты, а также соотношений между напряжением, сопротивлениями, проводимостями и токами в цепи с параллельно включенными активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором.

3.1 Основные теоретические положения

При параллельном включении активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора (рис. 3.1) на все три элемента электрической цепи подаётся одно и то же напряжение u . Мгновенное значение тока i в неразветвлённой части цепи равно сумме мгновенных значений токов резистора i_r , катушки i_k и конденсатора i_c :

$$i = i_r + i_k + i_c \quad (3.1)$$

Соответствующее равенство справедливо для комплексов токов:

$$\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_k + \dot{I}_c \quad (3.2)$$

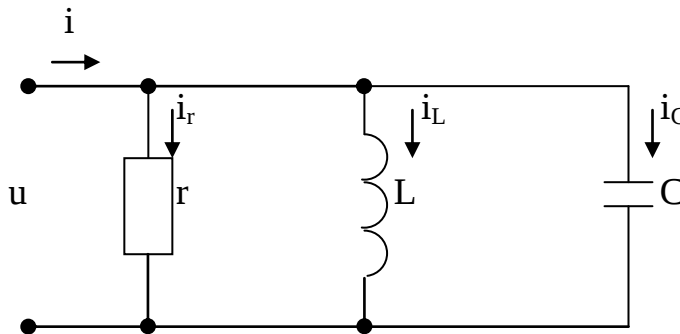


Рис.3.1

Комплексы токов определяются комплексом напряжения $\dot{U}$ и комплексными сопротивлениями соответствующих элементов цепи:

$$\dot{I}_r = \dot{U}/r, \quad \dot{I}_k = \dot{U}/Z_k, \quad \dot{I}_c = \dot{U}/Z_c \quad (3.3)$$

Комплексное сопротивление резистора равно его активному сопротивлению r , комплексное сопротивление катушки индуктивности учитывает её активное сопротивление r_k и индуктивность L : $Z_k = r_k + j\omega L = r_k + jx_L$.

При расчёте цепей с параллельно включёнными элементами удобнее пользоваться не сопротивлениями, а проводимостями:

$$Y_r = 1/r = g_r, \quad Y_k = 1/Z_k = 1/(r_k + j\omega L) = r/(r^2 + x_L^2) - jx_L/(r^2 + x_L^2) = g_k - jb_k \quad (3.4).$$

Комплексная проводимость конденсатора с учётом проводимости изоляции между обкладками g_c :

$$Y_c = g_c + j\omega C = g_c + jb_c \quad (3.5).$$

С учётом (3.3), (3.4) и (3.5) уравнение (3.2) примет вид:

$$\dot{I} = \dot{U}[(g_r + g_k + g_c) + j(b_c - b_k)] = \dot{U}Y \quad (3.6),$$

где

$$Y = (g_r + g_k + g_c) + j(b_c - b_k) = g + jb \quad (3.7) \text{ – комплексная проводимость цепи.}$$

Ток, протекающий через катушку индуктивности, можно представить в виде двух составляющих: активной $\dot{I}_{ак} = \dot{U}g_k$, по фазе совпадающей с напряжением, и реактивной $\dot{I}_L = -j\dot{U}b_L$, отстающей по фазе от напряжения на 90° . Ток, протекающий через конденсатор, также можно представить в виде суммы активной $\dot{I}_{ас} = \dot{U}g_c$ и реактивной $\dot{I}_{рс} = j\dot{U}b_c$ составляющих; реактивная составляющая опережает по фазе напряжение на 90° . Схема замещения при замене сопротивлений проводимостями имеет вид, изображённый на рис.3.2.

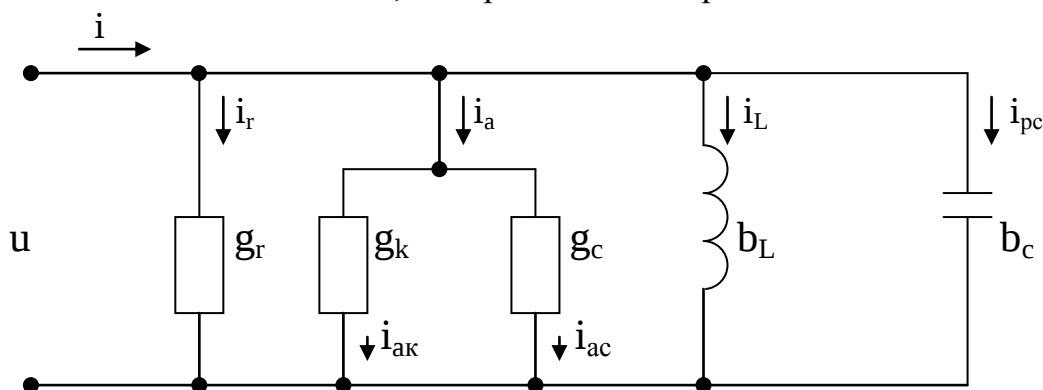


Рис.3.2.

Вид векторных диаграмм напряжения и токов рассматриваемой схемы зависит от соотношения проводимостей b_k и b_c (рис.3.3).

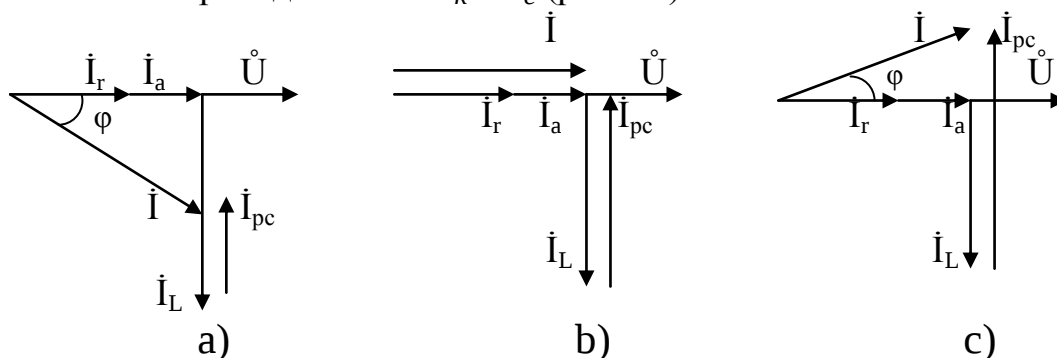


Рис.3.3.

Если $b_L > b_C$, то ток через индуктивность больше, чем через ёмкость, и ток в неразветвлённой части цепи по фазе отстаёт от напряжения (рис 3.3а). Если $b_L < b_C$, то ток через индуктивность меньше, чем ток через ёмкость, а ток в неразветвлённой части цепи по фазе опережает напряжение (рис.3.3с). При равенстве индуктивной и ёмкостной проводимостей величина тока в неразветвлен-

ной части цепи определяется только суммой активных проводимостей $g_r + g_k + g_c = g$, при этом ток по фазе совпадает с напряжением (рис.3.3b):

$$\dot{I} = \dot{U}g.$$

Векторная диаграмма, изображённая на рис.3.3b соответствует режиму резонанса токов, в этом режиме токи через индуктивность и через ёмкость равны по величине и противоположны по фазе, в неразветвлённой части цепи ток принимает минимальное значение.

3.2 Порядок выполнения работы

1. Детально ознакомившись с основными теоретическими положениями, собрать схему, изображённую на рис.3.4.

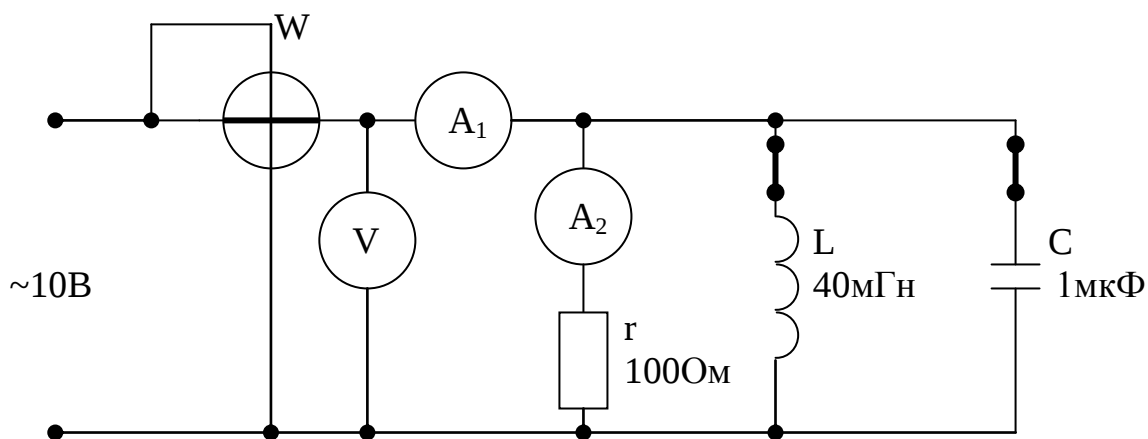


Рис.3.4.

Установить пределы измерений: вольтметра – 20В, амперметров – 200мА.

Подать напряжение питания и установить частоту f_0 , при которой в неразветвлённой части цепи ток примет минимальное значение. Значение частоты f_0 занести в таблицу 3.1.

2. Убрать перемычки в цепи катушки и конденсатора, по показаниям амперметра и вольтметра или амперметра и ваттметра проверить сопротивление и вычислить проводимость резистора.

$$r = U/I = P/I^2, \quad g_r = 1/r = I/U = P/U^2.$$

3. Разорвать цепь резистора и установить перемычку в цепи катушки, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости катушки.

$$r = P/I^2, \quad z_k = U/I, \quad x_L = \sqrt{(z_k^2 - r^2)}, \\ g_k = P/U^2, \quad y_k = I/U, \quad b_L = \sqrt{(y_k^2 - g_k^2)}.$$

4. Разорвать цепь катушки и установить перемычку в цепи конденсатора, используя формулы, аналогичные формулам п.3, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости конденсатора. Вычисленные значения сопротивлений и проводимостей занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

f_0 , Гц	Резистор		Катушка					Конденсатор					g, См
	г, Ом	g _r , См	г _k , Ом	g _k , См	x _L , Ом	b _L , См	L, Гн	г _c , Ом	g _c , См	x _c , Ом	b _c , См	C, мкФ	

5. Установить все перемычки, подключить амперметр A_2 , при частоте f_0 измерить потребляемую мощность, напряжение, ток в неразветвлённой части цепи и токи отдельных ветвей. Результаты замеров занести в таблицу 3.2.

6. Вычислить значения активных и реактивных составляющих токов через катушку и через конденсатор и коэффициент мощности, пользуясь выражениями:

$$I_{ak}=g_k U, \quad I_{ac}=g_c U, \quad I_a=I_{ak}+I_{ac}, \quad I_L=\sqrt{(I_k^2-I_{ak}^2)}, \quad I_{pc}=\sqrt{(I_c^2-I_{ac}^2)},$$

$$\cos\varphi=(I_r+I_{ak}+I_{ac})/I.$$

Результаты вычислений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2.

f, Гц	U, В	I, мА	I _r , мА	I _k , мА	I _c , мА	P, мВт	y, См	b, См	I _a , мА	I _L , мА	I _{pc} , мА	cosφ
f ₁ =												
f ₀ =												
f ₂ =												

7. При частотах $f_1=f_0-200$ Гц и $f_2=f_0+200$ Гц произвести те же измерения и вычисления, что и при частоте f_0 , результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2. При выполнении расчётов не следует забывать, что сопротивления и проводимости индуктивности и ёмкости зависят от частоты.

8. По результатам измерений и вычислений построить векторные диаграммы, аналогичные представленным на рис.3.3.

3.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
3. Схема замещения.
4. Таблицы опытных и вычисленных данных.
5. Векторные диаграммы напряжения и токов для трёх частот.

3.4 Контрольные вопросы

1. Как определить активную и реактивную проводимости катушки, если известны её активное и индуктивное сопротивления?

2. Как зависят реактивные проводимости катушки индуктивности и конденсатора от частоты?

3. Как определить активную проводимость катушки индуктивности или конденсатора, пользуясь показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра?

4. Как определить полную проводимость участка электрической цепи по показаниям электроизмерительных приборов?

5. Как отличаются по фазе приложенное напряжение и ток, протекающий по катушке индуктивности? через конденсатор?

6. Почему и как изменится ток через конденсатор (через катушку индуктивности) при увеличении частоты приложенного напряжения?

7. В какой электрической цепи может возникнуть режим резонанса токов? Каково условие его возникновения? Поясните физическую сущность режима резонанса токов.

Лабораторная работа №4

Исследование трёхфазной системы при соединении потребителей звездой

Цель работы: ознакомиться опытным путём с режимами работы трёхфазной цепи при соединении потребителей звездой при симметричной и несимметричных нагрузках, получить практические навыки расчёта и испытания трёхфазных цепей, а также построения векторных диаграмм.

4.1 Основные теоретические положения

Трёхфазной электрической цепью называется система, состоящая из трёх однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе на 120° и создаваемые общим (трёхфазным) источником электроэнергии.

Каждую из трёх однофазных цепей, входящих в трёхфазную цепь, называют фазой. Трёхфазную электрическую систему, состоящую из трёхфазного источника электроэнергии и трёхфазной нагрузки называют *симметричной*, если э.д.с. трёх фаз равны по величине, а сопротивления нагрузки фаз равны по величине и по характеру (т.е. во всех фазах должны быть одинаковыми и активные, и реактивные сопротивления). В симметричной системе напряжения, токи и углы фазового сдвига между токами и напряжениями во всех трёх фазах одинаковы; такой режим трёхфазной системы называют *симметричным*. Трёхфазные генераторы создают симметричную систему э.д.с., *несимметричные* режимы возникают из-за несимметричной нагрузки фаз, возникающей главным образом из-за наличия однофазных потребителей.

Если концы обмоток синхронного генератора или вторичной обмотки питающего трансформатора соединить вместе (эту точку соединения называют нейтральной точкой), от начал обмоток провести проводники к начальным выводам трёхфазной нагрузки, а конечные выводы нагрузки также соединить вме-

сте, то полученная схема соединения носит название соединения звездой (рис.4.1).

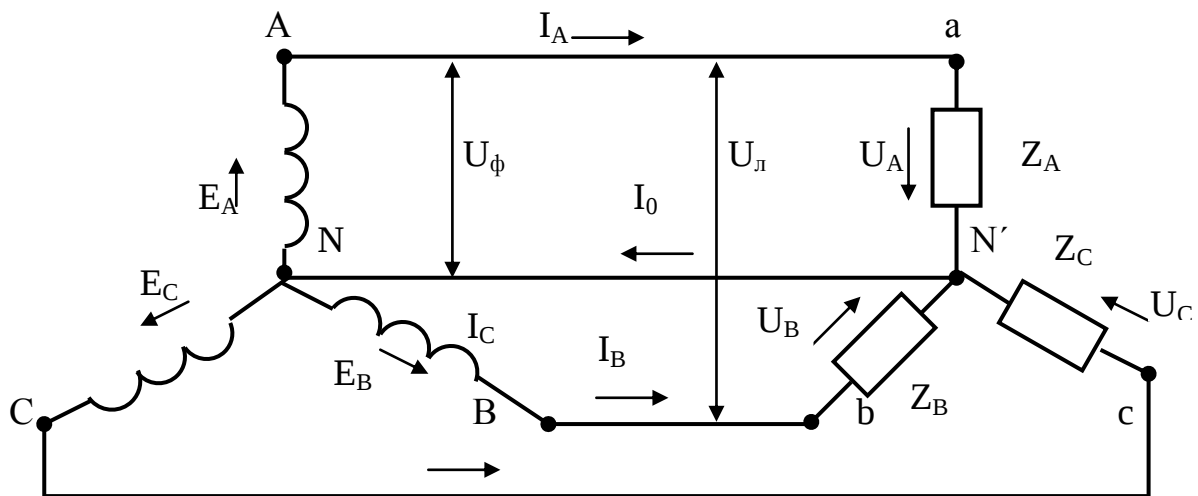


Рис.4.1.

Провода, соединяющие начальные выводы нагрузки и обмоток источника питания, называют линейными, провод, соединяющий нейтральные точки источника и нагрузки, называют нейтральным проводом. Напряжения между линейными проводами называют *линейными*, напряжения между каждым линейным проводом и нейтральным проводом называют *фазными*.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, для линейных и фазных напряжений справедливы соотношения:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

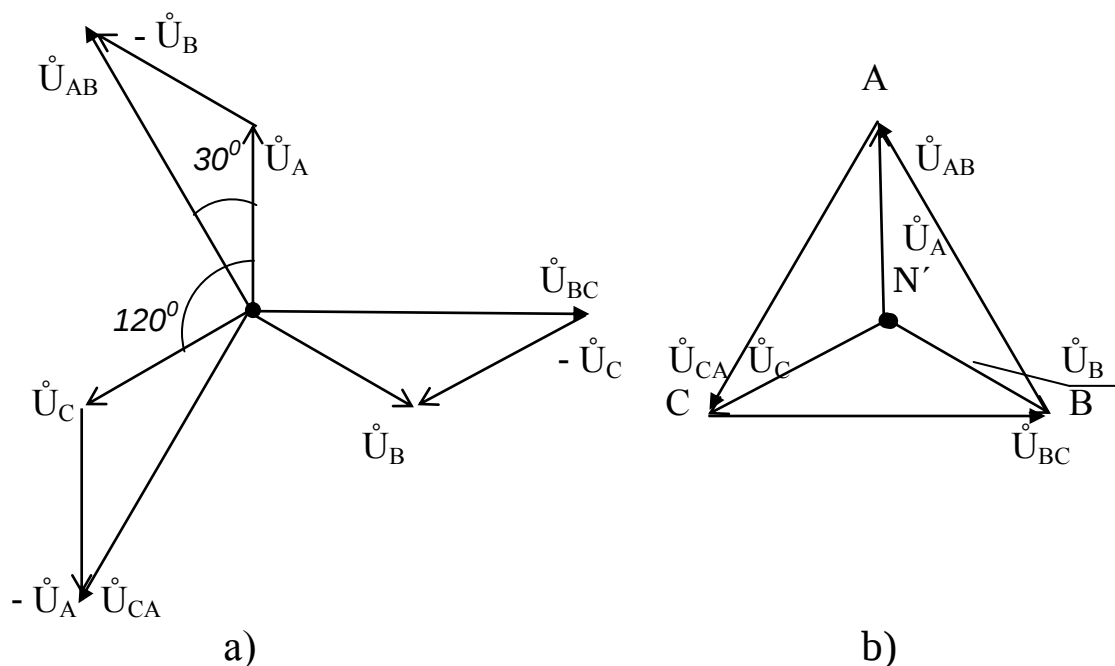


Рис.4.2.

Записанным соотношениям соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис.4.2а. Из треугольника, образованного двумя фазными и линейным напряжением следует, что линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного:

$$U_l = \sqrt{3}U_\phi,$$

звезда линейных напряжений опережает звезду фазных напряжений на 30° .

Если векторы линейных напряжений параллельным переносом поместить между концами векторов фазных напряжений, то получится топографическая диаграмма напряжений трёхфазной системы, соединённой звездой. Напряжение между любыми двумя точками электрической схемы, например, между точками А и В, по величине и фазе определяется вектором, проведённым на топографической диаграмме между этими двумя точками (рис.4.2.б).

Токи, протекающие по линейным проводам, называются *линейными*, токи, протекающие в фазах нагрузки и фазах источника, называются *фазными*. При соединении звездой фазные токи равны линейным. В соответствии с первым законом Кирхгофа, сумма токов в нейтральной точке равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C - \dot{I}_0 = 0,$$

откуда ток нулевого провода $\dot{I}_0 = (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)$.

При симметричной нагрузке фазные токи равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° , поэтому ток нулевого провода равен нулю. Векторная диаграмма, соответствующая симметричной активной нагрузке, представлена на рис.4.3а.

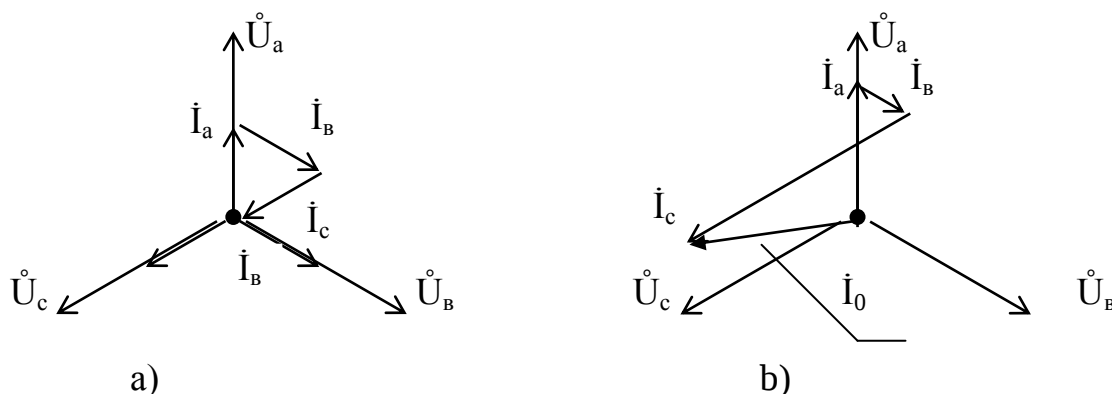


Рис.4.3.

Значения фазных токов определяются фазными напряжениями и комплексными сопротивлениями соответствующих фаз нагрузки:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / Z_a = \dot{U}_a / (r_a + jx_a), \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b / (r_b + jx_b), \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c / (r_c + jx_c).$$

Векторная диаграмма токов и фазных напряжений при несимметричной активной нагрузке представлена на рис. 4.3б, токи при такой нагрузке пропорциональны проводимостям соответствующих фаз и по фазе совпадают с напряжениями. При наличии реактивных сопротивлений фазы токов будут отличаться от фаз напряжений, углы фазовых сдвигов определяются соотношениями:

$$\varphi_a = \arctg x_a / r_a, \quad \varphi_b = \arctg x_b / r_b, \quad \varphi_c = \arctg x_c / r_c.$$

Предельным случаем неравномерной нагрузки в четырехпроводной трехфазной системе можно считать обрыв одного из линейных проводов, при этом режимы двух других фаз не изменятся, а ток нулевого провода будет равен сумме токов

этих фаз. Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, представлена на рис.4.4.

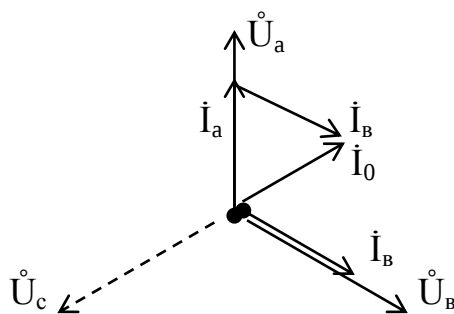


Рис.4.4.

Следует подчеркнуть, что в четырехпроводной системе при достаточно малом сопротивлении нулевого провода фазные напряжения не зависят от сопротивлений фаз нагрузки, т.к. потенциал нейтральной точки нагрузки благодаря наличию нулевого провода равен потенциалу нейтральной точки источника питания. Четырехпроводная система удобна также тем, что позволяет иметь для потребителей два уровня напряжения: линейное и фазное.

При симметричной как активной, так и активно-реактивной нагрузке отсутствие нулевого провода не повлияет на режим трёхфазной системы, и векторная диаграмма будет выглядеть так, как это представлено на рис. 4.3а.

Если же нагрузка несимметричная, то отсутствие нулевого провода в режим работы трёхфазной системы внесёт существенные изменения. Линейные напряжения останутся прежними, а фазные напряжения на нагрузке будут пропорциональны сопротивлениям фаз, при этом изменится потенциал нейтральной точки нагрузки, в связи с чем фазные напряжения изменятся не только по величине, но и по фазе. Векторная диаграмма, соответствующая несимметричной нагрузке в трёхпроводной системе, представлена на рис.4.5.

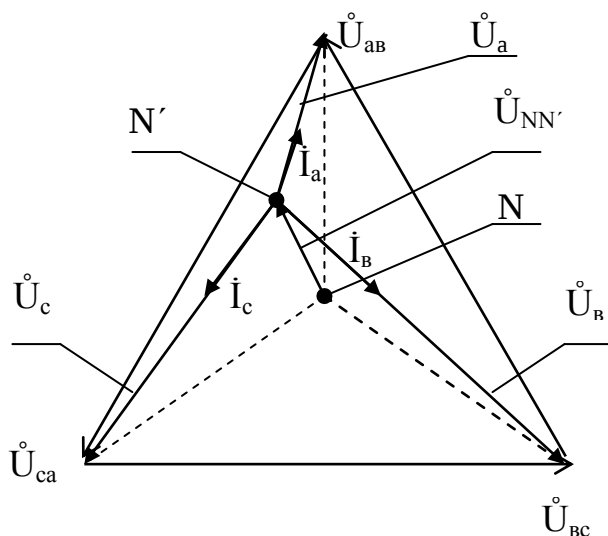


Рис.4.5.

Разность потенциалов между точками N и N' называют напряжением смещения нейтрали.

При обрыве одного из линейных проводов сопротивления двух других фаз оказываются подключёнными последовательно на линейное напряжение. Например, при обрыве линейного провода фазы C на топографической диаграмме точка нейтрали N' располагается на векторе линейного напряжения $\dot{U}_{ab}$, если до обрыва нагрузка была симметричной - на середине этого вектора. Соответствующая топографическая диаграмма при активной нагрузке представлена на рис.4.6.

При коротком замыкании в цепи одной из фаз нагрузки сопротивления двух других фаз оказываются под линейными напряжениями. Так, если короткое замыкание произошло в цепи фазы C, то напряжение на нагрузке Z_a будет равно линейному $\dot{U}_{ca}$, а напряжение на нагрузке Z_b будет равно линейному $\dot{U}_{cb}$. Таким образом, токи фаз A и B увеличатся в $\sqrt{3}$ раз, а ток короткого замыкания фазы C будет равен геометрической сумме этих токов, взятой со знаком «-»:

$$\dot{I}_c = -(\dot{I}_a + \dot{I}_b).$$

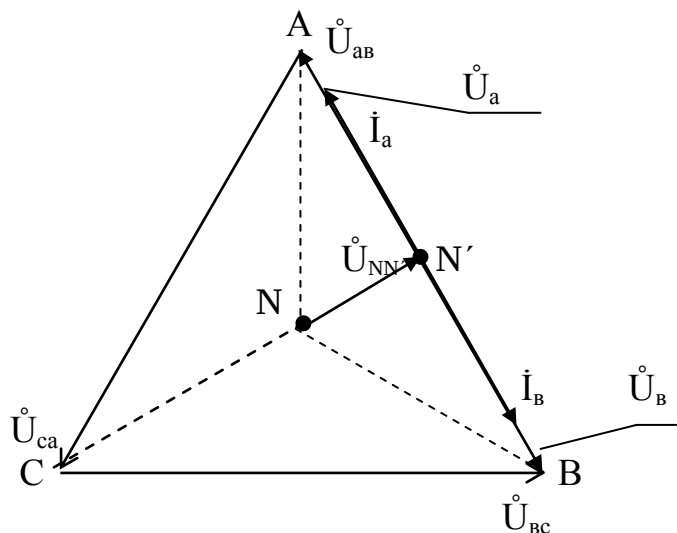


Рис.4.6.

Векторная диаграмма, соответствующая короткому замыканию фазы C, изображена на рис.4.7.

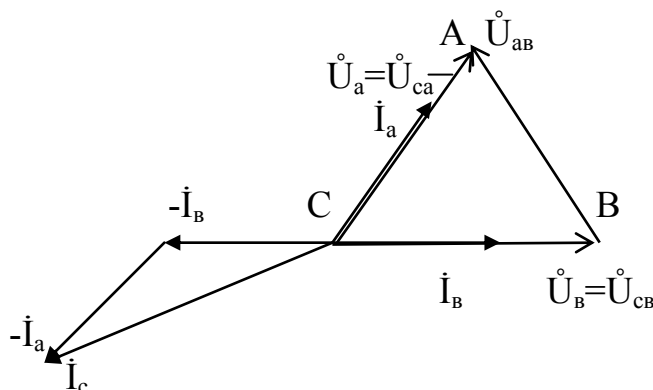


Рис.4.7.

4.2. Порядок выполнения работы

1. Изучить основные теоретические положения.

2. Собрать четырехпроводную схему (рис.4.8). В качестве нагрузки использовать три резистора сопротивлением 1 кОм. Установить пределы измерения тока 200 мА, напряжения – 20 В. Для измерения линейных, фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали использовать один вольтметр.

3. Провести испытания четырехпроводной трёхфазной системы в следующих трёх режимах:

а) режим симметричной нагрузки, при котором в цепи каждой фазы включены резисторы сопротивлением 1 кОм;

б) режим несимметричной нагрузки, при сопротивлениях резисторов 220, 470 Ом и 1 кОм (либо при других разных сопротивлениях – по указанию преподавателя);

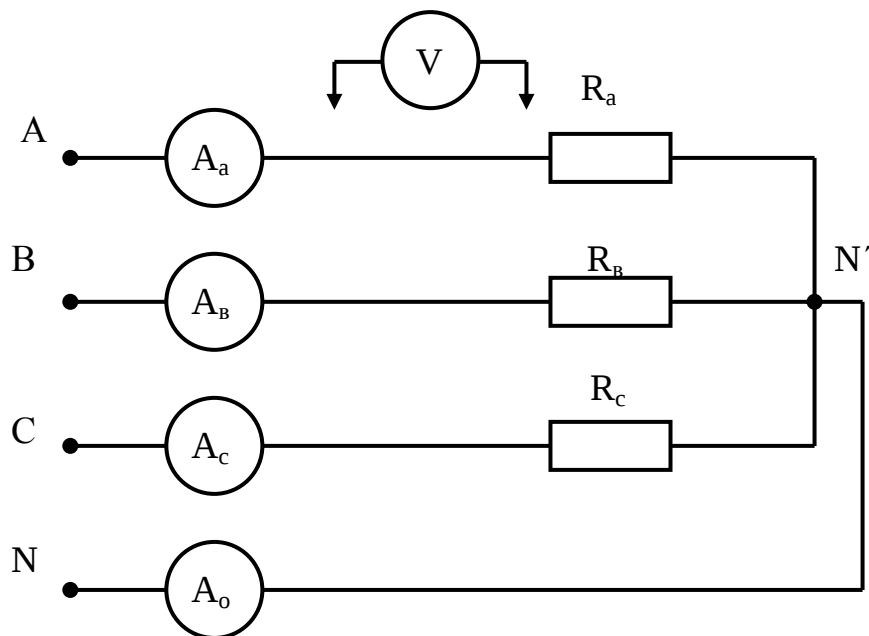


Рис.4.8.

в) обрыв линейного провода; для создания этого режима необходимо убрать сопротивление одной из фаз, а в цепи двух других установить сопротивления 1 кОм. В перечисленных трёх режимах необходимо измерять следующие величины: линейные токи и ток нейтрального провода, линейные и фазные напряжения.

4. Убрать из схемы нейтральный провод и произвести испытания трёхпроводной схемы в следующих режимах:

а) режим симметричной нагрузки при сопротивлениях нагрузки 1 кОм;

б) режим несимметричной нагрузки (аналогично 3б);

в) обрыв линейного провода (аналогично 3в);

г) короткое замыкание в цепи одной фазы; для создания этого режима вместо одного из резисторов нагрузки необходимо установить перемычку, в цепи двух других фаз – сопротивления 1 кОм. В последних четырёх режимах

необходимо измерять напряжение смещения нейтрали и все те же величины, что и в предыдущих трёх опытах, за исключением тока нейтрального провода. Результаты всех измерений занести в таблицу 4.1.

5. По результатам измерений построить в масштабе на миллиметровой бумаге векторные диаграммы, соответствующие всем семи опытам. Построение векторной диаграммы для несимметричного режима без нулевого провода выполнить в последовательности: построить равносторонний треугольник линейных напряжений, затем засечками из углов треугольника построить векторы фазных напряжений.

Таблица 4.1.

Измеренные величины	Режимы работы	С нулевым проводом			Без нулевого провода			
		а	б	в	а	б	в	г
	I_a ,							
	I							
	I_c ,							
	I_o ,							
	U_a ,							
	U							
	U_c ,							
	U							
	U							
	U_{ca}							
	$U_{NN'}$							

4.3.Содержание отчёта

- 1.Основные теоретические положения.
- 2.Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
- 3.Таблица опытных данных.
- 4.Векторные диаграммы.

4.4.Контрольные вопросы

- 1.Как строится трёхфазная система при соединении звездой?
- 2.Какие токи и напряжения называют фазными, и какие – линейными?
- 3.Разность потенциалов между какими точками называют напряжением смещения нейтрали?
- 4.Какие последствия возникают в трёхфазной системе при обрыве нейтрального провода?
- 5.Какое соотношение существует в трёхфазной системе, соединённой звездой, между линейным и фазным напряжениями и токами?

6. Как изменятся фазные напряжения на нагрузке при обрыве одного из линейных проводов в трёхфазной системе с нулевым проводом и без него?

7. Как определить величину тока в нейтральном проводе?

8. Как изменятся линейные токи при коротком замыкании в одной из фаз нагрузки?

Лабораторная работа №5

Трёхфазная цепь при соединении потребителей треугольником

Цель работы: исследовать особенности работы трёхфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, проанализировать аварийные режимы рассматриваемой цепи, усвоить методику построения векторных диаграмм по результатам эксперимента.

5.1 Основные теоретические положения

Соединение трёхфазного потребителя треугольником получается, когда конец каждой предыдущей фазы нагрузки подсоединён к началу следующей, а к местам соединений подведены линейные провода от источника питания (рис. 5.1). При этом фазы источника питания (генератора или трансформатора) могут быть соединены как треугольником, так и звездой.

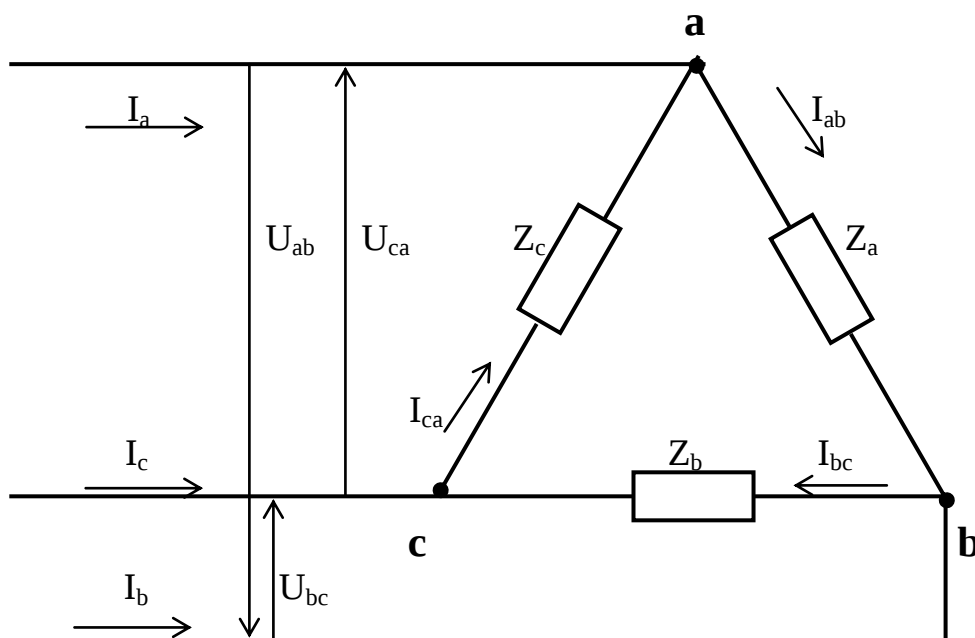


Рис. 5.1.

При соединении треугольником фазные напряжения равны линейным:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{ab}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_{bc}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_{ca}.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа для линейных и фазных токов справедливы соотношения (см. рис. 5.1):

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Векторные диаграммы при симметричной и несимметричной активных нагрузках представлены соответственно на рис. 5.2,а и 5.2,б. При симметричной нагрузке векторы как фазных, так и линейных токов образуют симметричную звезду, линейные токи по фазе отстают от фазных на угол 30° , а по величине больше фазных в $\sqrt{3}$ раз. При несимметричной нагрузке фазные токи пропорциональны проводимостям фаз, причём, даже при активной несимметричной нагрузке линейные токи оказываются сдвинутыми друг относительно друга на углы, отличные от 120° .

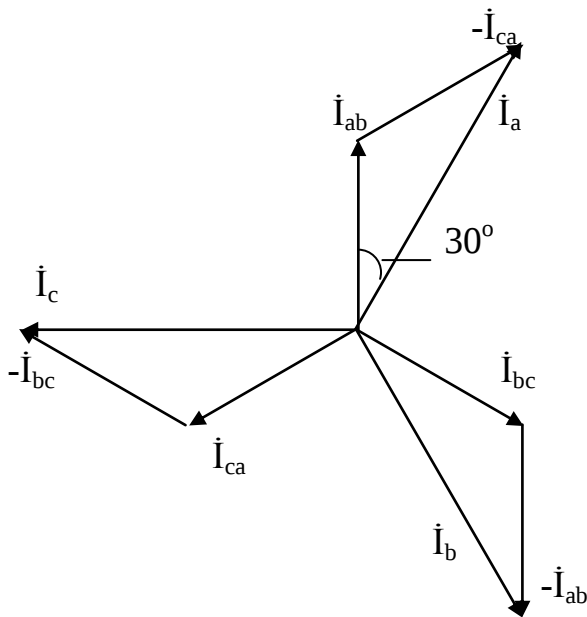


Рис.5.2а.

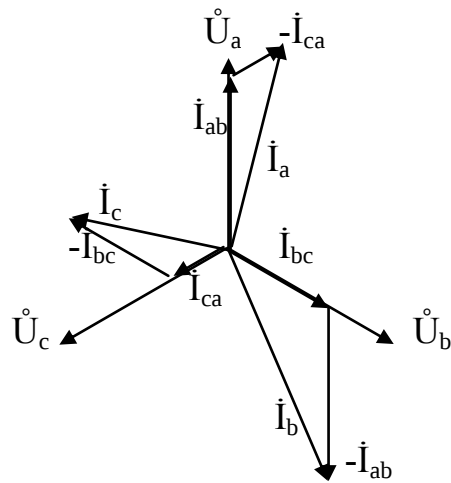


Рис.5.2б.

При подключении трёхфазных приёмников треугольником могут возникнуть такие аварийные режимы, как обрыв линейного провода и обрыв цепи одной из фаз. При обрыве линейного провода, например, провода фазы «с», ток в цепи нагрузки будет протекать под действием напряжения $\dot{U}_{ab}$, сопротивления фаз «b» и «с» становятся включёнными последовательно на это напряжение:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / Z_a, \quad \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} = -\dot{U}_{ab} / (Z_b + Z_c).$$

Линейные токи при этом равны сумме фазных:

$$\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc}.$$

Векторная диаграмма, соответствующая обрыву линейного провода фазы «с» при активной симметричной нагрузке представлена на рис. 5.3,а. В выражениях для токов знаки соответствуют условным положительным направлениям, указанным на рис. 5.1.

При обрыве в цепи одной из фаз нагрузки режим работы двух других фаз не меняется, т.к. они по-прежнему находятся под действием линейных напряжений.

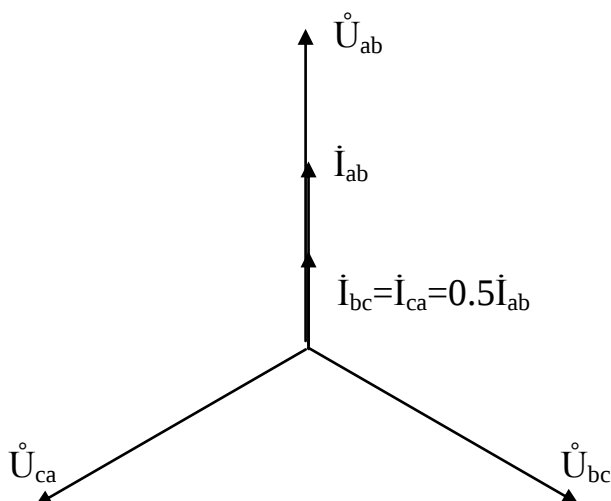


Рис. 5.3а.

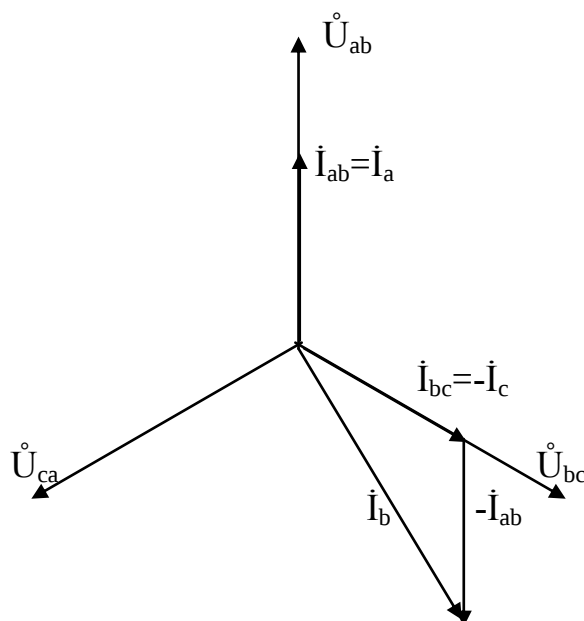


Рис. 5.3б.

Например, если обрыв произошёл на участке между выводами «с» и «а», токи $\dot{I}_{ab}$ и $\dot{I}_{bc}$, а также линейный ток $\dot{I}_b$ остаются прежними, а линейные токи двух других фаз становятся равными фазным токам:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_c = -\dot{I}_{bc}.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов, соответствующая обрыву в цепи нагрузки фазы «с» при одинаковых активных сопротивлениях в цепи двух других фаз, представлена на рис. 5.3,б.

5.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить основные теоретические положения данной работы.
2. Собрать схему, представленную на рис. 5.4. В качестве нагрузки включить резисторы сопротивлением 1 кОм, обязательно предусмотреть перемычки, указанные на чертеже, т.к. замер линейных и фазных токов потребует производиться одним прибором, включая его вместо снимаемых перемычек.
3. Замерить фазные (они же линейные) напряжения на нагрузке, результаты замеров внести в таблицу 5.1. Замерить фазные и линейные токи, результаты замеров внести в таблицу 5.2.
4. Убрать перемычку в цепи одного из линейных проводов, после чего произвести замеры всех напряжений и токов, внести результаты замеров в соответствующие таблицы.
5. Установить на место убранный перемычку и убрать перемычку в цепи одной из фаз нагрузки, после чего сделать замеры и записать в таблицу 5.2 значения всех токов.

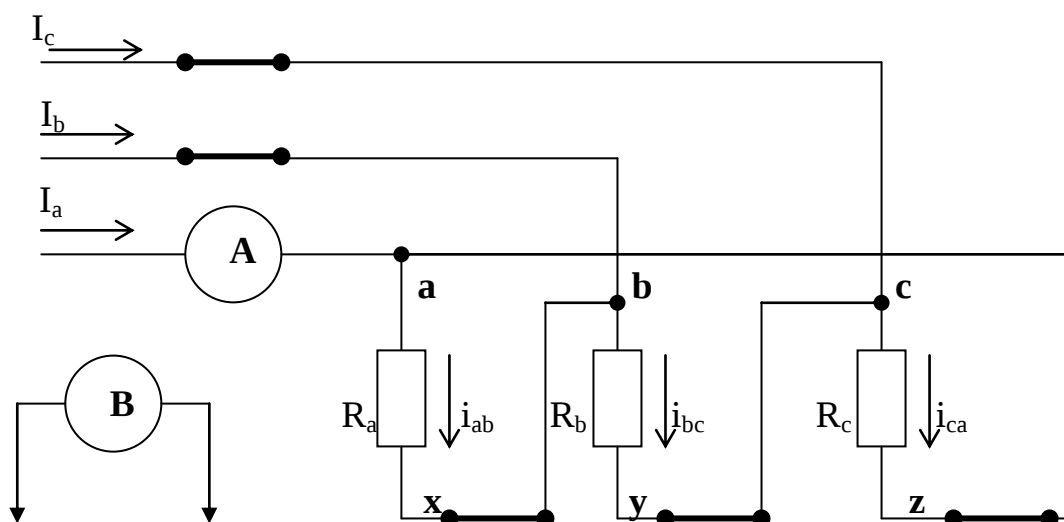


Рис. 5.4.

6. Выключив напряжение питания, по указанию преподавателя заменить сопротивления двух фаз. Произвести замеры линейных и фазных токов, результаты замеров внести в таблицу.

7. По результатам замеров в масштабе построить векторные диаграммы по результатам опытов пунктов 3,4,5 и 6.

8. Сравнить результаты измерений токов при симметричной и несимметричной нагрузках, сделать соответствующие выводы.

9. Проанализировать влияние на режим работы цепи обрыва линейного провода и обрыва в цепи одной из фаз нагрузки.

Таблица 5.1.

Напряжение Режим	$U_{ab}, \text{В}$	$U_{bc}, \text{В}$	$U_{ca}, \text{В}$
Обрыв линейного провода			
Все остальные режимы			

Таблица 5.2.

Токи Режимы	$I_a, \text{мА}$	$I_b, \text{мА}$	$I_c, \text{мА}$	$I_{ab}, \text{мА}$	$I_{bc}, \text{мА}$	$I_{ca}, \text{мА}$
Симметричная нагрузка						
Обрыв линейного провода						
Обрыв в цепи одной фазы						
Несимметричная нагрузка						

5.3.Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Схема лабораторной установки.
3. Таблицы опытных данных.
4. Векторные диаграммы.
5. Выводы по результатам замеров токов и напряжений при различных режимах работы трёхфазной цепи.

5.4.Контрольные вопросы

1. Как осуществляется соединение трёхфазной нагрузки по схеме «треугольник»?
2. Какую трёхфазную нагрузку называют симметричной?
3. Каково соотношение между линейными и фазными токами симметричной трёхфазной нагрузки, соединённой треугольником?
4. От чего зависят углы фазовых сдвигов между линейными токами при соединении потребителей треугольником, а также между фазными токами?
- 5.Опишите изменения в режиме работы соединённой треугольником трёхфазной нагрузки при обрыве линейного провода и в цепи одной фазы.
6. Объясните порядок построения векторных диаграмм для всех режимов трёхфазной цепи, при которых проводились испытания.

Лабораторная работа №6

Частотные характеристики последовательного резонансного контура

6.1 Основные теоретические положения

Частотными характеристиками называют зависимости сопротивлений и проводимостей электрической цепи от частоты приложенного синусоидального напряжения . К ним также относят зависимости от частоты токов, напряжений, фазовых сдвигов и мощности. В последовательном резонансном контуре, изображенном на рис.6.1.1, активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, емкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$X_L(\omega) = \omega L, X_C(\omega) = 1/\omega C, X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega).$$

Полное сопротивление контура, как следует из треугольника сопротивлений (рис.6.1,б):

$$z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$$

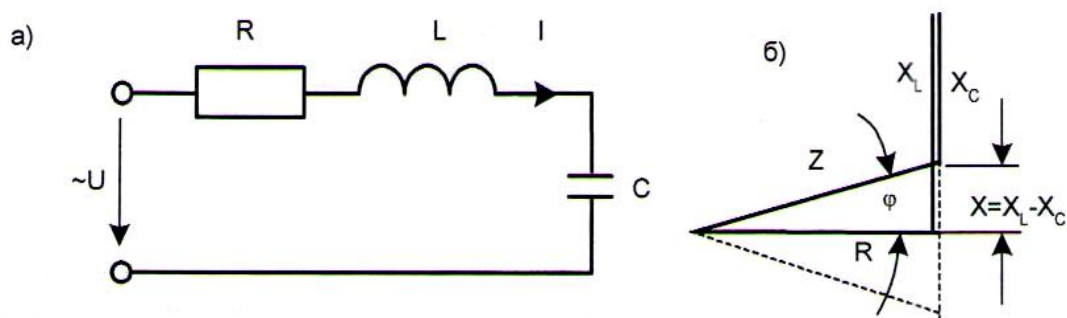


Рис.6.1

При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений имеет место режим *резонанса напряжений*, при котором напряжения на ёмкости и индуктивности равны по величине и противоположны по фазе. В этом режиме величина тока в контуре равна отношению приложенного напряжения к активному сопротивлению цепи, т.к. реактивное сопротивление равно нулю.

Частота, при которой возникает резонанс, называется *резонансной*

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC},$$

а сопротивление при этой частоте

$$X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) = \sqrt{L/C} = \rho$$

называется *характеристическим сопротивлением* резонансного контура.

Отношение сопротивлений $\rho/R = Q$ называется *добротностью* резонансного контура.

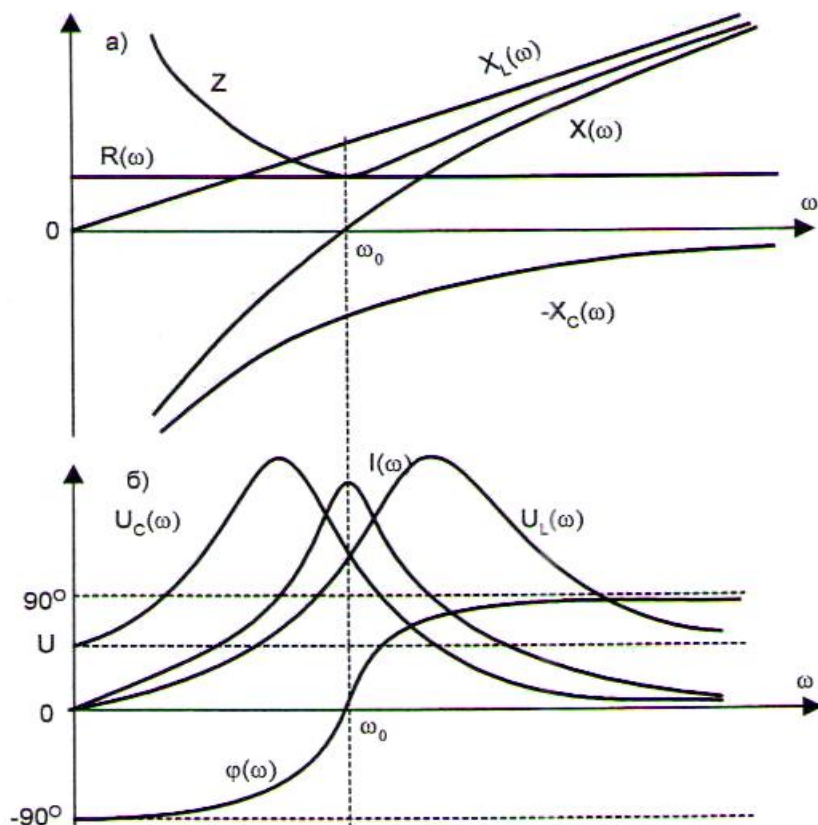


Рис.6.2.

На рис.6.2,а показаны графики изменения сопротивлений рассматриваемого контура от частоты. На рис. 6.2,б представлены графики зависимости от частоты тока, напряжений на элементах контура и угла фазового сдвига между током и приложенным напряжением, которое остаётся постоянным по амплитуде при всех частотах. Эти величины изменяются в соответствии с выражениями:

$$I(\omega)=U/Z(\omega); U_L(\omega)=\omega L*I(\omega); U_C=I(\omega)/(\omega C); \\ \varphi(\omega)=\arctg[(\omega L-1/(\omega C))/R].$$

Если добротность $Q>1$, то при резонансе напряжения на индуктивности и ёмкости превышают приложенное напряжение в Q раз.

При $\omega < \omega_0$ $\varphi(\omega)<0$, т.е. ток по фазе опережает напряжение и цепь носит ёмкостный характер, при $\omega > \omega_0$ $\varphi(\omega)>0$, т.е. цепь носит индуктивный характер. В режиме резонанса $\varphi(\omega)=0$, коэффициент мощности $\cos\varphi=1$.

6.2 Порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики последовательного резонансного контура:

$$R(\omega), X(\omega), Z(\omega), I(\omega), U_L(\omega), U_C(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

1. Соберите схему, изображенную на рисунке 6.2.1.

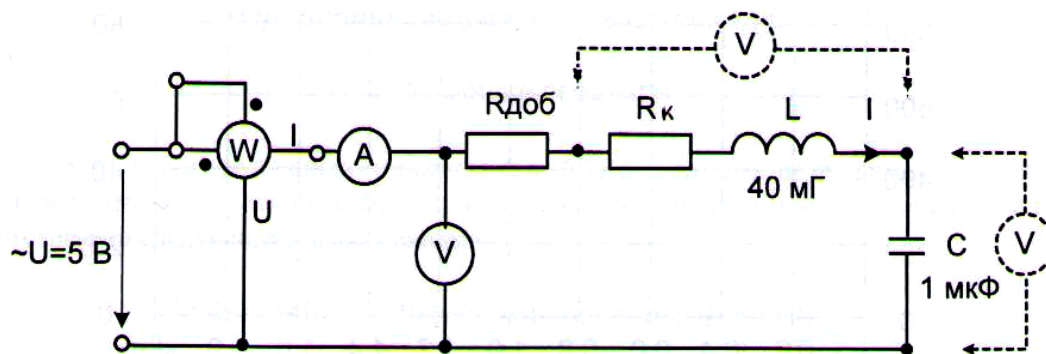


Рис.6.3.

Используйте добавочное сопротивление 100Ом. Установите пределы измерения: тока – 200мА, напряжения – 20В.

2. Омметром измерьте сумму сопротивлений $R=R_k+R_{доб}$.

3. Вычислите резонансную частоту и добротность контура, соответствующие измеренному сопротивлению и $C=1\text{мкФ}$ и $L=0,04\text{Гн}$:

$$f_0=1/2\pi\sqrt{LC} = \quad \text{Гц}, \rho = \sqrt{L/C} = \quad \text{Ом}, Q = \rho/R =$$

4. Подайте напряжение на приборы и на генератор синусоидального напряжения. Изменяя частоту напряжения, подайте такое её значение, при котором ток в цепи примет максимальное значение. Сравните вычисленное и экспериментальное значения резонансной частоты.

5.Изменяя частоту от 0,3 до 1,5 кГц с интервалом 0,1 кГц, запишите в таблицу 6.1 значения частоты, мощности, тока, напряжений на конденсаторе и на катушке индуктивности совместно с добавочным сопротивлением. Напряжения измеряйте поочерёдно одним и тем же вольтметром. При каждой частоте проверяйте величину поданного напряжения, которое должно равняться 5В.

6.По экспериментальным данным рассчитайте

$$Z = U/I, Z_{RL} = U_{RL}/I, X_L = \sqrt{(Z_{RL}^2 - R^2)}, X_C = U_C/I,$$

$$X = X_L - X_C, U_L = I \cdot X_L, \varphi(\omega) = \arccos P/(UI).$$

Вычисленные значения внесите в таблицу.

Таблица 6.1.

f , Гц	P , мВт	I , мА	U_C , В	U_{RL} , В	Z , Ом	Z_{RL} , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	U_L , В	X , Ом	φ , град
0,3											
0,4											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f_0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1,5											

7.Постройте графики частотных характеристик по экспериментально полученным и вычисленным значениям сопротивлений, напряжений, тока и угла фазового сдвига, аналогичные представленным на рис. 6.2.

8.Включите в цепь добавочное сопротивление 220 Ом и убедитесь, что резонансная частота не изменилась, а ток и напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе стали меньше. Запишите их значения.

6.3.Содержание отчёта

- 1.Основные теоретические положения.
- 2.Принципиальная схема электрической цепи последовательного резонансного контура.
- 3.Вычисленные и экспериментальные значения резонансной частоты.
- 4.Таблица опытных и вычисленных значений величин.
- 5.Графики частотных характеристик.
- 6.Векторные диаграммы при $\omega < \omega_0$, $\omega = \omega_0$, $\omega > \omega_0$.

6.4 Контрольные вопросы

- 1.Как зависят от частоты сопротивления катушки индуктивности и конден-

сатора?

2. Каково условие возникновения резонанса напряжений в последовательном резонансном контуре?

3. Поясните физическую сущность резонанса напряжений.

4. Как вычислить резонансную частоту?

5. Что понимают под добротностью резонансного контура?

6. Как изменяется в последовательном резонансном контуре угол фазового сдвига между током и приложенным к контуру напряжением при изменении частоты?

7. Как вычислить значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора по измеренным значениям тока и напряжений и заданному значению частоты?

Лабораторная работа №7

Частотные характеристики параллельного резонансного контура

7.1 Основные теоретические положения

В параллельном резонансном контуре (рис. 7.1.1 а) активная проводимость G не зависит от частоты, а индуктивная B_L , емкостная B_C и реактивная B изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$B_L(\omega) = \frac{1}{\omega L}; \quad B_C(\omega) = \omega C; \quad B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega).$$

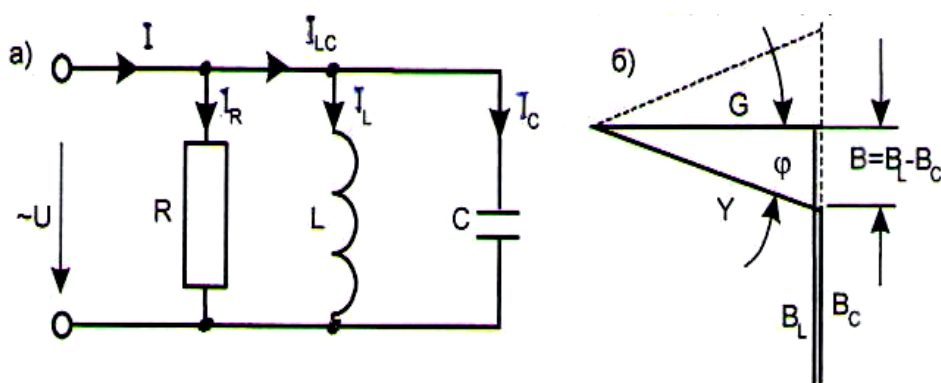


Рис. 7.1.

Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей (рис. 7.1,б):

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

Вид этих зависимостей представлен на рис. 7.2. При *резонансной* частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ индуктивная и емкостная проводимости равны друг другу:

$$B_L(\omega_0) = B_C(\omega_0) = \sqrt{C/L} = \gamma.$$

Проводимость γ называют *характеристической проводимостью* параллельного резонансного контура, а отношение

$$\gamma/G = Q$$

называют *добротностью* резонансного контура.

При резонансе в рассматриваемом контуре токи через ёмкость и через индуктивность равны друг другу и противоположны по фазе, ток, потребляемый от источника, равен току в ветви с активной проводимостью, по фазе он совпадает с приложенным напряжением, ток I_{LC} реактивной части цепи равен нулю, угол $\varphi = 0$, коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Описанный режим называют режимом *резонанса токов*.

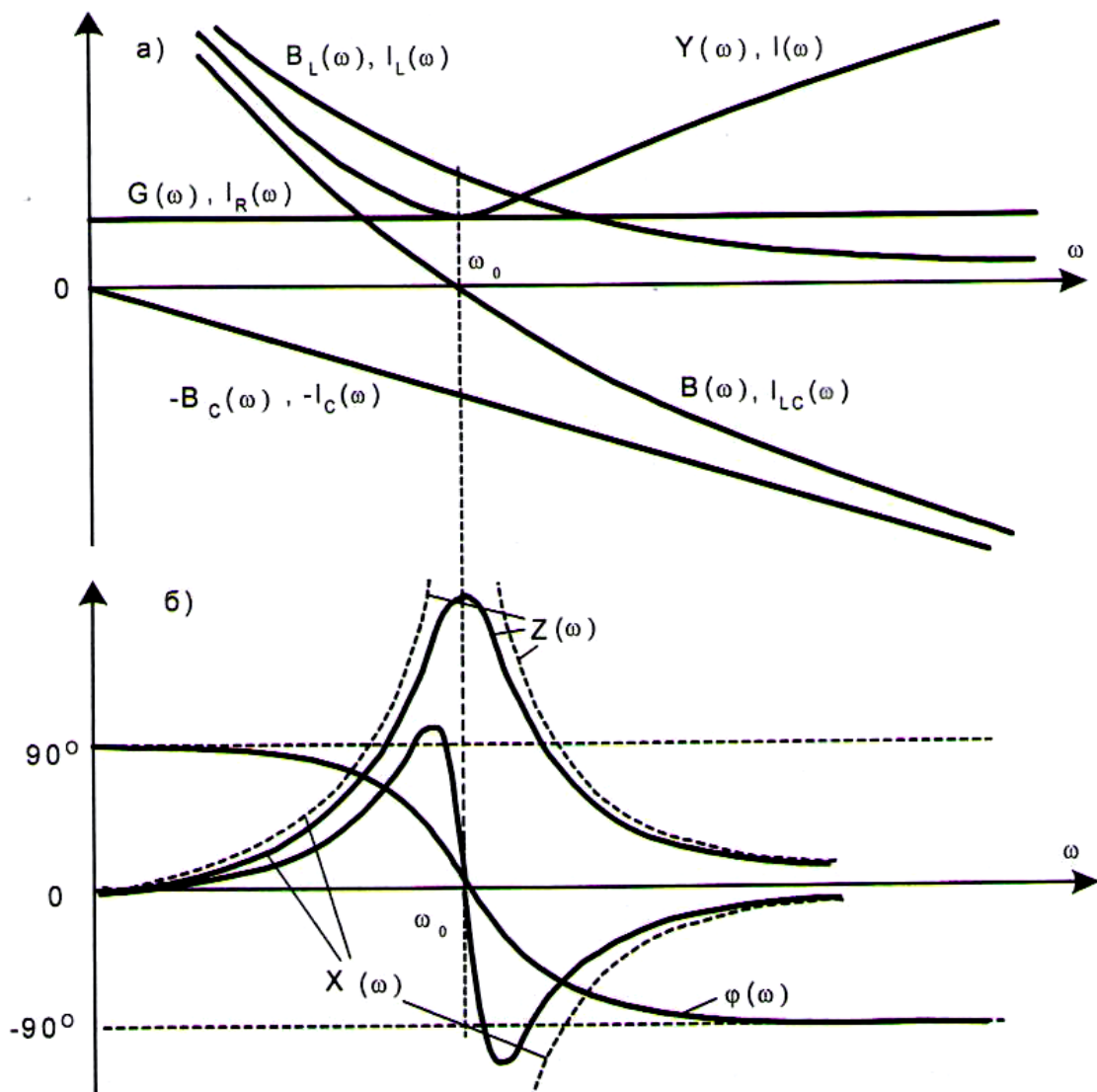


Рис.7.2.

При изменении частоты приложенного к цепи напряжения и неизменной его амплитуде токи изменяются пропорционально соответствующим проводи-

МОСТЯМ:

$$I(\omega) = U \cdot Y(\omega), \quad I_L(\omega) = U/(\omega L), \quad I_C(\omega) = U \cdot \omega C, \\ I_{LC}(\omega) = U \cdot B(\omega).$$

Угол фазового сдвига между током в неразветвлённой части цепи и приложенным напряжением изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = \arctg[(1/(\omega L) - \omega C)/G].$$

Графики изменения токов, проводимостей, сопротивлений контура и угла фазового сдвига представлены на рис.7.2.

Реальные кривые будут несколько отличаться от изображенных на рисунке, т.к. катушка индуктивности обладает сопротивлением, которое в приведенных выше зависимостях не учитывалось.

При $\omega < \omega_0$ цепь носит индуктивный характер (ток по фазе отстает от напряжения), при $\omega = \omega_0$ - активный, при $\omega > \omega_0$ - емкостный (ток по фазе опережает напряжение).

Если добротность $Q > 1$, то при резонансе токи в индуктивной и емкостной ветвях превышают потребляемый от источника ток в Q раз.

На рис.7.2,б представлены также зависимости полного Z и реактивного X сопротивлений цепи от частоты. В общем случае

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega) = 1/\sqrt{G^2 + B^2}, \quad X(\omega) = B/(G^2 + B^2).$$

Пунктирные кривые на рисунке соответствуют идеализированному случаю, когда активная проводимость контура равна нулю. В этом случае при резонансной частоте кривые $Z(\omega)$ и $X(\omega)$ имеют разрыв.

7.2 Порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики параллельного резонансного контура:

$$I(\omega), I_L(\omega), I_C(\omega), B(\omega), X(\omega), Z(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

1. Соберите схему, изображенную на рис.7.3. В качестве катушки

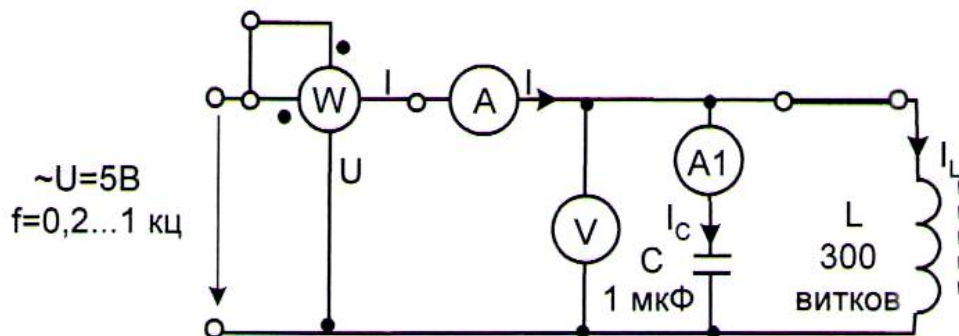


Рис.7.3.

индуктивности с малым активным сопротивлением используйте обмотку трансформатора с числом витков $w=300$. В зазоры разъемного сердечника вставьте полоски бумаги в один слой. Используйте конденсатор емкостью 1мкФ . В цепи предусмотрите перемычки для измерения токов мультиметров. Установите следующие пределы измерения: для вольтметра – 20В , для амперметра – 200мА . Питание на схему подайте от генератора переменного синусоидального напряжения.

2. Омметром измерьте сопротивление катушки R .

3. Подайте напряжение питания на приборы и на генератор. Установите напряжение 5В и, изменяя частоту, добейтесь резонанса токов, ориентируясь по току в неразветвленной части цепи. Запишите значения резонансной частоты, мощности и токов.

4. По показаниям приборов рассчитайте:

- сопротивления и проводимости катушки

$$Z_K = U/I_K, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad G_K = \frac{R_K}{Z_K^2}, \quad B_K = \gamma = \frac{X_K}{Z_K^2},$$

- индуктивность катушки

$$L = 1/(2\pi f_0 B_K);$$

- резонансную частоту

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC});$$

- полное сопротивление и активную проводимость контура

$$Z = U/I, \quad G = R/Z^2;$$

- добротность контура

$$Q = \gamma/G.$$

5. Сравните расчётную резонансную частоту с фактической, а также добротность контура с отношением токов I_C/I .

6. Изменяя частоту от $0,2$ до 1кГц , при постоянном напряжении 5В запишите в таблицу 7.1. значения мощности P и токов I , I_k и I_c .

Таблица 7.1.2.

$(\omega),$ $f,$ Гц	$P,$ мВт	$I,$ мА	$I_k,$ мА	$I_c,$ мА	$Y(\omega),$ См	$B_L(\omega),$ См	$B_C(\omega),$ См	$B(\omega),$ См	$Z(\omega),$ Ом	φ $(\omega),$ град	X $(\omega),$ Ом
200											
300											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f_0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1000											

7. По результатам измерений вычислите, пренебрегая активным сопротивлением катушки (которое значительно меньше индуктивного):

$$Y(\omega)=I/U, B_L(\omega)=I_K/U, B_C(\omega)=I_C/U, B(\omega)=B_L(\omega)-B_C(\omega), \\ Z(\omega)=1/Y(\omega), \varphi(\omega)=\arccos [P/(UI)], X(\omega)=Z \cdot \sin \varphi.$$

8. Постройте графики частотных характеристик, аналогичные изображенным на рис. 7.2.

7.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Принципиальная схема параллельного резонансного контура.
3. Вычисления величин при резонансной частоте.
4. Таблица опытных и вычисленных значений величин.
5. Графики частотных характеристик.
6. Векторные диаграммы напряжения и токов при $\omega < \omega_0$, $\omega = \omega_0$, $\omega > \omega_0$.

7.4 Контрольные вопросы

1. Как от частоты зависят проводимости катушки индуктивности и конденсатора?
2. Каково условие возникновения резонанса токов в параллельном резонансном контуре?
3. Поясните физическую сущность резонанса токов.
4. Как вычислить резонансную частоту, если известны параметры элементов резонансного контура?
5. Как вычислить добротность параллельного резонансного контура?
6. Как изменяется в параллельном резонансном контуре угол фазового сдвига между током в неразветвлённой части цепи и напряжением при изменении частоты?
7. От чего и как зависит соотношение токов в реактивных элементах и в неразветвлённой части цепи при резонансе токов?
8. Как с учётом активного сопротивления вычислить индуктивную проводимость и индуктивность катушки, если известны ток, протекающий по катушке, а также величина и частота приложенного напряжения?

Лабораторная работа №8

Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении

8.1 Основные теоретические положения

В данной лабораторной работе рассматривается электрическая цепь, пред-

ставленная на рис.8.1 и состоящая из последовательно включенных индуктивного, емкостного и активного сопротивлений. На зажимы цепи подаётся напряжение прямоугольной формы, имеющее амплитуду U_m и частоту $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T$.

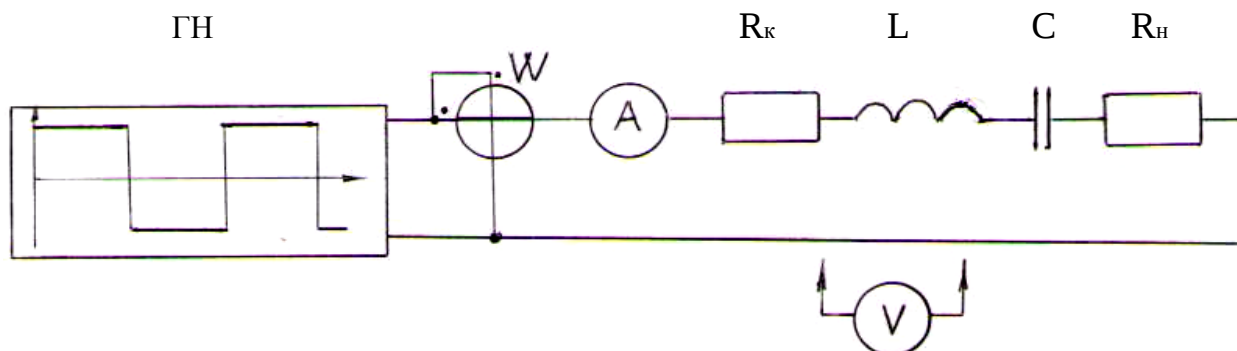


Рис.8.1.

Представленная на рисунке функция напряжения разлагается в ряд Фурье

$$f(\omega t) = 4U_M/\pi \cdot (\sin \omega t + 1/3 \cdot \sin 3 \omega t + 1/5 \cdot \sin 5 \omega t + \dots) \quad (8.1)$$

Действующие значения гармоник:

$$U_1 = 4U_M/(\sqrt{2} \cdot \pi); U_3 = U_1/3; U_5 = U_1/5; \text{ и т.д.} \quad (8.2)$$

При сравнительно небольших значениях частоты ω когда эффект вытеснения тока незначителен, активное сопротивление цепи можно считать постоянным, в то время как индуктивное сопротивление повышается, а емкостное – снижается пропорционально кратности частот k

$$X_{Lk} = k \omega L; X_{Ck} = 1/(k \omega C) \quad (8.3)$$

Если в рассматриваемой электрической цепи при основной частоте $X_{L1} = X_{C1}$, то ток основной гармоники будет определяться только амплитудой напряжения этой гармоники и активным сопротивлением цепи:

$$I_1 = U_1/R \quad (8.4)$$

Для остальных гармоник действующие значения токов определяются соответствующими напряжениями и полными сопротивлениями:

$$I_3 = U_3/z_3 = U_3/\sqrt{\{R^2 + [3 \omega L - 1/(3 \omega C)]^2\}},$$

$$I_5 = U_5/z_5 = U_5/\sqrt{\{R^2 + [5 \omega L - 1/(5 \omega C)]^2\}}, \quad (8.5)$$

Чем выше гармоника, тем меньше ток и тем больше угол фазового сдвига φ_k между напряжением и током данной гармоники. Углы фазового сдвига могут быть вычислены в соответствии с выражениями:

$$\varphi_3 = \arccos(R/z_3), \quad \varphi_5 = \arccos(R/z_5), \quad (8.6)$$

Активная мощность при резонансной частоте $\omega = 1/\sqrt{LC}$:

$$P = P_1 + P_3 + P_5 + \dots = U_1 I_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 + \dots \quad (8.7)$$

Действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots)} \quad (8.8)$$

Следует отметить, что если в цепи имеет место резонанс напряжений для первой гармоники, то токи остальных гармоник будут незначительными, потому что напряжение на активном сопротивлении будет близким к синусоидальному,

а сумма напряжений остальных гармоник будет приложена к LC-фильтру.

8.2 Порядок выполнения работы

1.Собрать схему, изображенную на рис.8.1. В схеме использовать в качестве катушки индуктивности обмотку трансформатора с числом витков $w=300$, конденсатор ёмкостью $0,47\text{мкФ}$ и сопротивление 100 Ом . Цепь подключить к генератору переменного напряжения. Установить предел измерения тока на мультиметре 200 мА .

2.Вторым мультиметром измерить активное сопротивление катушки индуктивности R_k и сопротивление нагрузки R_n , затем переключить мультиметр для измерения напряжения, установив предел измерения 20 В .

3.Включить генератор синусоидального напряжения, установить частоту 500Гц и напряжение 5 В . Измерить ток в цепи и напряжение на катушке. Вычислить индуктивность катушки, пользуясь выражениями:

$$Z_K = U/I_K, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad L = X_K/(2\pi f) \quad (8.9)$$

4.Вычислить резонансную частоту основной (первой) гармоники

$$\omega_1 = 1/\sqrt{LC}, \quad f_1 = \omega_1/(2\pi).$$

5.Частоту f_1 установить на генераторе, переключив его на сигнал прямоугольной формы. Медленно вращая рукоятку изменения частоты, добиться максимального тока в цепи, сравнить полученную резонансную частоту f_1' с расчётной.

6.Для напряжения на выходе генератора $U_m = 5\text{ В}$ вычислить амплитудные и действующие значения напряжений 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.1 и 8.2.

7.Для экспериментально найденной частоты f_1' вычислить действующие значения токов 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.5.

8.По формулам 8.6 вычислить углы фазовых сдвигов гармоник, а затем – активную мощность.

9.Вычислить по 8.8 действующее значение несинусоидального тока.

10.Вычисленные значения тока и мощности сравнить с показаниями амперметра и ваттметра при установленном на выходе генератора напряжении 5 В .

11.Измерить напряжение на активном сопротивлении нагрузки и сравнить его с вычисленным по 8.4 действующим напряжением первой гармоники.

12.Подключая осциллограф поочерёдно к выходу генератора, к активному сопротивлению и к последовательно включенным конденсатору и катушке индуктивности, зарисовать на кальке, приложенной к экрану, кривые напряжений. Убедиться, что кривая напряжения на выходе генератора имеет прямоугольную форму, на активном сопротивлении – близка по форме к синусоиде, а на LC-фильтре кривая представляет сумму всех высших гармонических составляющих.

13.Результаты вычислений и измерений занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

f_1	$f_{1'}$	R_k	R_n	X_3	X_5	X_7	Z_3	Z_5	Z_7
Гц	Гц	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

U_1	U_3	U_5	U_7	I_1	I_3	I_5	I_7	$I_{расч.}$	$I_{эксп.}$	φ_3	φ_5	φ_7	$P_{расч.}$	$P_{эксп.}$
В	В	В	В	мА	мА	мА	мА	мА	мА	град	град	град	мВт	мВт

14. Сравнить по осциллографу амплитудные значения напряжений на выходе генератора и на активном сопротивлении нагрузки, найдите их отношение и сравните с числом $4/\pi = 1.273$.

8.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения: разложение в ряд Фурье прямоугольной функции, индуктивные, емкостные и полные сопротивления для отдельных гармоник, углы фазовых сдвигов, действующее значение несинусоидального тока, активная мощность при несинусоидальном токе.

2. Принципиальная схема электрической цепи.

3. Результаты измерений и вычислений сопротивлений, индуктивности и резонансной частоты.

4. Вычисление амплитудных и действующих значений отдельных гармоник на выходе генератора, а также действующих значений токов отдельных гармоник в цепи, углов фазовых сдвигов, активной мощности и действующего значения несинусоидального тока.

5. Таблица 8.1.

6. Осциллограммы напряжений на выходе генератора, на фильтре и на сопротивлении нагрузки.

8.4 Контрольные вопросы

1. Какие гармоники содержит сигнал, симметричный относительно оси абсцисс?

2. Как вычислить сопротивление активно-реактивной цепи для отдельных гармоник тока?

3. Как вычислить углы фазового сдвига между током и напряжением для отдельных гармоник?

4. Как вычислить действующее значение периодического несинусоидального тока?

5. Как вычислить активную мощность в цепи периодического несинусоидального тока?

6. Как можно выделить одну из гармоник периодического несинусоидального тока или напряжения?

Лабораторная работа №9

Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений

Цель работы: изучение студентами вольтамперных характеристик диодов и биполярных транзисторов.

9.1 Основные теоретические положения

Полупроводниковый диод состоит из двух слоёв полупроводника, один из которых обладает дырочной проводимостью (р – слой), второй – электронной проводимостью (п – слой). Вследствие диффузии электронов и дырок на р-п-переходе образуется потенциальный барьер, который обуславливает нелинейные свойства диода. Вольтамперная характеристика диода представлена на рис. 9.1.

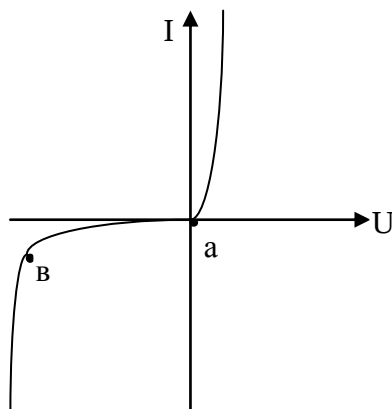


Рис. 9.1.

Если диод включить в электрическую цепь так, чтобы напряжение от источника э.д.с. было направлено от слоя р к слою п, то потенциальный барьер ликвидируется и по цепи потечёт ток. При этом сопротивление диода с увеличением напряжения уменьшается, так что падение напряжения на диоде не превышает долей вольта, а величина тока в цепи определяется в основном сопротивлением остальной части цепи и величиной э.д.с. источника (в.а.х. правее точки «а»). Если же напряжение от источника э.д.с. направлено от слоя п к слою р, то под действием приложенного напряжения потенциальный барьер р-п-перехода увеличивается и ток, который в напряжения потенциальный барьер р-п – перехода увеличивается и величина тока, который в этом случае обусловлен наличием неосновных подвижных носителей зарядов, будет ничтожно малым (участок в.а.х. между точками «а» и «в»). При достаточной величине обратного напряжения происходит пробой диода (участок в.а.х. левее точки «в»). Различают три вида пробоя: лавинный, туннельный и тепловой. Лавинный пробой происходит в результате того, что при довольно высокой напряженности

электрического поля, создаваемой источником э.д.с., неосновные носители зарядов (тепловые свободные электроны) разгоняются, получая энергию, достаточную для ионизации атомов кристалла кремния. Образующиеся в результате ионизации заряды, в свою очередь, тоже разгоняются и ионизируют другие атомы. Процесс ионизации нарастает лавинообразно, в результате чего сопротивление р-п –перехода резко падает и величина тока через диод определяется сопротивлением остальной части цепи.

Туннельный пробой происходит у диодов с достаточно высокой концентрацией примесей, когда толщина обеднённой зоны р-п- перехода (лишенной основных носителей зарядов – электронов и дырок) мала. В этом случае под действием высокой напряженности внешнего электрического поля, создаваемого источником э.д.с., электроны преодолевают потенциальный барьер.

Если при пробое диода величина тока настолько велика, что количество выделяемого на диоде тепла превышает количество отводимого, то температура диода повышается, происходит тепловая ионизация, в результате которой разрушается структура полупроводника, лавинный или туннельный пробой переходит в тепловой, диод выходит из строя. Если же теплового пробоя не происходит, то все свойства диода сохраняются.

Диоды, используемые в схемах выпрямителей, преобразующих переменный ток в постоянный, работают на участке вольтамперной характеристики правее точки «в». Т.е. в этих схемах напряжение не должно превышать напряжения пробоя. На участке характеристики левее точки «в» работают диоды в схемах стабилизаторов напряжения. Эти диоды имеют специальную конструкцию, предотвращающую тепловую ионизацию при достаточно больших токах в режиме пробоя. Такие диоды называют стабилитронами.

Наиболее широко используемыми управляемыми нелинейными сопротивлениями являются транзисторы, которые подразделяются на биполярные, управляемые током, и полевые, управляемые электрическим полем. В настоящей лабораторной работе рассматриваются характеристики биполярного транзистора.

Биполярные транзисторы имеют трёхслойную структуру с двумя р-п – переходами. Существуют транзисторы п-р-п типа и р-п-р типа. Схема конструкции п-р-п – транзистора представлена на рис.9.2. На этом же рисунке имеется условное графическое изображение данного транзистора.

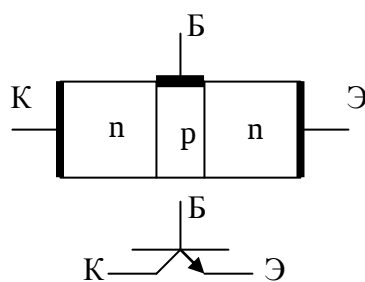


Рис. 9.2

Два крайних слоя транзистора состоят из полупроводника, обладающего

электронной проводимостью, средний слой – дырочной проводимостью. Каждый из трёх слоёв контактирует с металлическими электродами, которые служат для подключения транзистора к электрическим цепям. Средний слой называют базой, крайние – коллектор и эмиттер. Если между коллектором и эмиттером подать напряжение, как это показано на рис 9.3, то эмиттерный переход будет включён в проводящем направлении, а коллекторный – в непроводящем.

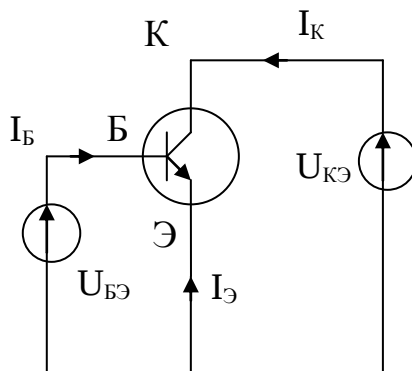


Рис. 9.3

При отсутствии тока базы i_b транзистор между коллектором и эмиттером будет иметь достаточно большое сопротивление, ток в цепи коллектора i_k будет незначительным (это так называемый обратный ток коллектора, определяемый неосновными носителями зарядов). Если же в цепи базы создать ток, подключив источник напряжения между эмиттером и базой, то сопротивление коллекторного перехода уменьшится, в результате чего появится ток коллектора i_k . С увеличением тока базы сопротивление транзистора уменьшается.

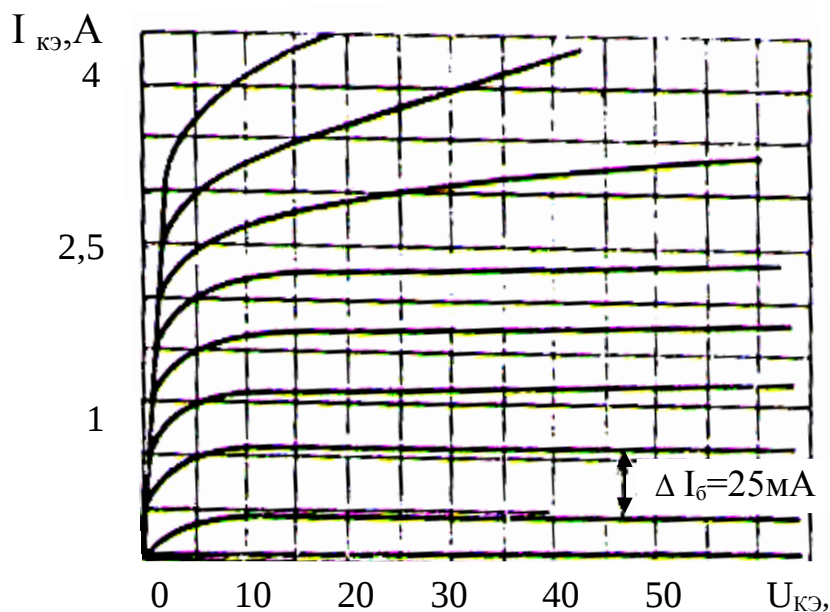


Рис 9.4.

Вольтамперные характеристики транзистора, представляющие собой зави-

симость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при различных значениях тока базы, изображены на рис. 9.4.

Эти характеристики называют выходными, в отличие от входных, представляющих зависимость тока базы от напряжения эмиттер-база.

9.2 Порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе студенты снимают вольтамперную характеристику стабилитрона и выходные характеристики биполярного транзистора.

1.Собрать схему, представленную на рис.9.5. В качестве источника напряжения использовать регулируемый источник 0...15 В. Установить пределы измерения тока 20 мА, напряжения – 20В .

2.Постепенно увеличивая напряжение, зафиксировать такое его значение, при котором появится в цепи ток. В дальнейшем, повышая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать соответствующие каждому току значения напряжения. Результаты замеров записать в таблицу.

3.Снизить напряжение до нуля и затем поменять его полярность.

4.Постепенно увеличивая напряжение, зафиксировать его значение, при котором в цепи появится ток (оно будет значительно ниже полученного в предыдущем случае). Увеличивая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать в таблицу соответствующие каждому току напряжения.

5.Построить график вольтамперной характеристики на миллиметровой бумаге в масштабе.

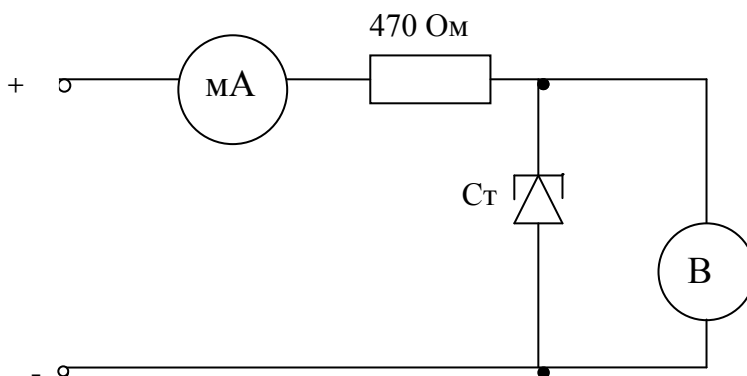


Рис. 9.5.

6.Для снятия выходных характеристик транзистора собрать схему, изображенную на рис. 9.6. На потенциометр 1кОм напряжение подать от нерегулируемого источника питания 15В, в цепь коллектора – от регулируемого источника 0...15В. Пределы измерения приборов установить с учётом того, что ток в цепи базы не будет превышать 100 мкА, в цепи коллектора – 10 мА, напряжение – 5 В.

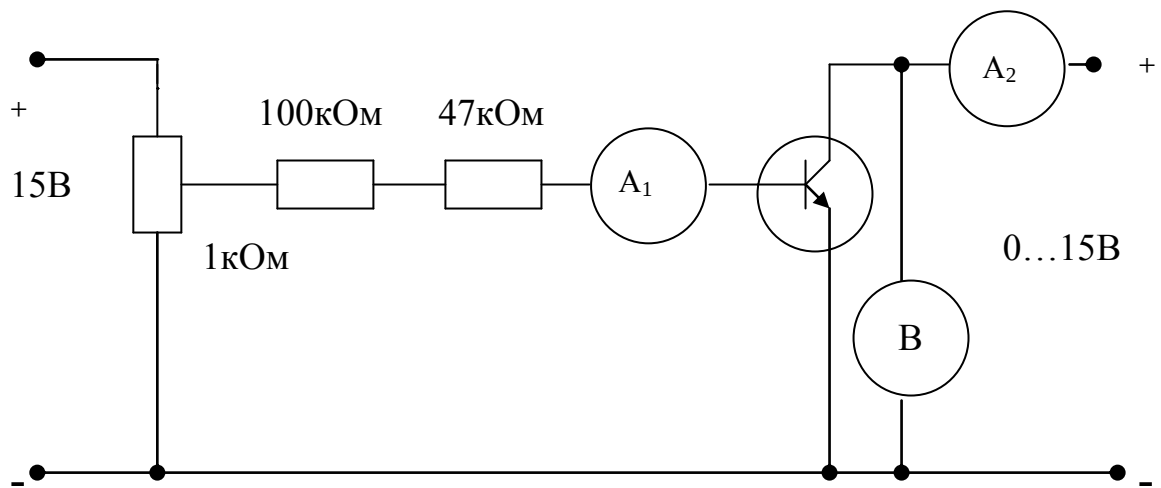


Рис. 9.6.

7. Установить ток базы 20 мкА. Постепенно повышая напряжение в цепи коллектор-эмиттер, найти его значение, после которого ток коллектора изменится незначительно. До этого значения снять 3 – 4 точки характеристики, после этого значения – 2 – 3 точки.

8. Прodelать опыты, аналогичные п.7, при токах базы 40, 60, 80 мкА. Значения напряжений и токов занести в таблицы.

9. Построить в масштабе на миллиметровой бумаге выходные вольтамперные характеристики транзистора.

9.3 Содержание отчёта

1. Описание конструкции и физических процессов, характеризующих свойства диодов и биполярных транзисторов.

2. Электрические схемы, собираемые для получения вольтамперных характеристик диода и транзистора.

3. Таблицы опытных данных.

4. Графики вольтамперных характеристик.

9.4 Контрольные вопросы

1. Опишите конструкцию диода и биполярного транзистора.

2. В результате чего образуется потенциальный барьер р-п – перехода?

3. Почему диод обладает односторонней проводимостью?

4. Чем определяется величина обратного тока диода?

5. Какие различают виды пробоя диода? Опишите физические процессы при различных видах пробоя.

6. Зависимость между какими величинами отражают входные и выходные характеристики биполярных транзисторов?

7. Опишите схемы и способы экспериментального определения вольтамперных характеристик диодов и транзисторов.

Лабораторная работа №10

Феррорезонанс в последовательной цепи

Цель работы: изучение студентами вольтамперных характеристик и триггерного эффекта в последовательной феррорезонансной цепи.

10.1 Основные теоретические положения

Последовательная феррорезонансная цепь состоит из катушки со стальным сердечником и конденсатора (рис. 10.1.).

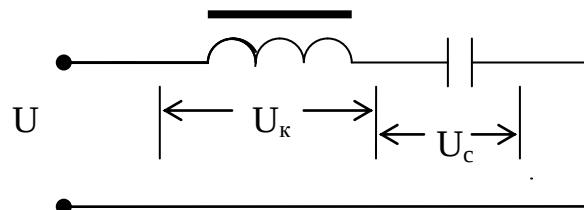


Рис.10.1

К зажимам цепи подведено синусоидально изменяющееся напряжение определенной частоты.

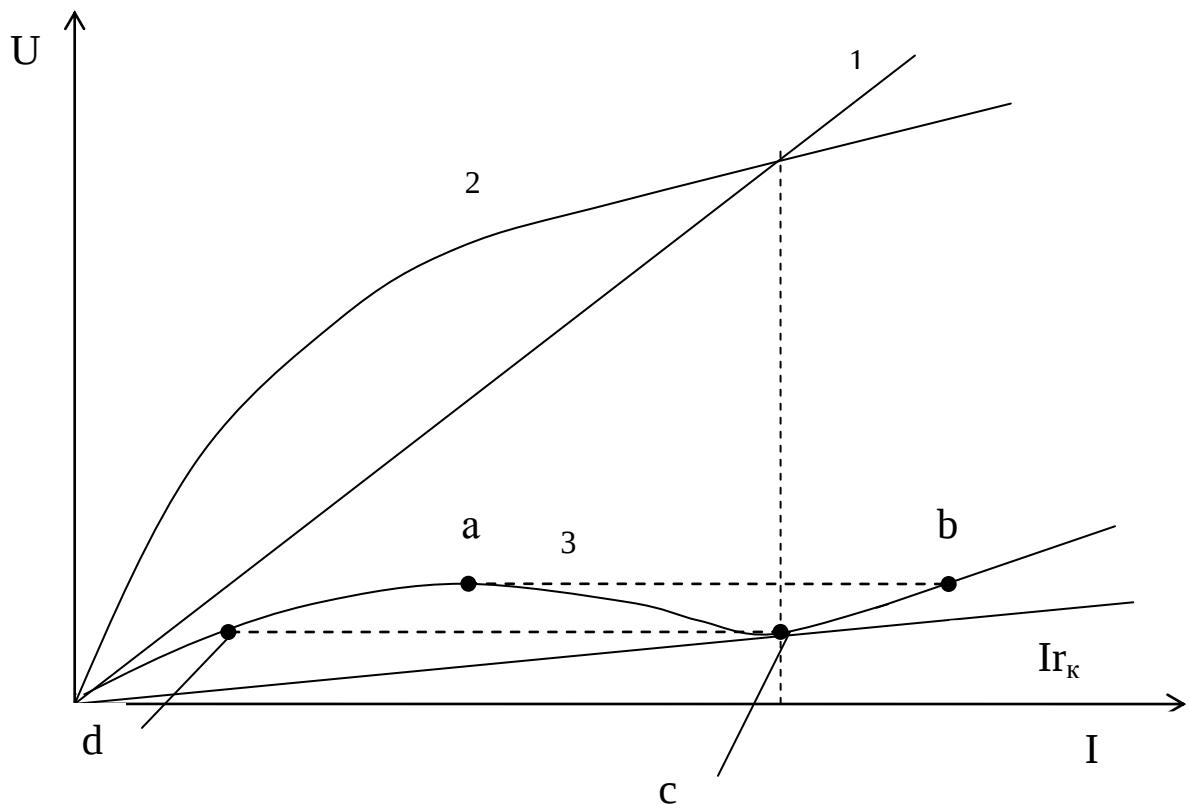


Рис. 10.2.

При увеличении напряжения на конденсаторе U_c ток увеличивается пропорционально напряжению, т.к. сопротивление конденсатора $x_c = 1/(\omega C)$ остаётся постоянным. Вольтамперная характеристика конденсатора линейна (кривая 1 на рис.10.2).

Вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником носит ярко выраженный нелинейный характер (кривая 2 на рис. 10.2). Нелинейность характеристики обусловлена нелинейной зависимостью магнитной индукции в стальном сердечнике от напряжённости магнитного поля.

Если учесть активное сопротивление катушки и потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи, то схема замещения катушки выглядит так, как представлено на рис. 10.3, а. Сопротивление r_1 равно активному сопротивлению обмотки катушки, сопротивление r_2 учитывает потери мощности в магнитопроводе.

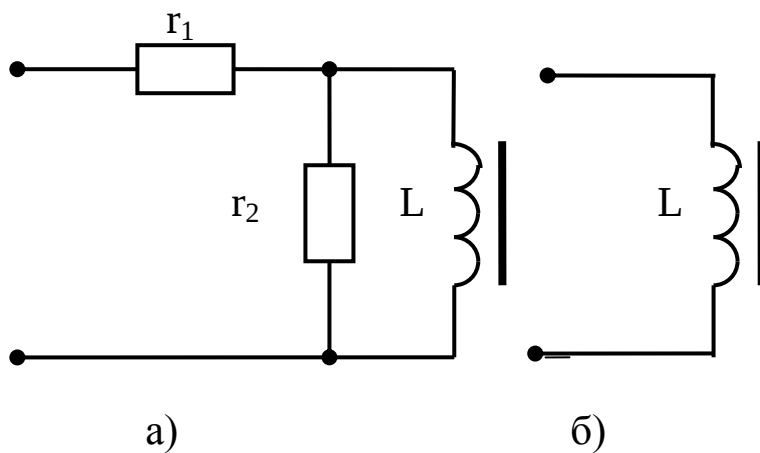


Рис.10.3.

Ввиду того, что катушки мотают обычно медным проводом, их сопротивление r_1 существенно меньше индуктивного. Кроме того, потери в магнитопроводе также не оказывают при низких частотах существенного влияния на режим работы электрической цепи, т.к. сопротивление r_2 оказывается намного больше индуктивного сопротивления катушки. Таким образом, с достаточной для практических целей точностью индуктивное сопротивление катушки можно считать равным её полному сопротивлению. С учётом данного допущения схема замещения катушки со стальным сердечником изображена на рис. 10.3, б.

При последовательном включении катушки и конденсатора по ним протекает один и тот же ток. Ввиду того, что напряжение на катушке опережает ток на угол $\pi/2$ а на конденсаторе отстаёт от тока на такой же угол, напряжение на зажимах рассматриваемой цепи будет равно разности напряжений на катушке и конденсаторе (кривая 3 на рис. 10.2). Если напряжение на зажимах цепи увеличивать, начиная с нуля, то ток будет постепенно расти до значения, соответствующего точке «а», затем он скачком увеличится до значения, соответствующего точке «б», при этом резко возрастёт мощность, потребляемая цепью,

а угол фазового сдвига между током и напряжением изменит свой знак: в точке «а» ток отстаёт от напряжения, в точке «b» - опережает напряжение. При дальнейшем увеличении напряжения ток плавно растёт по кривой 3.

При снижении напряжения ток уменьшается до значения, соответствующего точке «с», затем уменьшается скачком (точка «d») и в дальнейшем плавно уменьшается до нуля. Скачкообразное изменение тока при незначительном изменении напряжения называют триггерным эффектом.

Точка «с» на кривой 3 соответствует режиму резонанса напряжений. В этой точке напряжение на индуктивности по величине равно напряжению на ёмкости и находится с ним в противофазе. Напряжение на зажимах цепи в этой точке равно падению напряжения на активном сопротивлении цепи. Режим резонанса возникает вследствие нелинейности вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником, поэтому его называют феррорезонансом. Следует напомнить, что в линейных цепях резонанс возникает только при определённой частоте и не зависит от амплитуды тока или напряжения.

Явление феррорезонанса используется в некоторых электротехнических устройствах, например, в стабилизаторах напряжения. Триггерный эффект используется в некоторых устройствах автоматики.

10.2 Порядок выполнения работы

1.Собрать схему, изображенную на рис.10.4. Установить следующие пределы измерения: амперметра – 200мА, вольтметра – 20В

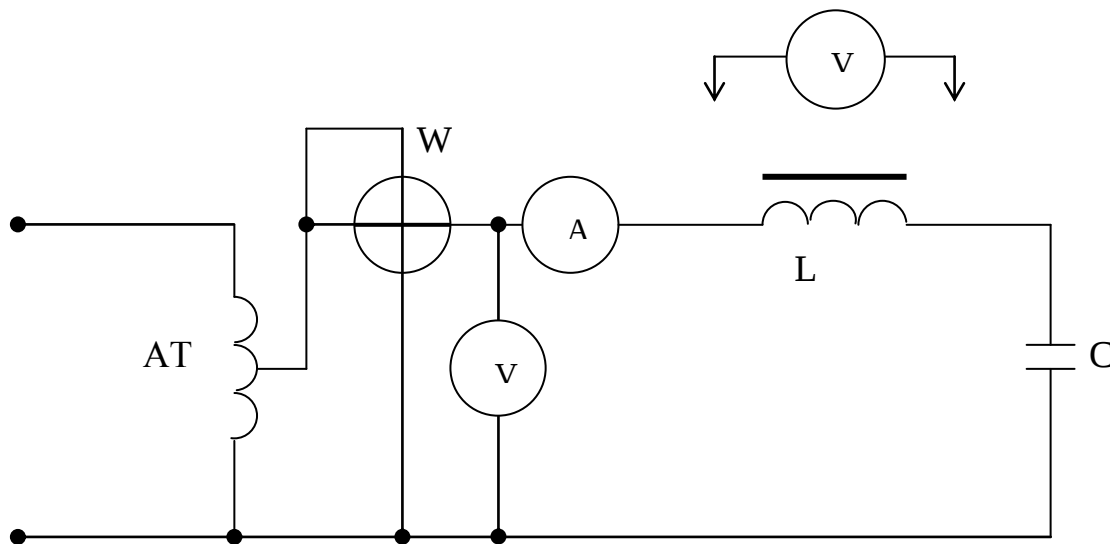


Рис.10.4.

2.Перед подачей напряжения установить рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение. Подать на схему напряжение питания и, очень плавно увеличивая напряжение поворотом рукоятки трансформатора, найти такое его значение, при котором ток в цепи изменится скачкообразно. Это напря-

жение U_a соответствует точке «а» на рис.10.3.

3. Уменьшить напряжение до нуля и, увеличивая его снова до значения U_a , зафиксировать при 3 – 4 его значениях ток в цепи, потребляемую мощность и напряжения на катушке U_K и на конденсаторе U_C , которые поочерёдно замерять вольтметром V_2 .

4. После прохождения режима резонанса, увеличив напряжение на 1 – 1,5В, снять значения 2 – 3 точек вольтамперной характеристики, затем снизить напряжение до значения U_a , при котором произошёл скачок тока.

5. Продолжая снижать напряжение интервалами по 0,1В и записывая соответствующие значения тока, мощности и напряжений на катушке и конденсаторе, найти такое его значение, при котором ток уменьшится скачкообразно.

6. Уменьшая ток до нуля, снять последние 2 – 3 точки вольтамперных характеристик.

Результаты замеров записать в таблицу.

Таблица 10.1.

	При увеличении напряжения							При уменьшении напряжения					
$U, В$													
$I, мА$													
$U_K, В$													
$U_C, В$													
$P, мВт$													
φ													

Значения угла фазового сдвига $\varphi = \arctg P / (UI)$ вычислить, учитывая, что $\varphi > 0$, если $U_K > U_C$, и $\varphi < 0$, если $U_K < U_C$.

На миллиметровой бумаге построить графики зависимостей

$$U = f(I), U_K = f(I), U_C = f(I), \varphi = f(I).$$

10.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Электрическая схема последовательной резонансной цепи.
3. Таблица опытных данных.
4. График зависимостей $U = f(I)$, $U_K = f(I)$, $U_C = f(I)$, $\varphi = f(I)$.

10.4 Контрольные вопросы

1. По какой причине изменяется индуктивность катушки со стальным сердечником при изменении тока?
2. Вследствие чего возникает феррорезонанс напряжений?
3. Что такое триггерный эффект в последовательной феррорезонансной цепи?

4.Как изменяется угол фазового сдвига между током и напряжением в последовательной феррорезонансной цепи при триггерном эффекте?

5.Как влияет ёмкость конденсатора на величину тока и напряжения, при которых возникает феррорезонанс?

6.Как влияют сечение магнитопровода и число витков катушки на ток, при котором возникает феррорезонанс?

7.Как влияет форма кривой намагничивания материала сердечника на положение точки феррорезонанса на вольтамперной характеристике последовательной феррорезонансной цепи?

Лабораторная работа №11

Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью

Цель работы: закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.

11.1 Основные теоретические положения

Электрическая цепь с одним конденсатором и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации.

Начальное значение напряжения на конденсаторе определяется в соответствии с законом коммутации $u_c(0_-)=u_c(0_+)$. В свою очередь, $u_c(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$. В электрической цепи с одним конденсатором в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$. В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе.

Длительность каждого включения и отключения составляет 0,01с.

11.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой (рис.11.1) и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи. Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой (в ветви с сопротивлением R_2) цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу 11.1.

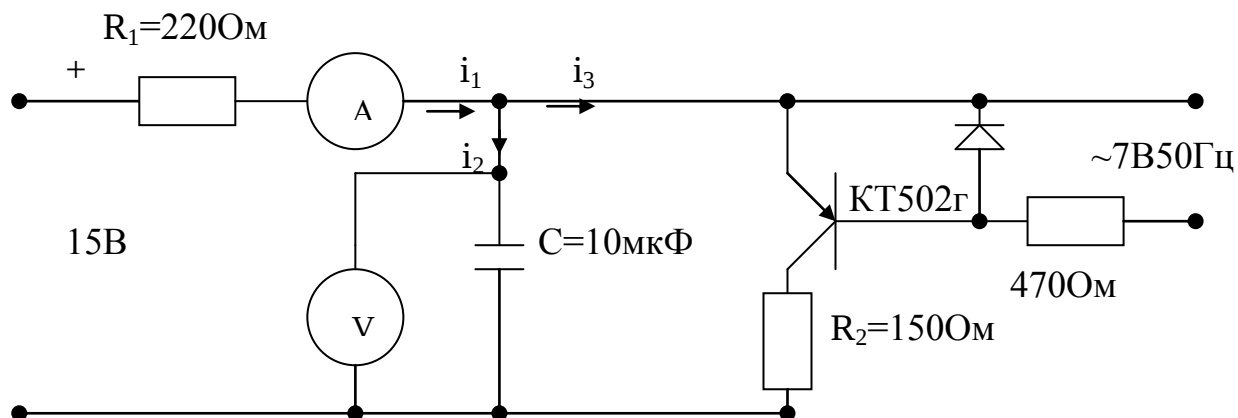


Рис.11.1.

Таблица 11.1. Ключ замыкается.

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Таблица 11.1. Ключ размыкается.

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

2.Собрать схему (рис.11.1), обратив внимание на полярность электролитического конденсатора. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t = \infty$ при размыкании ключа; значения напряжения u_c и токов занести в таблицу.

3.Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t=\infty$ при замыкании ключа; значения величин измерить и занести в таблицу.

4.Рассчитать свободные составляющие токов и напряжения на конденсаторе при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t= \infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

5.Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

6.Установить в цепи транзистор и подать напряжение $\sim 7В$ в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_c(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_3(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени и напряжения:

$$1\text{мс}=1\text{см}, \quad 1\text{В}=1\text{см}.$$

Учесть, что при частоте напряжения, поданного в цепь базы транзистора, $f=50\text{Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 20мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа.

7.Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

11.3 Содержание отчёта

- 1.Основные теоретические положения.
- 2.Принципиальная электрическая схема исследуемой цепи.
- 3.Таблица 11.1 расчётных и экспериментальных значений величин.
- 4.Функции изменения во времени напряжений и токов.
- 5.Экспериментальные и теоретические кривые переходных процессов.

11.4 Контрольные вопросы

- 1.Почему на конденсаторе напряжение не может изменяться скачком?
- 2.Что понимают под коммутацией?
- 3.Чем определяется степень характеристического уравнения?

4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с конденсатором при увеличении его ёмкости?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей ёмкость, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?

Лабораторная работа №12

Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью

Цель работы: закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих индуктивность, практическая проверка результатов расчёта.

12.1 Основные теоретические положения

Электрическая цепь с одной индуктивностью и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации. Начальное значение тока в индуктивности определяется в соответствии с законом коммутации $i_L(0_-)=i_L(0_+)$. В свою очередь, $i_L(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$.

В электрической цепи с одной индуктивностью в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$.

В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от импульсного генератора однополярного прямоугольного напряжения с частотой 200 Гц. Таким образом, процесс замы-

кания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 2,5мс.

12.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой (рис.12.1) и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи.

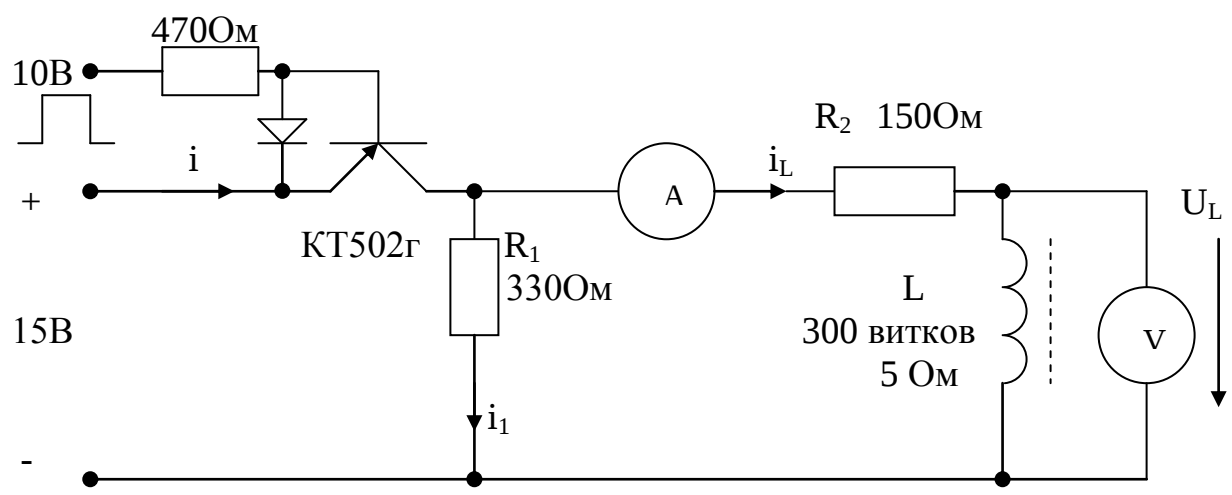


Рис.12.1.

Таблица 12.1. Замыкание цепи

t	i, мА	i ₁ , мА	i _L , мА	U _{R1} , В	U _{R2} , В	U _L , В	τ, мс
0 ₋ , расчёт							
0 ₊ , эксперимент							
0 ₊ , расчёт							
∞, расчёт							
∞, эксперимент							
Свободные составляющие							

Таблица 12.1. Размыкание цепи

t	i, мА	i ₁ , мА	i _L , мА	U _{R1} , В	U _{R2} , В	U _L , В	τ, мс
0 ₋ , расчёт							
0 ₊ , эксперимент							
0 ₊ , расчёт							
∞, расчёт							
∞, эксперимент							
Свободные составляющие							

Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу 12.1.

2.Собрать схему (рис.12.1). Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t=\infty$ при размыкании ключа; значения напряжений и токов занести в таблицу.

3.Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t=\infty$ при замыкании ключа; значения величин измерить и занести в таблицу.

4.Рассчитать свободные составляющие токов и напряжений при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t=\infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

5.Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

6.Установить в цепи транзистор и подать напряжение генератора импульсов в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_L(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_L(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени, напряжения и тока:

$$1\text{мс}=5\text{см}, 1\text{В}=0,2\text{см}, 1\text{мА}=0,1\text{см}.$$

Учесть, что при частоте сигнала, поданного в цепь базы транзистора, $f=200\text{Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 5мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа и сопротивления соответствующих ветвей.

7.Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

11.3 Содержание отчёта

- 1.Основные теоретические положения.
- 2.Принципиальная электрическая схема исследуемой цепи.
- 3.Таблица 12.1 расчётных и экспериментальных значений величин.
- 4.Функции изменения во времени напряжений и токов.
- 5.Экспериментальные и теоретические кривые переходных процессов.

11.4 Контрольные вопросы

- 1.Почему ток в индуктивности не может изменяться скачком?
- 2.Что понимают под коммутацией?
- 3.Чем определяется степень характеристического уравнения?

4.Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?

5.Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?

6.Что такое постоянная времени переходного процесса?

7.Как изменится постоянная времени цепи с катушкой при увеличении её индуктивности?

8.Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей индуктивность, на длительность переходного процесса?

9.Как рассчитывают зависимые начальные условия?

Лабораторная работа №13

Переходные процессы в R-L-C контуре

Цель работы: исследовать переходные процессы в электрической цепи, состоящей из последовательно включённых активного сопротивления, индуктивности и ёмкости, определить зависимость характера переходного процесса от соотношения величины параметров элементов схемы.

13.1 Основные теоретические положения

Состояние исследуемой электрической цепи (рис. 13.1) при отключении от источника питания и закорачивании определяется из дифференциального уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u = 0 \quad (1)$$

Поскольку $i = C du_c / dt$, то

$$RC \frac{du_c}{dt} + LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c = 0$$

или

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = 0. \quad (2)$$

Полученное дифференциальное уравнение однородное, поскольку в цепи имеет место свободное движение. Решение уравнения имеет только свободную составляющую вида:

$$u_c = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3)$$

где: A_1 и A_2 – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями, p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения:

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (4)$$

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}\right)}. \quad (5)$$

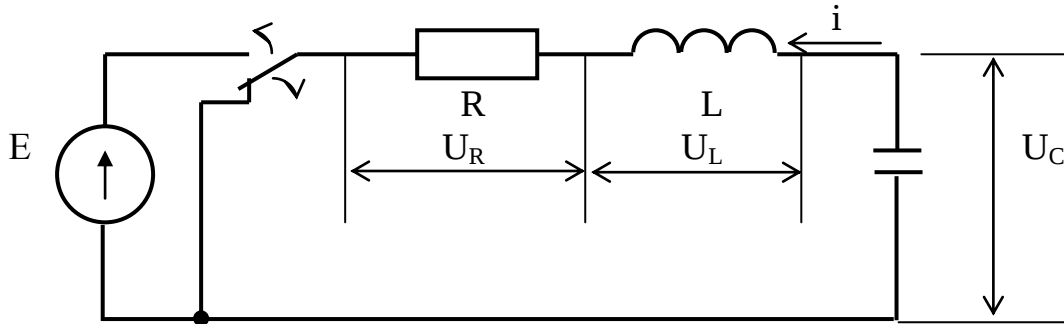


Рис. 13.1.

Когда $(R/2L)^2 - (1/LC) > 0$, т.е. $R > 2\sqrt{L/C} = R_{кр}$, корни характеристического уравнения вещественные и процесс изменения тока и напряжений имеет аperiодический затухающий характер. Если же $R < R_{кр}$, то корни характеристического уравнения сопряжённые комплексные и переходный процесс носит колебательный характер. Решение уравнения в этом случае имеет вид:

$$u_c = Be^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi) \quad (6)$$

где: B и ψ – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями,

$\alpha = R/(2L)$ – показатель затухания,

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2\right)} \quad - \text{ частота колебаний.}$$

При R , стремящемся к нулю, частота стремится к резонансной частоте контура $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, а затухание α – к нулю.

При отключении цепи от источника э.д.с. и закорачивании начальные условия (в предположении, что перед размыканием цепь была замкнута достаточно долго, и в ней имел место установившийся процесс):

$$U_c(0) = E, \quad i(0) = C(du_c/dt) = 0, \quad \text{поэтому } du_c/dt = 0.$$

Найдём du_c/dt , взяв производную от (3):

$$du_c/dt = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}$$

При $t = 0_+$ имеем:

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 &= E \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 &= 0 \end{aligned} \right\},$$

откуда

$$A_1 = Ep_2/(p_2 - p_1), \quad A_2 = Ep_1/(p_1 - p_2).$$

Аналогичным образом найдём постоянные интегрирования при колебательном процессе. Производная от (6):

$$du_c/dt = -\alpha Be^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi) + \omega e^{-\alpha t} B \cos(\omega t + \psi).$$

При $t=0_+$ имеем:

$$\left. \begin{aligned} B \sin \psi &= E \\ \alpha B \sin \psi - \omega B \cos \psi &= 0 \end{aligned} \right\},$$

откуда $\psi = \arctg(\omega/\alpha)$, $B = E/\sin \psi$.

Закон изменения тока может быть получен путём использования выражения: $i(t) = C(du_c/dt)$. Если корни характеристического уравнения вещественные, то

$$i = E \frac{Cp_1 p_2}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

Если корни сопряженные комплексные, то

$$i = B\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)} e^{-\alpha t} \sin \omega t.$$

Знак тока в последних двух выражениях соответствует условному положительному направлению, указанному на рис.13.1.

Графики изменения напряжения на конденсаторе и тока в цепи при вещественных корнях представлены на рис 13.2а, при комплексных – на рис. 13.2б.

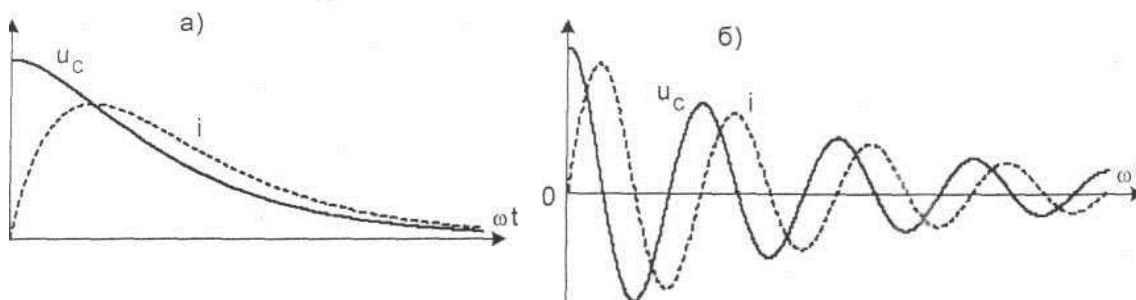


Рис.13.2.

При размыкании цепи с последующим подключением к источнику питания имеют место нулевые начальные условия (если перед размыканием ток в цепи отсутствовал), после подключения процесс в цепи описывается дифференциальным уравнением:

$$RC \frac{du_c}{dt} + LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c = E.$$

Ввиду того, что данное уравнение неоднородное, его решение состоит из суммы частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного. Частным решением является вынужденная составляющая, которую находим при $t=\infty$: $u_{c\infty} = E$. Общее решение однородного уравнения – это свободная составляющая напряжения, обусловленная внутренними свойствами электриче-

ской цепи, которая имеет вид (3), если корни характеристического уравнения вещественные, или вид (6), если корни сопряженные комплексные. Кривые переходных процессов будут выглядеть аналогично представленным на рис. 13.2, с той разницей, что напряжение на конденсаторе начнёт изменяться от нуля и будет стремиться к значению E , а ток начнёт изменяться в противоположную сторону.

В данной лабораторной работе заряд конденсатора до напряжения E осуществляется однополярными импульсами напряжения, разряд через сопротивление и индуктивность происходит во время пауз между импульсами. Повторяющийся процесс заряда и разряда конденсатора можно наблюдать на электронном или виртуальном осциллографе.

13.2 Порядок выполнения работы

1. Изучите основные теоретические положения.
2. Соберите схему, изображённую на рис. 13.3.
3. Не подавая напряжения питания на генератор импульсов, измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности:

$$R_k = \quad \text{Ом.}$$

4. Вычислите критическое сопротивление и резонансную частоту контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \quad \text{Гц}, \quad R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = \quad \text{Ом.}$$

5. Выведите на ноль подстроечный резистор $R_{доб}$, на генератор импульсов подайте напряжение питания, установите частоту импульсов 200 Гц и максимальную амплитуду.

6. На выводы конденсатора включите осциллограф, подберите усиление сигнала и частоту развертки так, чтобы на экране отображался один цикл зарядки и разрядки конденсатора. Учитывая, что при частоте генератора 200 Гц время этого цикла составляет 5 мс, вычислите период и частоту колебательного процесса:

$$T = \quad \text{мс}, \quad f = \quad \text{Гц.}$$

Убедитесь, что полученное значение частоты близко к резонансной частоте.

7. Плавно увеличивая добавочное сопротивление $R_{доб}$, убедитесь, что частота колебаний слегка уменьшается, а затухание увеличивается и при большом сопротивлении процесс становится апериодическим. Установите регулятор добавочного сопротивления в положение, при котором переходный процесс меняет характер, отключите питание генератора и омметром измерьте добавочное сопротивление. Вычислите суммарное сопротивление контура:

$$R_{доб} + R_k = \quad \text{Ом.}$$

Убедитесь, что эта сумма близка к $R_{кр}$.

8. Переключите осциллограф на выводы добавочного сопротивления и наблюдайте кривые изменения тока в цепи при различных характерах переходного процесса.

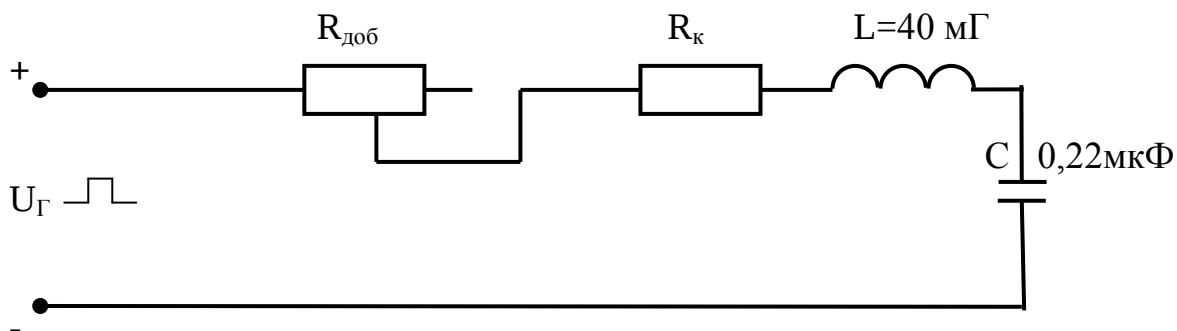


Рис. 13.3.

13.3 Содержание отчёта

1. Основные теоретические положения.
2. Схема исследуемой электрической цепи.
3. Измеренные и вычисленные значения величин, отмеченных в разделе «Порядок выполнения работы».
4. Графики наблюдаемых на экране осциллографа напряжения на конденсаторе и тока в цепи.

13.4 Контрольные вопросы

1. Как получают дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс электрической цепи?
2. Чем определяется порядок дифференциального уравнения?
3. В каком случае дифференциальное уравнение будет однородным, и в каком – неоднородным?
4. Как получить характеристическое уравнение, если известно дифференциальное?
5. Как корни характеристического уравнения влияют на характер переходного процесса?
6. Что понимают под показателем затухания резонансного контура, от чего зависит его величина?
7. От чего зависит частота колебательного процесса, возникающего в электрической цепи, состоящей из последовательно включённых катушки индуктивности и конденсатора?
8. Что понимают под критическим сопротивлением последовательного резонансного контура, как определить его величину?
9. Как вычислить значения постоянных интегрирования при решении дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в электрической цепи?

10. Как в данной лабораторной работе Вы определили частоту колебаний переходного процесса?

11. Как найти закон изменения тока заряда конденсатора, если известен закон изменения напряжения на его обкладках?

12. Как найти закон изменения напряжения на индуктивности, если известен закон изменения протекающего через неё тока?

Лабораторная работа №14

Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами

Цель работы: исследовать установившиеся электромагнитные процессы в длинной линии без потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания; изучить влияние величины и характера нагрузки на режим работы линии.

14.1 Основные теоретические положения

В мощных линиях передачи электрической энергии переменного тока на большие расстояния, в информационных линиях связи, в антеннах радиотехнических устройств и других установках, линейные размеры которых соизмеримы с длиной волн колебательного электромагнитного процесса, все изменения и превращения энергии электромагнитного поля распределены вдоль линии передачи энергии. Такие электрические цепи, в отличие от цепей с сосредоточенными параметрами, называются *цепями с сосредоточенными параметрами*.

На практике в подавляющем числе случаев приходится иметь дело с однородными линиями, параметры которых (активное сопротивление проводников, проводимость изоляции, индуктивность и ёмкость) равномерно распределены вдоль линии и постоянны на единицу её длины. Кроме того, эти параметры обычно не зависят от напряжения и величины протекающего тока, поэтому протекающие в них процессы могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями. Ввиду того, что напряжения и токи являются функциями не только времени, но и расстояния от начала (или конца) линии эти процессы описываются уравнениями в частных производных.

Схема длинной линии на бесконечно малом участке dx представлена на рис. 14.1.

Параметры линии зависят от типа линии (воздушная или кабельная), геометрических размеров и расположения проводов, их материала, от частоты приложенного напряжения. Зависимость основных параметров двухпроводной линии и коаксиального кабеля от геометрических размеров и расположения приведена в таблице 14.1.

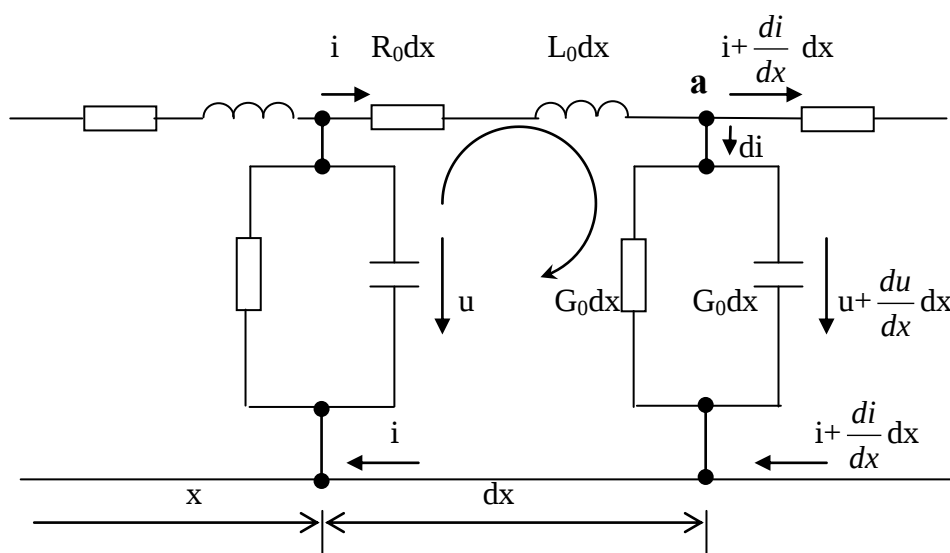


Рис.14.1.

Обозначения на рисунке: x - расстояние от начала линии, м, dx - бесконечно малый участок линии, длины линии, А/м, $\frac{du}{dx}$ - изменение напряжения на единицу длины линии, В/м, R_0 - сопротивление единицы длины линии (прямого и обратного проводов), Ом/м, L_0 - индуктивность единицы длины линии, Гн/м, G_0 - проводимость изоляции на единицу длины линии, См/м, C_0 - ёмкость единицы длины линии, Ф/м.

Таблица 14.1.

Параметры линии	Двухпроводная линия	Коаксиальная линия
Ёмкость на единицу длины	$C_0 \approx \frac{\pi \varepsilon}{\ln \frac{d}{r_0}}$	$C_0 = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln \frac{r_e}{r_i}}$
Индуктивность на единицу длины	$L_0 \approx \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{d}{r_0}$	$L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_e}{r_i}$
Волновое сопротивление	$Z_B \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{d}{r_0}$	$Z_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{r_e}{r_i}$
В приведенных формулах $\mu = \mu_0 \mu_r$ $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\varepsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м		

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура, образованного участком линии длиной dx , обойдя его по часовой стрелке:

$$-u + R_0 dx \cdot i + L_0 dx \frac{di}{dt} + u + \frac{du}{dx} dx = 0.$$

После упрощения и деления на dx получим:

$$-\frac{du}{dx} = L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i \quad (14.1).$$

По первому закону Кирхгофа для точки «а»:

$$i = di + i + \frac{di}{dx} dx,$$

Ток di равен сумме токов, протекающих через проводимость $G_0 dx$ и ёмкость $C_0 dx$:

$$di = (u + \frac{du}{dx} dx) G_0 dx + \frac{d}{dt} C_0 dx (u + \frac{du}{dx} dx).$$

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получим:

$$di = u G_0 dx + C_0 dx \frac{du}{dt}.$$

Подставим найденное значение di в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа, и разделим уравнение на dx :

$$-\frac{di}{dx} = G_0 u + C_0 \frac{du}{dt} \quad (14.2).$$

Уравнения (14.1) и (14.2) являются основными дифференциальными уравнениями для линии с распределёнными параметрами. Рассмотрим решение этих уравнений при установившемся синусоидальном процессе. Воспользуемся символическим методом. Изображение синусоидально изменяющегося тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ равно $\dot{I} e^{j\omega t}$, где $\dot{I} = I_m e^{j\psi_i} / \sqrt{2}$. Изображение напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ равно $\dot{U} e^{j\omega t}$, где $\dot{U} = U_m e^{j\psi_u} / \sqrt{2}$.

Комплексы $\dot{I}$ и $\dot{U}$ являются функциями расстояния x , но не являются функциями времени, множитель $e^{j\omega t}$ есть функция времени и не зависит от x . Представление изображений тока и напряжения в виде произведения двух множителей, один из которых зависит только от x , а второй — только от t , даёт возможность перейти от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных. Действительно,

$$\frac{du}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{U}/dx, \quad L_0 \frac{di}{dt} = L_0 \dot{I} d(e^{j\omega t})/dt = j\omega L_0 \dot{I} e^{j\omega t};$$

$$\frac{di}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{I}/dx, \quad C_0 \frac{du}{dt} = j\omega C_0 \dot{U} e^{j\omega t}.$$

Подставим полученные значения частных производных в уравнения (14.1), (14.2) и сократим уравнения на множитель $e^{j\omega t}$:

$$\begin{aligned}-d\dot{U}/dx &= (R_0 + j\omega L_0) \dot{I}; \\ -d\dot{I}/dx &= (G_0 + j\omega C_0) \dot{U}.\end{aligned}$$

Обозначим:

$R_0 + j\omega L_0 = Z_0$ – комплексное сопротивление единицы длины линии,

$G_0 + j\omega C_0 = Y_0$ – комплексная проводимость единицы длины линии.

С учётом этих обозначений система двух последних уравнений примет вид:

$$-d\dot{U}/dx = Z_0 \dot{I} \quad (14.3)$$

$$-d\dot{I}/dx = Y_0 \dot{U}. \quad (14.4)$$

Решим полученную систему уравнений относительно $\dot{U}$, для этого продифференцируем (14.3) по x :

$$-d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 d\dot{I}/dx,$$

и в полученное уравнение подставим $d\dot{I}/dx$ из (14.4). Получим:

$$d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 Y_0 \dot{U} \quad (14.5)$$

Уравнение (14.5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка, его решение имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x} \quad (14.6)$$

Комплексные числа $\dot{A}_1$ и $\dot{A}_2$ – постоянные интегрирования, значение которых определяется напряжением и током в начале или в конце линии. Коэффициент

$$\gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} \quad (14.7)$$

называют *постоянной распространения*, γ – комплексное число:

$$\gamma = \beta + j\alpha,$$

где β – коэффициент затухания, определяющий степень затухания падающей волны на единицу длины линии, α – коэффициент фазы, определяющий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии.

Ток $\dot{I}$ найдём из уравнения (14.3):

$$\dot{I} = -(1/Z_0)(d\dot{U}/dx) = \gamma(\dot{A}_2 e^{-\gamma x} - \dot{A}_1 e^{\gamma x})/Z_0.$$

Величина $Z_0/\gamma = Z_0/\sqrt{(Z_0 Y_0)} = \sqrt{(Z_0/Y_0)}$ имеет размерность сопротивления, её обозначают Z_B и называют *волновым сопротивлением*:

$$Z_B = \sqrt{(Z_0/Y_0)} = \sqrt{[(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)]} = Z_B e^{j\varphi_B} \quad (14.8),$$

где Z_B – модуль, а φ_B – аргумент волнового сопротивления. Таким образом,

$$\dot{I} = (\dot{A}_2/Z_B) e^{-\gamma x} - (\dot{A}_1/Z_B) e^{\gamma x} \quad (14.9).$$

В начале линии $x=0$, напряжение и ток обозначим $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$. Подставив эти значения в (14.6) и (14.9), найдём постоянные интегрирования:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_1 e^{j\psi_0}, \quad \dot{A}_2 = (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_2 e^{j\psi_n},$$

где ψ_0 и ψ_n – фазы отражённой и падающей волн.

Подставим значения постоянных интегрирования в (14.6) и (14.9):

$$\begin{aligned}\dot{U} &= (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B) e^{\gamma x}/2 + (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B) e^{-\gamma x}/2 = \\ &= \dot{U}_1 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 - \dot{I}_1 Z_B (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2.\end{aligned}$$

В полученном выражении $(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 = \text{ch} \gamma x$, $(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2 = \text{sh} \gamma x$ – гиперболические косинус и синус. Таким образом, напряжение вдоль линии изменяется в соответствии с выражением:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_1 Z_B \operatorname{sh} \gamma x \quad (14.10).$$

Аналогично получим выражение для тока:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - (\dot{U}_1 / Z_B) \operatorname{sh} \gamma x \quad (14.11).$$

Формулы для определения комплексов напряжения и тока можно получить, используя комплексы напряжения $\dot{U}_2$ и тока $\dot{I}_2$ в конце линии:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_2 - \dot{I}_2 Z_B) e^{-\gamma \ell} / 2 = A_1 e^{j\psi_0} \quad (14.12)$$

$$\dot{A}_2 = (\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_B) e^{\gamma \ell} / 2 = A_2 e^{j\psi_n} \quad (14.13)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma y + \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma y \quad (14.14)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma y + (\dot{U}_2 / Z_B) \operatorname{sh} \gamma y \quad (14.15)$$

где $y = \ell - x$ – расстояние от конца линии до точки, в которой определяются комплексы напряжения и тока.

Для перехода от комплексов напряжения и тока к функциям времени формулы (14.6) и (14.9) преобразуем следующим образом:

- подставим $\dot{A}_1 = A_1 e^{j\psi_0}$, $\dot{A}_2 = A_2 e^{j\psi_n}$, $Z_B = z_B e^{j\varphi_B}$,

- заменим $\gamma = \beta + j\alpha$,

- умножим правые части на $\sqrt{2} e^{j\omega t}$ и от произведений возьмём мнимую часть:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x) + A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x) \quad (14.16)$$

$$i = -(A_1 \sqrt{2} / z_B) e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x - \varphi_B) + (A_2 \sqrt{2} / z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x - \varphi_B) \quad (14.17)$$

Из полученных выражений видно, что напряжение и ток могут быть представлены в виде двух периодически изменяющихся слагаемых. Фазы вторых из них с течением времени остаются постоянными с увеличением расстояния от начала линии, т.е. эти слагаемые представляет собой волны, перемещающиеся от начала к концу линии. Эти волны принято называть падающими, их амплитуда с увеличением x уменьшается по экспоненте. Фазы первых слагаемых с течением времени остаются постоянными с уменьшением расстояния x , эти волны напряжения и тока называют отражёнными, их амплитуда увеличивается по экспоненте от начала линии к её концу (иначе – уменьшается от конца к началу). Физически уменьшение амплитуд при продвижении волн от начала к концу и от конца к началу линии объясняется наличием в линии активных потерь.

Скорость перемещения волны вдоль линии называют фазовой скоростью v_ϕ . Иначе можно сказать, что фазовая скорость – это скорость перемещения по линии неизменного фазового состояния. Если фаза, например, падающей волны напряжения неизменна, то в соответствии с (14.16)

$$\omega t + \psi_n - \alpha x = \text{const.}$$

Возьмём производную по времени от обеих частей последнего равенства:

$$\omega - \alpha(dx/dt) = 0, \text{ отсюда с учётом того, что } \alpha = \omega \sqrt{L_0 C_0}$$

$$v_\phi = dx/dt = \omega / \alpha = 1 / \sqrt{L_0 C_0} \quad (14.18)$$

Таким образом, фазовая скорость определяется параметрами линии и не зависит от частоты. Фазовая скорость, частота $f = \omega / (2\pi)$ и длина волны λ связаны соотношением:

$$\lambda = v_\phi / f \quad (14.19)$$

В ряде случаев R_0 и G_0 значительно меньше L_0 и C_0 . В этих случаях активными потерями можно пренебречь, тогда

$$Z_0 = j\omega L_0, Y_0 = j\omega C_0, \gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} = j\omega \sqrt{(L_0 C_0)}, \text{ т.е.}$$

$\beta = 0$, $\alpha = \omega \sqrt{(L_0 C_0)}$, $Z_B = \sqrt{(Z_0/Y_0)} = \sqrt{(L_0/C_0)}$ – волновое сопротивление вещественное, т.е. является чисто активным. При пренебрежении активными сопротивлением и проводимостью в выражениях (14.10) и (14.11), а также (14.14) и (14.15) под знаками гиперболических функций аргумент становится чисто мнимым, но т.к. $chj\alpha y = \cos \alpha y$ и $shj\alpha y = j \sin \alpha y$, то последние выражения принимают вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \cos \alpha x - j \dot{I}_1 Z_B \sin \alpha x \quad (14.20)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \cos \alpha x - j (\dot{U}_1 / Z_B) \sin \alpha x \quad (14.21)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \alpha y + j \dot{I}_2 Z_B \sin \alpha y \quad (14.22)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y + j (\dot{U}_2 / Z_B) \sin \alpha y \quad (14.23)$$

Последние выражения справедливы для *линии без потерь*.

Линия с распределёнными параметрами может находиться в трёх режимах:

- в *согласованном* режиме,
- в режиме *стоячих волн*,
- в режиме *смешанных волн*.

Согласованный режим имеет место тогда, когда сопротивление нагрузки Z_H , подключённой в конце линии, равно волновому сопротивлению Z_B .

В этом случае $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H = \dot{I}_2 Z_B$ и согласно (14.12) $\dot{A}_1 = 0$, т.е. отраженные волны напряжения и тока при $Z_H = Z_B$ отсутствуют и

$$u = A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x) \quad (14.24)$$

$$i = (A_2 \sqrt{2} / Z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x - \varphi_B) \quad (14.25)$$

Нагрузку, имеющую такое сопротивление, называют *согласованной*.

Для *линии без потерь* при *согласованной нагрузке*

$$u = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.26)$$

$$i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.27)$$

Из последних выражений следует, что при согласованном режиме работы линии без потерь возникают только бегущие волны напряжения и тока, вся энергия, передаваемая от генератора к приёмнику, расходуется в приёмнике. В любой точке линии и ток, и напряжение изменяются синусоидально с одинаковыми амплитудами, совпадая по фазе. Действующие значения тока и напряжения вдоль линии остаются постоянными, меняется только их фаза. Отношение напряжения к току в любой точке линии равно полному сопротивлению, следовательно $Z_{BX} = Z_B = Z_H = R_H$.

Режим стоячих волн возникает в трёх случаях: при отсутствии нагрузки в конце линии (режим *холостого хода*, когда $Z_H = \infty$), при коротком замыкании в конце линии (режим *короткого замыкания*, когда $Z_H = 0$) и при чисто реактивной нагрузке ($Z_H = jX$). Стоячие волны возникают в результате наложения прямой и отражённой волн. При стоячих волнах в одних точках линии напряжение или ток в любой момент времени равны нулю (эти точки называют узла-

ми), в других точках, отстоящих на четверть волны от первых, напряжение или ток изменяются с максимальной амплитудой (эти точки называют пучностями). Математически стоячая волна напряжения и стоячая волна тока описываются произведением двух тригонометрических функций, одна из которых – функция времени, вторая – функция координаты x или y – расстояния от начала или конца линии.

Найдём уравнения стоячих волн напряжения и тока в линии без потерь при отсутствии нагрузки на её конце, т.е. когда $\dot{I}_2=0$. В этом случае (14.22) и (14.23) примут вид:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_2 \cos \alpha y, \\ \dot{I} &= j(\dot{U}_2 / Z_B) \sin \alpha y.\end{aligned}$$

Для перехода от комплексов $\dot{U}$ и $\dot{I}$ к функциям времени необходимо правые части последних выражений домножить на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ и выделить мнимые части, которые и будут напряжением и током, как функциями и расстояния, и времени:

$$u = \sqrt{2}U_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.28)$$

$$i = \sqrt{2}(U_2 / Z_B) \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.29)$$

В точках линии, где $\alpha y = n\pi + \pi/2$, амплитуда напряжения $\sqrt{2}U_2 \cos \alpha y = 0$, т.е. в этих точках имеют место узлы напряжения. В этих же точках амплитуда тока имеет максимум $\sqrt{2}(U_2 / Z_B)$, т.е. в этих точках будут пучности тока. В точках линии, где $\alpha y = n\pi$, имеют место пучности напряжения и узлы тока.

Входное сопротивление линии без потерь при холостом ходе

$$Z_{BX_{xx}} = \dot{U} / \dot{I} = -j Z_B \operatorname{ctg} \alpha y = -j Z_B \operatorname{ctg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.30)$$

при длине линии $y = (\lambda n)/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BX_{xx}}=0$,

при длине линии $y = (\lambda n)/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BX_{xx}}=\infty$.

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет ёмкостный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – индуктивный характер.

Стоячие волны образуются также при коротком замыкании в конце линии.

В этом случае $\dot{U}_2=0$, вследствие чего уравнения (14.22) и (14.23) имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= j\dot{I}_2 Z_B \sin \alpha y, \\ \dot{I} &= \dot{I}_2 \cos \alpha y.\end{aligned}$$

Переходя к функциям времени, получим:

$$u = \sqrt{2}I_2 Z_B \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.31)$$

$$i = \sqrt{2}I_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.32)$$

Из полученных зависимостей следует, что картина стоячей волны напряжения при коротком замыкании повторяет картину стоячей волны при холостом ходе, а картина стоячей волны тока при коротком замыкании – картину стоячей волны напряжения при холостом ходе.

Входное сопротивление короткозамкнутой линии без потерь

$$Z_{BX_{кз}} = jZ_B \operatorname{tg}(\alpha y) = jZ_B \operatorname{tg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.33)$$

при длине линии $y = (\lambda n)/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BX_{кз}}=\infty$,

при длине линии $y = (\lambda n)/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BX_{кз}}=0$.

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет индуктивный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – ёмкостный характер.

Рассмотренные свойства четвертьволновых и полуволновых отрезков длинных линий используют в радиотехнических устройствах для получения колебательных контуров с высокой добротностью.

Таким образом, режим стоячих волн имеет следующие особенности:

- напряжение и ток в любой точке линии сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$;
- расхода энергии в этом режиме нет, т.к. падающая волна полностью отражается от конца линии;
- действующие значения напряжения и тока меняются вдоль линии по синусоидальному закону, достигая максимальных значений (пучностей) и нулевых значений (узлов) через четверть волны в результате наложения падающей и отражённой волн.

Режим смешанных волн в линии без потерь возникает, если линия замкнута на сопротивление, отличное от волнового. В этом режиме существуют одновременно и бегущая, стоячая волны. Мгновенные значения напряжения и тока в любой точке линии в этом случае определяются выражениями (14.16) и (14.17) (напомним, что в линии без потерь $\beta=0$). Распределение действующих значений напряжения и тока вдоль линии характеризуется наличием максимумов и минимумов, но минимумы не принимают нулевых значений. Если $Z_B > R_H$ (так же, как и при $Z_B = R_H$), то к концу линии устанавливается минимум напряжения и максимум тока. Если сопротивление нагрузки комплексное, то экстремальные значения напряжения и тока сдвигаются относительно конца линии. Если $Z_H < R_H$, то в конце линии устанавливается максимум напряжения и минимум тока.

14.2 Порядок выполнения работы

В данной лабораторной работе необходимо провести испытания линии с распределёнными параметрами, состоящей из отрезка коаксиального кабеля. Линию необходимо испытать в согласованном режиме, в режиме стоячих волн при холостом ходе и при коротком замыкании и в режиме смешанных волн при $R_H < Z_B$ и $R_H > Z_B$. Синусоидальное напряжение на начало кабеля подаётся от высокочастотного генератора. Для измерения действующего значения напряжения, которое производится с помощью вольтметра, на кабеле через равные промежутки имеются контактные выводы.

Порядок выполнения работы следующий.

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Собрать лабораторную установку, схема которой изображена на рис. 14.2.
3. Подключив $R_H = Z_B$, исследовать распределение напряжения вдоль линии. Результаты замеров занести в таблицу 14.2.
4. Исследовать распределение напряжения вдоль разомкнутого на конце кабеля.

5. Исследовать распределение напряжения вдоль кабеля, замкнутого на конце накоротко.

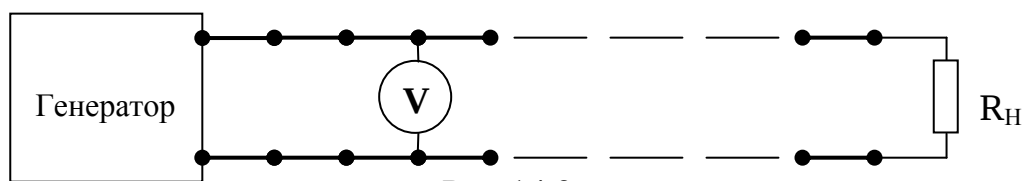


Рис.14.2.

6. Исследовать распределение напряжения в режиме смешанных волн при $R_H > Z_B$ и $R_H < Z_B$. При каждом включении линии на её входе следует устанавливать одно и то же напряжение 0.5 В. Частота напряжения для всех режимов задаётся преподавателем.

7. По данным измерений построить графики распределения действующего значения напряжения вдоль линии для всех режимов нагрузки. При подготовке отчёта по лабораторной работе определить длину волны λ и фазовую скорость v_ϕ .

Таблица 14.2.

Номер Контакта	Напряжение, В				
	$R_H = Z_B$	$R_H = 0$	$R_H = \infty$	$R_H > Z_B$	$R_H < Z_B$
0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1					
...					
24					

14.3 Содержание отчёта

1. Схема лабораторной установки;
2. Таблица опытных данных;
3. Кривые распределения действующих значений напряжения для всех значений нагрузки;
4. Расчёт значений λ и v_ϕ .

14.4 Контрольные вопросы

1. Какие линии относят к линиям с распределёнными параметрами?
2. Перечислите электрические параметры длинной линии. Их размерность?
3. Справедливо ли для параметров длинной линии соотношение $Z_0 = 1/G_0$?
4. Функциями каких переменных являются напряжение и ток в линии с распределёнными параметрами?
5. Чем определяются значения параметров длинной линии?
6. Как получить основные уравнения длинной линии?
7. Каким образом при решении уравнений длинной линии переходят от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных?
8. Как относительно комплексов напряжения и тока выглядит общий вид

решения уравнений длинной линии?

9. Что представляют собой постоянная распространения, коэффициент затухания, коэффициент фазы? Что определяют эти коэффициенты?

10. Как определяют постоянные интегрирования в решении уравнений длинной линии?

11. Как перейти от комплексов напряжения и тока к функциям времени?

12. Объясните, почему в общем случае напряжение и ток в длинной линии можно представить как сумму падающей и отражённой волн?

13. Что понимают под фазовой скоростью? Как она связана с частотой напряжения и длиной волны?

14. Какую линию называют линией без потерь?

15. Какие режимы могут существовать в длинной линии? Охарактеризуйте эти режимы. Чем они определяются?

16. Каким может быть и чем определяется входное сопротивление длинной линии? Что понимают под волновым сопротивлением линии?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, М., «Юрайт», 2013.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Сборник задач, М., «Юрайт», 2016.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Общая электротехника. – М.: «Энергоиздат», 2002.